



REPÚBLICA DEL ECUADOR

Escuela Politécnica Nacional

" E S C I E N T I A H O M I N I S S A L U S "

La versión digital de esta tesis está protegida por la Ley de Derechos de Autor del Ecuador.

Los derechos de autor han sido entregados a la "ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL" bajo el libre consentimiento del (los) autor(es).

Al consultar esta tesis deberá acatar con las disposiciones de la Ley y las siguientes condiciones de uso:

- Cualquier uso que haga de estos documentos o imágenes deben ser sólo para efectos de investigación o estudio académico, y usted no puede ponerlos a disposición de otra persona.
- Usted deberá reconocer el derecho del autor a ser identificado y citado como el autor de esta tesis.
- No se podrá obtener ningún beneficio comercial y las obras derivadas tienen que estar bajo los mismos términos de licencia que el trabajo original.

El Libre Acceso a la información, promueve el reconocimiento de la originalidad de las ideas de los demás, respetando las normas de presentación y de citación de autores con el fin de no incurrir en actos ilegítimos de copiar y hacer pasar como propias las creaciones de terceras personas.

Respeto hacia sí mismo y hacia los demás.

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

SINTONIZACIÓN DE LOS ESTABILIZADORES DE SISTEMAS DE POTENCIA DEL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO ECUATORIANO – APLICACIÓN Y COMPARACIÓN DE MÉTODOS HEURÍSTICOS EN AMBIENTE MULTIMÁQUINA

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
ELÉCTRICO**

FRANCISCO JAVIER ARMENDÁRIZ VALVERDE

DAVID MAURICIO PANCHI VERGARA

DIRECTOR: Dr. HUGO ARCOS MARTÍNEZ

Quito, marzo de 2017

DECLARACIÓN

Nosotros, Francisco Javier Armendáriz Valverde y David Mauricio Panchi Vergara, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Francisco Javier Armendáriz Valverde

David Mauricio Panchi Vergara

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Francisco Javier Armendáriz Valverde y David Mauricio Panchi Vergara, bajo mi supervisión.

Dr. Hugo Arcos Martínez
DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

A Dios, por las eternas bendiciones que ha derramado siempre sobre mi vida, por poner la fortaleza, paz y mansedumbre necesaria en mi corazón para en cada momento difícil de mi vida seguir adelante, por darme la fe de que toda su obra obedece a un maravilloso plan y guiar mi camino cada día hacia el éxito.

A mi maravillosa mami Targe, por haberme guiado en mi camino con su infinito amor y dulzura, por ser la persona más importante en mi vida y siempre ser el pilar fundamental en mi camino, nunca me alcanzará la vida para agradecer toda su paciencia y amor en cada paso de mi vida, por ser quien puso la marca de responsabilidad y fortaleza en mí. Te amo mamá.

A mi estupendo papá Byron, por haberme dado todo lo necesario para convertirme en una mejor persona, por demostrarme que cada persona puede llegar al éxito con perseverancia y arduo trabajo.

A mi ñaña Gaby, que con sus ocurrencias y amor siempre me dio los ánimos necesarios para llegar a esta consecución. A mi ñaño Ariel, que siempre ha sido una persona muy importante, por su respeto y admiración hacia mí.

A mis abuelitos María y Juan, que han sido mis segundos padres, por mostrarme que la vida se hace en base a esfuerzo y perseverancia, por su gran amor en cada paso de mi vida. A mis abuelitos Héctor y Tomasita(+), porque a pesar de la distancia siempre me mostraron su gran amor y apoyo, y aunque la vida no me alcanzó para compartir este éxito con mi abuelita sé que desde el cielo siempre me cuida y protege con su infinito amor.

A mis profesores, que con su valía tanto profesional, así como humana impartieron los conocimientos necesarios para formarme como profesional. En especial al Dr. Hugo Arcos por ser un gran director y por la amistad brindada.

A mi gran amigo Panchi por haber sido casi un hermano a lo largo de mi vida estudiantil, por la ayuda y colaboración para hacer esto posible.

A aquellas personas especiales que siempre fueron parte de mi vida, con sus consejos y apoyo siempre fueron un motor para esta consecución gente tan especial como Karen que siempre fue como una maravillosa hermana de vida para mí, David quien con sus consejos me ayudo a llegar a la meta, mis tíos, primos, y toda mi familia en general que siempre confiaron en mí, y han dejado una gran y hermosa huella en mi vida.

¡Eternamente agradecido con todas las personas que fueron partícipes de esto!

Pancho

AGRADECIMIENTO

A Dios por la fuerza y fe que me supo dar en momentos difíciles y en todo el proceso tanto educativo y personal de mi vida. A mi padre y hermana por el amor brindado en todo este trayecto así como por haberme brindado su apoyo y su guía incondicional, a mi padre por procurar que nada nos faltara a mi hermana y a mí en todo este tiempo.

Al Dr. Hugo Arcos, director del presente proyecto, por la confianza puesta en mi persona, por su asesoramiento, ayuda y amistad brindada.

A todos mis amigos, tíos, abuelitos, primos y profesores que fueron parte de mi desarrollo universitario y supieron brindarme su confianza y apoyo durante el mismo.

Al Ing. Fausto Avilés por su amistad, por su apoyo, ayuda y consejos dados hacia mi persona los cuales me fueron muy útiles y me supieron dar fuerza para seguir adelante en mis estudios.

A mi amigo Pancho por su ayuda y soporte en la realización de este proyecto en conjunto y por su amistad a lo largo de la carrera.

A mi tía Consuelito por su ayuda en momentos difíciles lo cual hizo que supiera seguir adelante.

David P.V.

DEDICATORIA

A Dios por su amor en cada momento de mi vida.

A mis padres Targelia y Byron por su eterno amor y paciencia, por haber estado junto a mí en cada uno de los momentos de mi vida, y ser mi gran apoyo.

A todas las personas que creyeron en mí siempre, y pusieron su granito de arena para llegar a cumplir este objetivo.

¡Porque a pesar de que el camino fue largo y difícil, con su apoyo fue posible cumplir este sueño!

Pancho

DEDICATORIA

A MI MADRE MÓNICA QUE DESDE EL CIELO ME GUIÓ Y ME DIO FUERZA EN TODO
ESTE CAMINO.

A MI ABUELITO JORGE QUE IGUAL DESDE EL CIELO ME GUIARÁ EL RESTO DE MI
VIDA.

A MI PADRE JORGE Y HERMANA CAROL.

Y SOBRETUDO A DIOS.

DAVID P.V.

CONTENIDO

DECLARACIÓN	I
CERTIFICACIÓN	II
AGRADECIMIENTO.....	III
DEDICATORIA.....	V
RESUMEN	XIII
PRESENTACIÓN	XV
CAPÍTULO I	1
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVOS	1
1.1.1 OBJETIVO GENERAL.....	1
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.2 ALCANCE	2
1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	3
CAPÍTULO II	5
2 MARCO TEÓRICO	5
2.1 INTRODUCCIÓN	5
2.2 ESTABILIDAD EN SISTEMAS DE POTENCIA ^{[1], [2], [3]}	5
2.2.1 ESTABILIDAD DE ÁNGULO ^{[1], [3]}	6
2.2.1.1 Estabilidad de Pequeña Señal	6
2.2.2 MODELAMIENTO DE UN SISTEMA DE POTENCIA ^{[1], [3],[4],[5]}	7
2.2.2.1 Análisis Propio	8
2.2.2.1.1 Valores propios	8
2.2.2.1.1.1 Valores propios reales.....	8
2.2.2.1.1.2 Valores propios complejos	9
2.2.2.1.2 Vectores propios	9
2.2.2.1.2.1 Vectores propios derechos.....	10
2.2.2.1.2.2 Vectores propios izquierdos	10
2.2.2.2 Modos de Oscilación.....	10
2.2.2.3 Factor de participación.....	11
2.3 ESTABILIZADORES DE SISTEMAS DE POTENCIA (PSS) ^[1]	12

2.3.1	DIAGRAMA DE CONTROL GENERAL.....	12
2.3.1.1	Composición del diagrama de bloques convencional	12
2.3.2	CONTROL Y SINTONIZACIÓN.....	13
2.4	MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN ^[6]	14
2.4.1	MÉTODOS CLÁSICOS ^[12]	14
2.4.1.1	Métodos directos.....	14
2.4.1.2	Métodos de gradiente	14
2.4.1.3	Métodos de programación lineal	14
2.4.1.4	Métodos de puntos interiores	15
2.4.1.5	Métodos de programación no lineal	15
2.4.2	MÉTODOS HEURÍSTICOS ^[6] ^[12]	15
2.4.2.1	Algoritmos Constructivos.....	16
2.4.2.2	Algoritmos de Búsqueda Local.....	16
2.4.3	MÉTODOS META HEURÍSTICOS ^[12] ^[13]	16
2.4.3.1	Métodos de trayectoria.....	17
2.4.3.2	Métodos basados en población.....	17
2.4.3.2.1	Algoritmos evolutivos	17
2.4.3.2.2	Algoritmos genéticos.....	18
2.5	OPTIMIZACIÓN POR ENJAMBRE DE PARTÍCULAS (PSO) ^[7] , ^[8]	19
2.5.1	INTRODUCCIÓN.....	19
2.5.2	ENFOQUES DEL PSO	20
2.5.3	FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL ALGORITMO ^[7] , ^[8] , ^[14]	20
2.5.3.1	Configuraciones del algoritmo.....	22
2.5.3.1.1	Tamaño de la población	22
2.5.3.1.2	Velocidad máxima.....	23
2.5.3.1.3	Coefficientes de aceleración	23
2.5.3.1.4	Peso de inercia	23
2.5.3.2	Algoritmo PSO	24
2.5.3.2.1	Diagrama de flujo algoritmo PSO.....	25
2.5.3.2.2	Comportamiento del enjambre.....	26
2.6	OPTIMIZACIÓN POR MAPEO DE MEDIA VARIANZA MVMO ^[9] , ^[10] , ^[11]	27
2.6.1	INTRODUCCIÓN ^[9]	27
2.6.2	FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL ALGORITMO ^[9]	28

2.6.2.1	Inicialización.....	28
2.6.2.2	Evaluación de aptitud de soluciones.....	28
2.6.2.3	Criterio de terminación.....	29
2.6.2.4	Archivo solución.....	29
2.6.2.5	Cálculo de la media y la varianza.....	30
2.6.2.6	Selección de padre, cruce y mutación.....	30
2.6.2.7	Diagrama de flujo del MVMO.....	34
CAPÍTULO III.....		36
3	APLICACIÓN PRÁCTICA DE ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN MVMO Y PSO EN UN SISTEMA DE PRUEBA.....	36
3.1	INTRODUCCIÓN.....	36
3.2	SISTEMA DE PRUEBA.....	36
3.2.1	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE PRUEBA.....	37
3.2.1.1	Generadores.....	37
3.2.1.2	Estabilizadores de Sistemas de Potencia (PSS).....	38
3.2.2	ANÁLISIS INICIAL DEL SISTEMA.....	39
3.2.2.1	Análisis de pequeña señal.....	40
3.3	APLICACIÓN DEL ALGORITMO MVMO.....	43
3.3.1	FUNCIÓN OBJETIVO.....	44
3.3.2	METODOLOGÍA DE APLICACIÓN DEL MVMO EN DIGSILENT POWERFACTORY.....	46
3.3.3	RESULTADOS OBTENIDOS.....	51
3.3.3.1	Análisis de pequeña señal del sistema optimizado.....	52
3.3.3.2	Análisis Dinámico del sistema optimizado.....	53
3.4	APLICACIÓN DEL ALGORITMO PSO.....	55
3.4.1	FUNCIÓN OBJETIVO.....	56
3.4.2	METODOLOGÍA DE APLICACIÓN DEL ALGORITMO PSO EN DIGSILENT POWERFACTORY.....	56
3.4.3	RESULTADOS OBTENIDOS.....	60
3.4.3.1	Análisis de pequeña señal del sistema optimizado.....	61
3.4.3.2	Análisis dinámico del sistema optimizado.....	62
3.5	COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN MVMO Y PSO.....	66
3.5.1	ANÁLISIS DE PEQUEÑA SEÑAL.....	66

3.5.1.1	Modo Oscilación local 1	66
3.5.1.2	Modo Oscilación local 2	68
3.5.2	ANÁLISIS DINÁMICO DEL SISTEMA.....	70
3.5.2.1	Voltaje Terminal	71
3.5.2.2	Frecuencia Eléctrica.....	72
3.5.2.3	Potencia Activa	73
3.5.2.4	Potencia Reactiva	75
3.5.3	ANÁLISIS DE CONVERGENCIA Y TIEMPOS DE EJECUCIÓN	76
CAPÍTULO IV	80
4	APLICACIÓN PRÁCTICA DE LOS ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN MVMO Y PSO EN EL SNI 2018.....	80
4.1	ACONDICIONAMIENTO DE LA BASE DE DATOS.....	80
4.1.1	DESARROLLO DE MODELOS DE CONTROL INDIVIDUALES DE LAS NUEVAS CENTRALES DE GENERACIÓN.....	81
4.1.1.1	Metodología para el modelamiento de los sistemas de control ^[10]	81
4.1.1.1.1	Modelamiento del Regulador de Voltaje (AVR).....	82
4.1.1.1.2	Modelamiento de la excitatriz.....	83
4.1.1.1.3	Modelamiento del regulador de velocidad (PCU).....	84
4.1.1.1.4	Modelamiento del estabilizador de potencia (PSS).....	85
4.1.1.2	Pruebas de los modelos en isla ^[18]	87
4.1.1.2.1	Pruebas en estado estable	87
4.1.1.2.2	Pruebas del regulador de voltaje (AVR).....	89
4.1.1.2.3	Pruebas del regulador de velocidad (PCU).....	90
4.1.1.2.4	Rechazo de carga del 100%	92
4.1.1.2.5	Variación de carga del +/- 10%	93
4.1.2	PROCEDIMIENTO DE ADECUACIÓN DE LA BASE DE DATOS PROYECTADA AL AÑO 2018	94
4.1.2.1	Validación inicial de la base de datos	94
4.1.2.2	Incorporación de modelos en unidades en operación hasta el año 2015.....	95
4.1.2.3	Incorporación de nuevos modelos de unidades proyectadas en operación al año 2018	96

4.2	APICACIÓN DE LOS ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN MVMO Y PSO PARA LA SINTONIZACIÓN DE PSS EN EL SNI 2018.....	98
4.2.1	CARACTERÍSTICAS DEL CASO DE ESTUDIO	98
4.2.2	ANÁLISIS INICIAL DEL SISTEMA	99
4.2.2.1	Análisis de pequeña señal	99
4.2.2.1.1	Modo de oscilación local – Máquina participante Baba.....	102
4.2.2.1.2	Modo de oscilación local – Máquinas participantes Baba y Coca Codo Sinclair.....	103
4.2.2.1.3	Modo de oscilación interárea – Máquinas participantes de Colombia y Ecuador	104
4.2.2.1.4	Modo de oscilación local – Máquinas participantes Daule Peripa y Coca Codo Sinclair	105
4.2.2.1.5	Modo de oscilación local – Máquina participante Daule Peripa.....	106
4.2.2.1.6	Modo de oscilación local – Máquina participante Daule Peripa.....	107
4.2.2.1.7	Unidades participantes en la sintonización de PSS	108
4.2.3	APICACIÓN DEL ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN POR MAPEO DE MEDIA VARIANZA (MVMO)	108
4.2.3.1	Función objetivo	108
4.2.3.2	Método de unidades equivalentes.....	109
4.2.3.3	Resultados obtenidos.....	110
4.2.3.3.1	Parámetros obtenidos	110
4.2.3.3.2	Análisis de pequeña señal	111
4.2.3.3.3	Análisis dinámico del sistema	112
4.2.4	APICACIÓN DEL ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN POR ENJAMBRE DE PARTÍCULAS (PSO)	116
4.2.4.1	Función objetivo	116
4.2.4.2	Resultados obtenidos.....	117
4.2.4.2.1	Parámetros obtenidos	117
4.2.4.2.2	Análisis de pequeña señal	118
4.2.4.2.3	Análisis dinámico del sistema	119
4.2.5	COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LOS MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN MVMO Y PSO.....	123
4.2.5.1	Detalles de la comparación entre métodos	124

4.2.5.2	Análisis de pequeña señal	124
4.2.5.2.1	Modo de oscilación local – Máquina participante Baba.....	125
4.2.5.2.2	Modo de oscilación local – Máquinas participantes Baba y Coca Codo Sinclair.....	126
4.2.5.2.3	Modo de oscilación interárea – Máquinas participantes de Colombia y Ecuador	128
4.2.5.2.4	Modo de oscilación local – Máquinas participantes Daule Peripa y Coca Codo Sinclair	130
4.2.5.2.5	Modo de oscilación local – Máquina participante Daule Peripa.....	132
4.2.5.3	Análisis dinámico del sistema	135
4.2.5.3.1	Barra Molino 230 kV.....	135
4.2.5.3.2	Unidad 1 de Coca Codo Sinclair	138
4.2.5.4	Análisis de convergencia y tiempos de ejecución	143
CAPÍTULO V		147
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	147
5.1	CONCLUSIONES.....	147
5.2	RECOMENDACIONES	149
6	BIBLIOGRAFÍA.....	150
7	ANEXOS.....	152

RESUMEN

La estabilidad es un factor importante en el comportamiento de los sistemas de potencia, con el transcurrir del tiempo el sistema eléctrico ecuatoriano ha crecido de una forma vertiginosa incorporando nuevos elementos en gran cantidad que repercuten directamente en el comportamiento del sistema, por lo que se convierte en una necesidad el incorporar métodos que permitan contribuir al mejoramiento de la estabilidad, desde esta perspectiva la implementación de estabilizadores de sistemas de potencia (PSS) ha demostrado ser un método que aporta al mejoramiento de la estabilidad, por esta razón el presente trabajo ha sido desarrollado con el fin de analizar la validez de los métodos de optimización heurísticos por mapeo de media varianza (MVMO) y por enjambre de partículas (PSO) para la sintonización de los parámetros de los PSS del Sistema Nacional Interconectado proyectado al año 2018.

Haciendo uso de la herramienta DlgSILENT PowerFactory se modeló los sistemas de control de las nuevas unidades de generación hidráulica que ingresarán en operación hasta el año horizonte 2018, posteriormente se los incorporó a una base de datos de expansión procediéndose a su validación mediante diferentes pruebas que verifican su correcto funcionamiento.

Posteriormente los algoritmos heurísticos de optimización MVMO y PSO fueron implementados en lenguaje DPL de PowerFactory, para la sintonización de los parámetros de los PSS con el objetivo de mejorar el amortiguamiento de los modos oscilatorios del sistema. En primera instancia se realiza la aplicación sobre el sistema de pruebas IEEE de 9 barras lo que permite corroborar el correcto funcionamiento de los algoritmos, la metodología aplicada consiste en realizar un análisis preliminar de pequeña señal para obtener información sobre modos de oscilación y factores de participación de las máquinas cuyos PSS necesitan ser calibrados. Una vez efectuada la sintonización se realiza un análisis del sistema para verificar la contribución de cada método al mejoramiento de su estabilidad.

Finalmente se aplica la metodología sobre el SNI 2018 proyectado y con los resultados obtenidos se procede a realizar una comparativa entre ambos métodos lo que permite determinar que algoritmo ofrece mejores incrementos en el amortiguamiento de los modos oscilatorios del sistema y consecuentemente en su estabilidad.

PRESENTACIÓN

El presente trabajo ha sido desarrollado en 5 capítulos que abarcan detalladamente la aplicación de los algoritmos MVMO y PSO en la sintonización de PSS, así como el análisis de resultados obtenidos en los sistemas propuestos (IEEE 9 barras y SNI 2018).

En el Capítulo I, se presenta la introducción, objetivos general y específicos, el alcance y justificación del proyecto.

En el Capítulo II, se desarrolla una breve descripción del marco teórico utilizado para el presente proyecto, el cual consta en una primera parte la teoría de estabilidad sistemas de potencia, análisis de pequeña señal y estabilizadores de potencia, culminando con la parte de métodos de optimización y especificaciones de los algoritmos aplicados en el proyecto PSO y MVMO.

En el Capítulo III, se realiza la aplicación de los algoritmos de optimización MVMO y PSO para sintonizar los PSS del sistema de pruebas IEEE 9 barras, la metodología utilizada inicia con un análisis del sistema para obtener datos de modos de oscilación y factores de participación para determinar las máquinas cuyos PSS se procederán a sintonizar, se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los métodos aplicados tanto de análisis de pequeña señal así como de simulaciones dinámicas del sistema de pruebas, se culmina con la comparación de los resultados obtenidos para cada método y la determinación de qué algoritmo provee mejores resultados a la estabilidad del sistema.

En el Capítulo IV, se presenta inicialmente el proceso desarrollado para realizar el acondicionamiento de la base de datos del Sistema Nacional Interconectado proyectado al año 2018 que cuenta con modelos de los sistemas de control de las nuevas unidades de generación. En la base de datos se procede a la aplicación de los algoritmos de optimización MVMO y PSO enfocados a la sintonización de los parámetros de los PSS. Se inicia con un análisis del sistema con PSS sin sintonizar

en donde se obtiene información de modos de oscilación cuyo amortiguamiento se encuentre por debajo del límite establecido como problema y los factores de participación de dichos modos, esta información permite determinar qué máquinas requieren que se sintonice sus PSS, una vez obtenidos los valores de los parámetros optimizados se procede a presentar los resultados para cada método de optimización, finalmente se desarrolla una comparación entre MVMO y PSO para analizar que algoritmo obtiene mejores resultados sobre la estabilidad del SNI 2018.

En el capítulo V se presentan conclusiones y recomendaciones del trabajo desarrollado.

CAPÍTULO I

1 INTRODUCCIÓN

Dado el actual crecimiento del sector eléctrico ecuatoriano, se ha producido un notable ingreso de centrales de generación de mediana y gran potencia al Sistema Nacional Interconectado (SNI) lo que conlleva directamente a un incremento de los elementos que lo conforman, aumentando de este modo la complejidad de operación del mismo, implicando la necesidad de efectuar un control de estabilidad más riguroso para asegurar la calidad, confiabilidad y seguridad del sistema. Partiendo de este punto se observa como una necesidad el contar con sistemas de control que brinden garantías a la operación del sistema bajo condiciones de falla, uno de los elementos que contribuye a la mitigación de perturbaciones son los estabilizadores de potencia (PSS), bajo estas premisas el presente estudio se enfoca en la aplicación de metodologías de tipo heurístico que permitan la sintonización de los parámetros de los estabilizadores de potencia con el fin de aumentar el amortiguamiento de los modos oscilatorios del sistema que se presentan ante perturbaciones y de esta manera disminuir las oscilaciones electromecánicas garantizando así la estabilidad del sistema.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GENERAL

Sintonizar los estabilizadores de sistemas de potencia (PSS) de una base validada y proyectada hacia el año 2018 del SNI utilizando el método de mapeo de media-varianza (MVMO) y el método de optimización por enjambre de partículas (PSO) programados en ambiente DIgSILENT Programming Language (DPL), para de esta manera mejorar la estabilidad del sistema aumentando el amortiguamiento de los modos oscilatorios.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estructurar una base de datos del SNI proyectada hacia el futuro (año 2018) en la que se cuente con modelos detallados de las nuevas centrales de generación.
- Validar el funcionamiento de los sistemas de control de las nuevas centrales de generación mediante pruebas de cada modelo de control en el software de simulación.
- Aplicar el algoritmo MVMO en la sintonización de PSS de un sistema de potencia de pruebas y en el SNI proyectado.
- Aplicar un algoritmo de optimización en base a PSO para la sintonización de PSS en sistemas de potencia.
- Sintonizar con los dos métodos heurísticos MVMO y PSO los PSS tanto de un sistema de pruebas, así como del SNI proyectado.
- Realizar pruebas funcionales y operativas que permitan comparar la eficacia de los dos métodos utilizados en la sintonización.

1.2 ALCANCE

Se desarrolla los modelos de los sistemas de control de las nuevas centrales de generación que entrarán en operación en el SNI hasta el año 2018, dichos modelos se obtuvieron de información entregada por agentes del sector eléctrico ecuatoriano e información bibliográfica recopilada.

Los modelos desarrollados son sometidos a la metodología propuesta en la tesis del Ing. Marlon Ullauri [18] para proceder a la validación individual de los mismos y posteriormente habiendo comprobado su correcta funcionalidad se los integra a una base de datos de expansión, sobre la cual se realiza la expansión al año horizonte 2018.

Se valida la base de datos del SNI proyectada hacia el año 2018 mediante pruebas de funcionalidad en estado estable y bajo condiciones de perturbación del sistema.

Como segunda etapa se procede a la aplicación de los algoritmos de optimización heurísticos enfocados a la sintonización de PSS, específicamente el método de

optimización por mapeo de media varianza (MVMO) y el método por enjambre de partículas (PSO), a un sistema de pruebas IEEE 9 barras, para verificar la funcionalidad de los DPL de ambos métodos.

Se procede a la aplicación los algoritmos de optimización MVMO y PSO sobre la base de datos previamente acondicionada (SNI 2018), teniendo en cuenta que el punto de partida de cada uno de los algoritmos es el mismo para obtener resultados y poder compararlos entre sí.

Se realiza una comparación entre los resultados obtenidos para cada uno de los algoritmos aplicados (MVMO y PSO), para poder verificar las ventajas y desventajas que presenta cada uno de estos métodos y formular conclusiones relevantes respecto a la aplicación del uno u otro método en un sistema de potencia como el SNI.

1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

Debido al crecimiento del parque generador del sistema eléctrico ecuatoriano surge la necesidad de contar con una base de datos actualizada que permita analizar el comportamiento del sistema para diferentes condiciones operativas. Esta base de datos permite la implementación y aplicación de herramientas computacionales cuyo objetivo es la realización de estudios especializados en lo concerniente a sintonización de estabilizadores de sistemas de potencia, fin fundamental del presente trabajo. Tanto para la configuración de la base de datos como el desarrollo de las herramientas de software se utiliza el software PowerFactory de DlgSILENT, programa comercial que garantiza resultados fidedignos del cual se disponen licencias de tipo educativas. Adicionalmente se establece como positivo el uso de este software en función de su amplia utilización por parte de las principales instituciones del sector eléctrico del país.

Los métodos de optimización heurísticos brindan la posibilidad de alcanzar soluciones válidas empleando formulaciones matemáticas relativamente menos complejas y un menor detalle en la modelación matemática del sistema de potencia. Estos métodos utilizan la intuición para obtener la respuesta a través de algoritmos

que analizan la evolución de las posibles soluciones para de esta forma acercarse a la optimización de la función objetivo sin aplicar complicados desarrollos matemáticos.

Los métodos PSO y MVMO son algoritmos de optimización de tipo heurístico cuya implementación implica una menor dificultad matemática, esta ventaja se soporta en el hecho de que la aplicación de estos métodos se encuentra orientada a la solución de un problema real cuyo enfoque de solución representaría modelos muy complejos si se utilizarían métodos de optimización clásicos. La aplicación de estos métodos al problema de sintonización de estabilizadores de sistemas de potencia (PSS) permitirá alcanzar posibles soluciones cercanas al óptimo global y en consecuencia recomendar los ajustes que requiere el sistema para reducir los efectos negativos de condiciones inestables ante variaciones de pequeña señal.

CAPÍTULO II

2 MARCO TEÓRICO

2.1 INTRODUCCIÓN

En el marco de la expansión del sistema nacional interconectado ecuatoriano se ha producido la introducción de nuevas centrales así como nuevos elementos que influirán en la estabilidad del sistema, es por ello que se requiere de un análisis para controlar las variables que podrían causar inestabilidad dentro del mismo, en el presente capítulo se abarca el fundamento teórico de los métodos heurísticos de optimización aplicados al mejoramiento de la estabilidad del sistema así como una introducción al tema de estabilidad.

2.2 ESTABILIDAD EN SISTEMAS DE POTENCIA ^{[1], [2], [3]}

La estabilidad de un sistema de potencia es la habilidad, dadas condiciones de operación iniciales, de regresar al punto de operación estable después de haber sufrido una perturbación, en el análisis de estabilidad factores importantes a tener en cuenta y que influyen en la inestabilidad ayudan a crear métodos para la operación estable, por lo cual, es necesario y facilita de gran manera clasificar la estabilidad en diferentes categorías.

La figura (2.1) da una visión general de la clasificación del problema de estabilidad, identificando sus categorías y subcategorías.

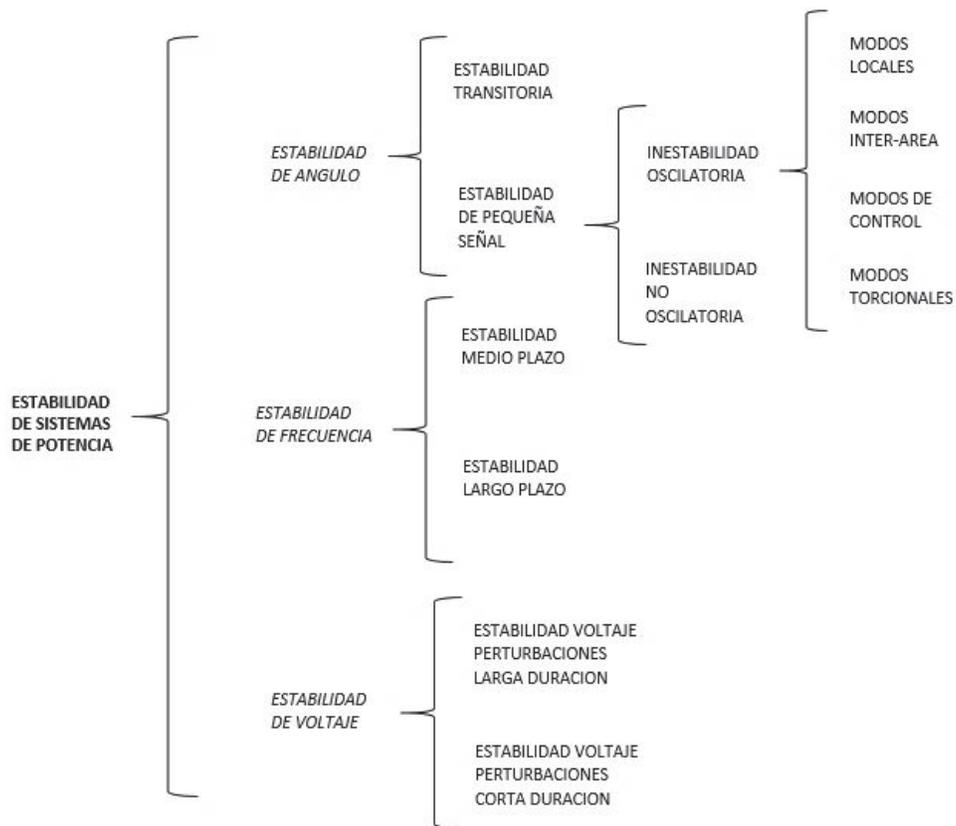


Figura 2.1 Clasificación de la estabilidad de un sistema de potencia [1]

2.2.1 ESTABILIDAD DE ÁNGULO ^{[1], [3]}

Es la habilidad de un sistema interconectado de mantener sus máquinas en sincronismo ante una perturbación. El ángulo del rotor depende de la diferencia entre el par electromagnético el cual es producido por la salida de potencia eléctrica del generador y el par mecánico debido a la potencia mecánica de entrada de la máquina primo motriz. Las máquinas permanecen en sincronismo cuando el par electromagnético y el par mecánico se encuentran en equilibrio.

Cuando ocurre una perturbación el equilibrio se altera produciéndose así una aceleración o desaceleración de la velocidad del rotor del generador. Una pérdida de sincronismo puede ocurrir entre una máquina y el resto de máquinas o entre grupos de máquinas.

2.2.1.1 Estabilidad de Pequeña Señal

El análisis de perturbaciones lo suficientemente pequeñas se realiza aproximando en un punto de operación el sistema no-lineal a un sistema lineal de ecuaciones.

En este caso el estudio de estabilidad es llamado estudio de estabilidad de pequeña señal. Estas pequeñas perturbaciones pueden ser:

- **Pequeños cambios de carga:** al quitar o aumentar pequeños porcentajes de carga al sistema.
- **Pequeños cambios en la generación:** al disminuir o aumentar la generación de potencia eléctrica entregada al sistema.

En el estudio de pequeña señal se pueden diferenciar dos tipos de inestabilidad, estabilidad oscilatoria y estabilidad no oscilatoria.

- **Inestabilidad no oscilatoria:** el ángulo del rotor del generador sigue aumentando por una falta de torque sincronizante ante una pequeña perturbación.
- **Inestabilidad oscilatoria:** el ángulo del rotor oscila y aumenta en magnitud debido a un insuficiente torque de amortiguamiento.

2.2.2 MODELAMIENTO DE UN SISTEMA DE POTENCIA ^{[1], [3],[4],[5]}

El comportamiento dinámico de un sistema de potencia puede ser descrito a través de un sistema de n ecuaciones diferenciales no lineales de primer orden.

$$\dot{x}_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t)$$

Con:

x : Variables de estado

u : Entradas del sistema donde r es el número de entradas

t : Tiempo

(2.1)

Mediante la linealización del sistema de ecuaciones el modelo queda descrito de la siguiente forma:

$$\Delta \dot{x} = Ax + Bu \quad (2.2)$$

$$\Delta y = Cx + Du \quad (2.3)$$

Dónde:

A = Matriz característica del sistema contiene las variables de estado (Matriz de estado)

B = Matriz de las entradas

C =Matriz de las salidas

D = Matriz de avance

x = Variables de estado del sistema

u = Vector de control de las entradas

y = Salida del sistema

2.2.2.1 Análisis Propio

2.2.2.1.1 Valores propios

Los valores propios de la matriz de estado A son aquellos para los cuales no hay soluciones triviales y pueden representar los polos de la función de transferencia. Para un sistema de orden n existen n valores propios ya sean reales o complejos conjugados. Para determinar los autovalores se tiene la siguiente expresión:

$$\det(A - \lambda I) = 0 \quad (2.4)$$

Las n soluciones de $\lambda = \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ son los valores propios de la matriz A .

La estabilidad de un sistema es determinada por los autovalores de la siguiente forma.

2.2.2.1.1.1 Valores propios reales

Un valor propio real corresponde a un modo no oscilatorio, y tiene las siguientes características:

- Un autovalor real negativo (-) representa un decrecimiento del modo
- Un autovalor real positivo (+) representa una inestabilidad aperiódica

2.2.2.1.1.2 Valores propios complejos

Se presentan en pares conjugados, de los cuales cada par corresponde a un modo de oscilación, el valor propio complejo se encuentra compuesto de una parte real y una imaginaria en donde:

$$\lambda_i = \sigma_i \pm j\omega_i \quad (2.5)$$

- La parte real del valor propio (σ_i) es una medida del amortiguamiento del modo.
 - o Un valor (σ_i) negativo corresponde a una oscilación amortiguada.
 - o Un valor (σ_i) positivo corresponde a una oscilación con incremento de amplitud.

- La parte imaginaria del valor propio (ω_i) es una medida de la velocidad angular de la oscilación que el modo tiene.

La frecuencia de oscilación está dada por:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (2.6)$$

La razón de amortiguamiento (ξ) determina la tasa de decaimiento de la amplitud de la oscilación, se determina mediante la siguiente ecuación para cualquier valor propio:

$$\xi_i = \frac{-\sigma_i}{\sqrt{\sigma_i^2 + \omega_i^2}} \quad (2.7)$$

2.2.2.1.2 Vectores propios

Se considera vector propio a cualquier vector $P_i \neq 0$ que satisface la siguiente ecuación:

$$(\lambda_i I - A)P_i = 0 \quad (2.8)$$

Para cada valor propio se tiene un vector propio.

2.2.2.1.2.1 *Vectores propios derechos*

Para cada valor propio λ_i , el vector columna Φ_i que satisface la ecuación (2.9) es llamado vector propio derecho.

$$A\Phi_i = \lambda_i\Phi_i \quad (2.9)$$

El sentido de oscilación en las variables de estado asociadas puede ser determinado por el signo de los elementos del vector propio derecho.

2.2.2.1.2.2 *Vectores propios izquierdos*

Para cada valor propio λ_i , el vector fila Ψ_i que satisface la ecuación (2.10) es llamado vector propio izquierdo.

$$\Psi_i A = \lambda_i \Psi_i \quad (2.10)$$

2.2.2.2 **Modos de Oscilación**

La respuesta de un sistema lineal invariante en el tiempo es la superposición de la respuesta de cada modo del sistema. En sistemas de potencia el término modo abarca un campo amplio en las propiedades del sistema tales como el amortiguamiento y la frecuencia de oscilación. La estructura del sistema, la descomposición propia del sistema en la cual intervienen valores propios, vectores propios y factores de participación son una herramienta empleada para caracterizar los modos del sistema. Los modos de acuerdo al concepto de estabilidad se pueden clasificar en:

- **Modos locales:** Están asociados a la oscilación de una máquina contra el resto del sistema dentro de un área común. Tiene un rango de frecuencia de [0.7 Hz-2 Hz].
- **Modos Interárea:** Están asociados con la oscilación de grupos de máquinas entre sí. Puede ser causado por interconexiones débiles. Tiene un rango de frecuencia de [0.1 Hz- 0.7Hz].

- **Modos de control:** Se producen debido a los controladores de las unidades de generación, tienen un rango variable de frecuencia [baja frecuencia o superior a 4 Hz].
- **Modos torsionales:** Se generan por la interacción existente entre los componentes rotacionales del eje, la turbina y el generador. Tiene un rango de frecuencia de [10 Hz – 46 Hz].

2.2.2.3 Factor de participación

Al momento de utilizar vectores propios para relacionar variables de estado y modos de oscilación, surge un problema dado que los elementos de los vectores propios son dependientes de las unidades y escalamientos asociados con las variables de estado, como solución a este inconveniente se crea la matriz de participación (P). Esta matriz da la medida en la que se asocian variables de estado y modos de oscilación, siendo constituida por la combinación de vectores propios izquierdos y derechos.

$$P_i = \begin{bmatrix} P_{1i} \\ P_{2i} \\ \cdot \\ \cdot \\ P_{ni} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{1i} \Psi_{i1} \\ \Phi_{2i} \Psi_{i2} \\ \cdot \\ \cdot \\ \Phi_{ni} \Psi_{in} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Dónde:

Φ_{ki} = Elemento en la fila k -ésima y la columna i -ésima de la matriz modal Φ

Ψ_{ik} = Elemento en la fila i -ésima y la columna k -ésima de la matriz modal Ψ

El elemento $p_{ki} = \Phi_{ki} \Psi_{ik}$ se lo conoce como factor de participación, es una medida de la participación relativa de la variable de estado k -ésima en el modo i -ésimo y viceversa.

- Φ_{ki} mide la actividad de la variable de estado x_k en el modo i -ésimo
- Ψ_{ik} pesa la contribución de esta actividad en el modo

El producto entre estos dos factores da como resultado la participación total. En sistemas de potencia la matriz de participación permite obtener la información de los elementos del sistema de potencia (máquinas, barras, etc.) que presentan mayor participación en un determinado modo oscilatorio. Mediante los factores de

participación se puede determinar la sensibilidad de un modo para añadir amortiguamiento al mismo.

2.3 ESTABILIZADORES DE SISTEMAS DE POTENCIA (PSS) ^[1]

Los estabilizadores de potencia han sido usados en sistemas de generación para mejorar la estabilidad transitoria del sistema de potencia. Bajas frecuencias de oscilación pueden ocurrir como consecuencia del sistema de excitación, el cual ejerce un retardo de fase en el sistema. El control del estabilizador de sistema de potencia (PSS) proporciona una contribución positiva al amortiguar las oscilaciones del ángulo del rotor del generador añadiendo una componente de torque eléctrico en fase con la desviación de la velocidad.

2.3.1 DIAGRAMA DE CONTROL GENERAL

Como señal de entrada normalmente se usa la desviación de velocidad del sistema. También se han propuesto como entradas del estabilizador de potencia: la frecuencia del sistema, así como una combinación de potencia y velocidad. El diagrama convencional de un estabilizador de potencia se muestra en la figura 2.2.

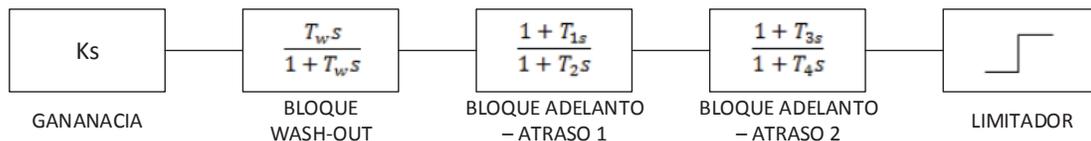


Figura 2.2 Diagrama de bloques PSS clásico [1]

2.3.1.1 Composición del diagrama de bloques convencional

Filtro Washout: Filtra las señales que contienen componentes de frecuencia superiores a 3 Hz, además reduce la sobre-respuesta de amortiguamiento durante un evento severo.

Bloques controladores de adelanto-atraso: Los parámetros de estos bloques tienen que ser sintonizados de tal forma que se compense el retardo de fase ocasionado por el regulador de voltaje, el generador y el sistema de potencia. El

número de bloques de adelanto atraso depende del sistema en particular y de la sintonización de sus parámetros.

Ganancia k_s : Es un factor que interviene en la cantidad de amortiguamiento proporcionado por el PSS, un aumento en la ganancia más allá de cierto valor crítico puede ocasionar una disminución en el amortiguamiento.

Límites del estabilizador: Permite determinar la máxima capacidad del PSS. El límite superior del estabilizador puede estar en un rango relativamente largo de 0.1 a 0.2 p.u., permitiendo un alto nivel de contribución del PSS durante oscilaciones largas. En el lado negativo un límite apropiado está en el rango de -0.05 a -1 p.u. lo cual favorece satisfactoriamente a la respuesta transitoria.

El control PSS puede proporcionar generalmente mejoras significativas en el amortiguamiento y consecuentemente en la estabilidad de los modos local e inter-área. Demostrando así que la inclusión de estabilizadores de potencia es una solución simple, eficaz y económica para el mejoramiento de la estabilidad de los sistemas de potencia.

2.3.2 CONTROL Y SINTONIZACIÓN

Los diferentes requerimientos en la respuesta transitoria y en los modos de oscilación locales e inter-área provocan un conflicto en el control y sintonización de los PSSs. Es por eso que se han desarrollado métodos de sintonización y control como: técnicas en el dominio de la frecuencia y del espacio de estado, compensación por residuo, compensación de fase, lugar geométrico de las raíces, redes de adelanto-atraso del controlador, desensibilización de un controlador robusto, colocación de polos para un controlador tipo PID y demás métodos.

La diversidad de los enfoques puede explicarse por la dificultad de satisfacer los objetivos de diseño contradictorios, y cada método tiene sus propias ventajas y desventajas. Éste es el punto crucial del problema de amortiguación de la oscilación de baja frecuencia para la aplicación de estabilizadores del sistema de potencia.

2.4 MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN ^[6]

A través del tiempo se han ido desarrollando nuevas técnicas de optimización para resolver determinados problemas de una forma más eficiente, en esta sección se describirá en forma general los métodos más relevantes.

2.4.1 MÉTODOS CLÁSICOS ^[12]

Los métodos de optimización clásicos son de tipo determinístico, es decir, se centran en encontrar una solución exacta al problema planteado, este tipo de optimización es muy usada para problemas de una, así como de múltiples variables, la aplicación en problemas de optimización del mundo real es muy reducida.

2.4.1.1 Métodos directos

Estos métodos se enfocan en explotar la naturaleza simple de la función para encontrar un óptimo, no requieren la evolución ni la derivación de la función puesto que solo se necesita conocer el valor objetivo en cualquier punto del espacio. Son métodos que se basan en la interpolación de valores para encontrar una solución óptima, se puede aplicar en problemas de una o varias variables.

2.4.1.2 Métodos de gradiente

Se denomina método de gradiente puesto que utiliza el conocimiento de la derivada matemática para localizar un punto óptimo. La primera derivada matemática proporciona la pendiente de la función la misma que en el punto óptimo se vuelve cero finalizando el proceso. Este método es aplicable para funciones unidimensionales y multidimensionales.

2.4.1.3 Métodos de programación lineal

En este método como su nombre lo indica, la función objetivo y las restricciones que intervienen dentro del proceso de optimización son lineales, generalmente la aplicación práctica de este método es muy limitada, pudiéndose aplicar en problemas de una variable mediante la aplicación de ecuaciones y para más de dos dimensiones se utiliza funciones gráficas para determinar los óptimos, matemáticamente se puede expresar:

$$\begin{aligned} & \text{minimizar } f^T x \\ & \text{sujeto a } Ax \leq b \\ & \quad x \geq 0 \end{aligned}$$

Donde: (2.12)

A y b: Valores conocidos a ser respetados

2.4.1.4 Métodos de puntos interiores

El método de puntos interiores basa su proceso de optimización en moverse dentro del rango de la solución factible que utilizan los métodos de programación lineal, esto produce que los tiempos computacionales sean menores, al igual que el anterior caso su aplicación es muy limitada.

2.4.1.5 Métodos de programación no lineal

En este proceso se busca la optimización de una función objetivo de tipo no lineal, se basa en la solución de sistemas de igualdades y desigualdades bajo restricciones a las que está sujeto el problema para encontrar un óptimo, matemáticamente se puede expresar de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} & \text{maximizar } f(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ & \text{sujeto a } g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq b_1 \\ & \quad \cdot \\ & \quad \cdot \\ & \quad \cdot \\ & \quad g_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq b_m \end{aligned} \tag{2.13}$$

Las restricciones están dadas por g_1 hasta g_m .

2.4.2 MÉTODOS HEURÍSTICOS ^{[6] [12]}

Debido a que la mayoría de problemas de optimización para casos aplicados a sistemas reales presentan un nivel matemático muy alto para su modelamiento y posterior solución, los métodos clásicos no son eficientes para resolver este tipo de problemas dada la complejidad matemática que conlleva, bajo esta premisa se

plantea la solución de estos sistemas con métodos de tipo estocástico como los métodos heurísticos.

Los métodos de optimización de este tipo a diferencia de los clásicos se basan en conceptos encontrados en la naturaleza (bandada de pájaros, colonias de hormigas, etc.), la evolución que han tenido estas técnicas se fundamenta en el crecimiento y evolución de las herramientas computacionales en las últimas décadas, por lo que se los considera relativamente nuevos. Esta forma de optimización pretende alcanzar una solución de alto nivel, es decir, que no se enfoca en encontrar una solución exacta sino más bien una respuesta con un alto grado de certeza.

2.4.2.1 Algoritmos Constructivos

La solución final de este algoritmo está conformada por un conjunto de soluciones parciales encontradas en cada fase del algoritmo, estas fases toman en cuenta lo siguiente:

- Se toma la mejor solución de la fase sin tomar en consideración futuras consecuencias.
- Se espera que escogiendo un óptimo local en cada fase la solución final conforme un óptimo global.

2.4.2.2 Algoritmos de Búsqueda Local

Es un algoritmo iterativo que comienza buscando la mejor solución en un espacio de búsqueda y en cada iteración reemplaza la solución actual por una mejor. El procedimiento depende de dos criterios de selección y de terminación:

- **Estocástico:** Consiste en la elección de forma aleatoria.
- **Hill-Climbing:** Solo se permiten movimientos de la población que mejoren la tendencia actual de soluciones en el espacio de búsqueda.

2.4.3 MÉTODOS META HEURÍSTICOS ^{[12][13]}

Son estrategias que se utilizan para guiar el proceso de indagación consiguiendo explorar el espacio de búsqueda de una manera ordenada, con el fin de encontrar la solución cercana al óptimo. Estos métodos pueden incorporar mecanismos para

evitar que la búsqueda se detenga en un área confinada logrando eficiencia en los procesos de optimización.

2.4.3.1 Métodos de trayectoria

Son aquellos métodos que describen una trayectoria dentro del espacio donde se busca la solución óptima. Se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Búsqueda Tabú
- Búsqueda local iterada
- Búsqueda por variable vecina

2.4.3.2 Métodos basados en población

Son métodos en los cuales el proceso de búsqueda que se realiza se basa en la evolución o la creación de descendencia de las partículas presentes dentro del espacio de búsqueda. Se pueden clasificar en:

2.4.3.2.1 Algoritmos evolutivos

Los algoritmos evolutivos se desarrollan para llegar a soluciones casi óptimas de alta calidad en problemas de optimización en donde se tiene un gran número de variables de decisión y funciones objetivo no lineales. Estos algoritmos imitan la evolución natural biológica o el comportamiento social de las especies tales como la forma en que las hormigas encuentran la ruta más corta hacia su alimento o el caso de las aves que encuentran su ruta correcta durante su migración. Los algoritmos evolutivos se enfocan en la población basada en la variación y selección aleatoria. En la figura (2.3) se presenta el diagrama de flujo que siguen los algoritmos evolutivos.

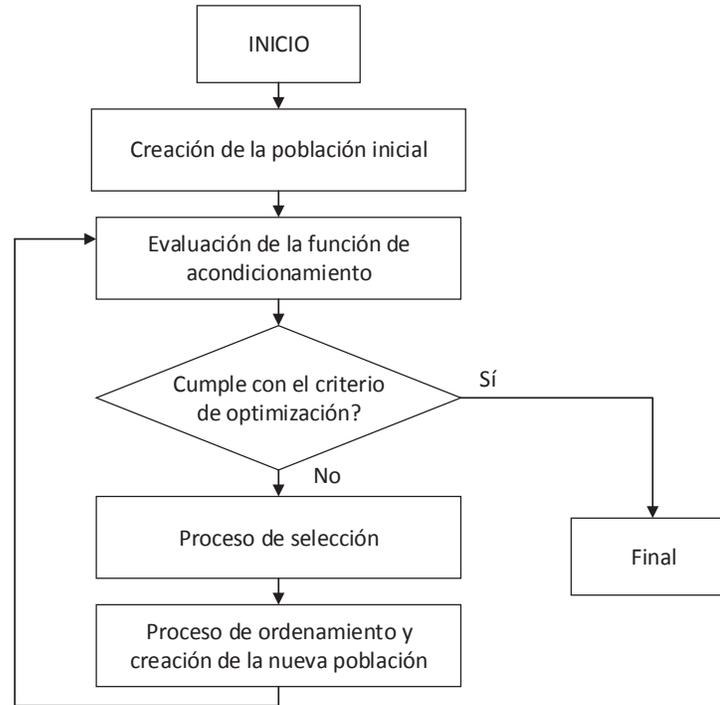


Figura 2.3 Diagrama de flujo de algoritmos evolutivos [12]

2.4.3.2.2 Algoritmos genéticos

Los algoritmos genéticos se sustentan en el mejoramiento de las partículas a través de la evolución, la solución de los problemas de optimización se da en forma de cadena denominada cromosoma, que consiste en un conjunto de elementos llamados genes que contienen un conjunto de valores de variables de optimización. En inicio el algoritmo trabaja con una población aleatoria de soluciones y la aptitud de cada cromosoma se determina al evaluarlo en la función objetivo. Para simular la supervivencia genética natural del más apto los cromosomas intercambian información (proceso de cruce) generando un cromosoma descendiente, posteriormente se procede a la selección de los cromosomas más aptos sobre los cuales se realiza una mutación cambiando pocos genes para crear un nuevo individuo. Los individuos generados son evaluados y utilizados para evolucionar a la población en el caso de que proporcionen mejores soluciones. Este proceso se repite durante varias generaciones para obtener una solución óptima.

La ventaja de los métodos heurísticos y meta heurísticos sobre los clásicos se basa en varias razones de peso como se presenta a continuación.

Tabla 2.1 Comparación de entre métodos de optimización

COMPARACIÓN MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN

Propiedad	Método de optimización	
	Clásico	Heurístico y Meta Heurístico
Solución a problemas multi-objetivo	No	Sí
Solución determinística	Sí	En ocasiones
Solución a problemas de alta complejidad matemática	No	Sí
Soluciones de alta calidad	Sí	Sí / en menor rango
Eficiencia Computacional	No	Sí
Aplicaciones de problemas de ingeniería reales	Muy limitado	Sí

Dado la complejidad de los sistemas eléctricos actuales, los problemas enfocados a optimización se los debe resolver vía métodos heurísticos teniendo a favor las herramientas computacionales que se pueden utilizar y la garantía que los resultados a obtener son de alta calidad.

2.5 OPTIMIZACIÓN POR ENJAMBRE DE PARTÍCULAS (PSO) [7],

[8]

2.5.1 INTRODUCCIÓN

La optimización por enjambre de partículas (PSO) es un método de optimización heurístico de tipo evolutivo basado en población, desarrollado por Eberhart y Kennedy en 1995 [7], se inspira en el comportamiento de las aves durante su vuelo de migración, usa un simple mecanismo de guía de partículas para buscar una solución cuasi óptima de alta calidad. Cada individuo del enjambre de partículas sigue un comportamiento para emular el éxito de las partículas vecinas y su propio éxito, es decir, se basa en las experiencias propias de cada individuo y de las experiencias de los de su alrededor, con esta información cada agente toma decisiones en cuanto a su ubicación dentro del enjambre para buscar la mejor posición posible.

2.5.2 ENFOQUES DEL PSO

Este método fue creado en base a la observación del vuelo de una bandada de pájaros que busca el mejor camino posible y optimiza el tiempo, minimiza la distancia e incluso preserva la energía. Durante el vuelo de las bandadas de pájaros, las partículas en el enjambre vuelan a través de un espacio de búsqueda multidimensional para posicionarse en la mejor ubicación que pueda encontrar.

En el proceso para encontrar la mejor posición, cada partícula del enjambre toma en cuenta no solo el comportamiento previo y la posición actual sino también las posiciones de las partículas vecinas para encontrar la posición general óptima. El óptimo es, por lo tanto, el mínimo o máximo global del espacio de búsqueda, la precisión es medida por una función de aptitud predefinida, basada en las restricciones y en la función objetivo del problema.

La partícula es caracterizada por un vector de dimensión D que representa la posición de la partícula en el espacio de búsqueda. Este vector posición puede representar una potencial solución al problema de optimización, en cada proceso evolutivo las partículas viajan por el espacio de solución a una cierta velocidad, cada partícula en su posición actual es asociada un valor de aptitud evaluado en la función objetivo, la partícula memoriza su mejor posición individual durante el proceso evolutivo y el enjambre memoriza la mejor posición individual del grupo. A medida que transcurre cada iteración la posición de cada partícula se actualiza añadiendo una velocidad diferente, la cual tiene relación con la velocidad anterior, su distancia respecto a la partícula mejor posicionada del enjambre en ese momento y la distancia respecto a su mejor posición individual.

2.5.3 FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL ALGORITMO [7], [8], [14]

Considerando un enjambre de s partículas en un espacio dimensional D asignado para minimizar o maximizar una función $f(X)$. Una partícula i se encuentra definida por su posición actual (X_i), una velocidad (V_i) y una mejor posición individual (X_{pi}) como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned}
X_i^T &= [x_{i1}, x_{i2}, \dots \dots \dots, x_{iD}] \\
V_i^T &= [v_{i1}, v_{i2}, \dots \dots \dots, v_{iD}] \\
X_{pi}^T &= [x_{pi1}, x_{pi2}, \dots \dots \dots, x_{piD}]
\end{aligned} \tag{2.14}$$

La mejor posición global en el enjambre se lo denomina (X_g).

El cambio en la velocidad de la partícula se basa en el historial de la propia partícula y del líder de la población en ese momento y se la calcula con la fórmula mostrada a continuación para cada iteración t :

$$V_i(t + 1) = wX_i(t) + c_1r_1(X_p(t) - X_i(t)) + c_2r_2(X_g(t) - X_i(t)) \tag{2.15}$$

Como se muestra en la ecuación (2.16) para cada iteración t , la posición de la partícula X_i , es alterada añadiendo la velocidad $V_i(t)$

$$X_i(t + 1) = X_i(t) + V_i(t + 1) \tag{2.16}$$

Donde:

$V_i(t)$ =Velocidad de la partícula i en la dimensión D.

$X_i(t)$ = Posición de la partícula i en la dimensión D iteración t .

w = Peso de inercia que regula la capacidad de exploración global y local de las partículas.

c_1, c_2 =Coeficientes de aceleración usadas para el control de la influencia de la memoria global y local en la velocidad de la partícula.

r_1, r_2 = Valores aleatorios en el rango de $[0,1]$ que permiten introducir características estocásticas al algoritmo.

La mejor posición global del enjambre queda definida de la siguiente manera:

$$X_g \in \{X_{p0}, X_{p1}, \dots \dots \dots, X_{ps}\} \text{ tal que:} \tag{2.17}$$

$$f(X_g) = \min(f(X_{p0}), f(X_{p1}), \dots, \dots, f(X_{ps}))$$

El proceso de actualización de la velocidad y posición de las partículas del enjambre se detalla en el siguiente gráfico:

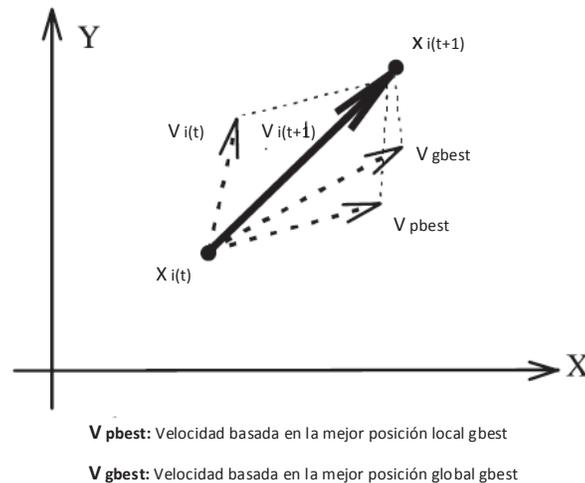


Figura 2.4 Proceso de actualización de posición y velocidad de las partículas del enjambre [14]

2.5.3.1 Configuraciones del algoritmo

Como en la mayoría de los algoritmos evolutivos de optimización, el rendimiento del PSO se ve directamente influenciado por algunas configuraciones de parámetros y topologías, estas condiciones afectan de gran manera al problema de optimización y a la convergencia del mismo.

2.5.3.1.1 Tamaño de la población

Eberhart y Kennedy analizaron que el PSO requiere un menor tamaño de población en comparación con otros algoritmos evolutivos. En problemas multidimensionales extensos se requiere una población grande para que la búsqueda entregue resultados óptimos, mientras que en problemas menos extensos una población demasiado grande ocupará mayor capacidad computacional sin que esto garantice la obtención de mejores resultados que utilizar una población reducida. En este sentido la determinación del tamaño de la población se debe realizar de acuerdo al problema sobre el cual se enfoca la optimización.

2.5.3.1.2 Velocidad máxima

Este parámetro limita la máxima capacidad de exploración de las partículas. Un valor muy elevado de velocidad máxima ocasiona que explote todo el espacio de búsqueda generando que se explore zonas en donde la solución no sea óptima. Por el contrario, si se elige un valor de velocidad máxima muy pequeño se tiende a reducir el espacio de búsqueda haciendo que la convergencia se dé de forma prematura hacia un mínimo local.

2.5.3.1.3 Coeficientes de aceleración

Los coeficientes de aceleración c_1, c_2 controlan cuán rápido se mueve la partícula hacia su mejor posición local y global en cada iteración.

2.5.3.1.4 Peso de inercia

Dado los problemas ocasionados por la velocidad máxima del algoritmo, se define el peso de inercia que permite controlar este problema. Este parámetro permite tener un buen balance entre la exploración local y global de las partículas, generalmente su valor se encuentra entre 0.4 a 0.9, el peso de inercia se lo calcula mediante la siguiente formula:

$$w = (w_{max} - w_{min}) \frac{(iter_{max} - iter)}{iter_{max}} + w_{min} \quad (2.18)$$

Donde:

$iter_{max}$: Máximo número de iteraciones.

$iter$: Iteración actual.

w : Peso de inercia.

Cada partícula individual del enjambre se compone de tres vectores:

- El vector x , el cual registra la posición actual de la partícula en el espacio de búsqueda.
- El vector p , registra la localización de la mejor solución encontrada hasta ese momento por la partícula.
- El vector v , contiene la dirección en la cual la partícula viajará en el espacio de búsqueda.

2.5.3.2 Algoritmo PSO

Paso 1: *Generar el enjambre inicial (Población Inicial)*

Se inicializa una población aleatoria de partículas, cada dimensión del vector de posición X_i es generada mediante una distribución aleatoria en el intervalo $[x_{min}, x_{max}]$. Cada coordenada del vector velocidad V_i es inicializada de manera similar en el intervalo $[v_{min}, v_{max}]$ donde los límites se calculan de la siguiente manera, teniendo que $0.1 \leq k \leq 1.0$.

$$\begin{aligned} v_{max} &= k * x_{max} \\ v_{min} &= x_{min} \end{aligned} \tag{2.19}$$

La mejor posición individual X_{pi} es replicada por el vector de posición inicial X_i .

Paso 2: *Función de aptitud*

En este paso se evalúa cada partícula en la función objetivo $f(X_i)$, para determinar su aptitud.

Paso 3: *Determinación mejor posición individual y global*

En cada iteración de ser necesario se actualiza el valor de la mejor posición local X_{pi} como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} X_{pi} &= X_{pi} \quad \text{si} \quad f(X_i) \geq f(X_{pi}) \\ X_{pi} &= x_i \quad \text{si} \quad f(x_i) \leq f(x_{pi}) \end{aligned} \tag{2.20}$$

La mejor posición global X_{gi} se estima como se indica en la ecuación (2.17)

Paso 4: Actualización de las velocidades y posiciones de cada partícula

Actualizar las posiciones y velocidades de las partículas acorde con las ecuaciones (2.15) y (2.16), respectivamente.

Paso 5 Finalización del algoritmo

Mientras el criterio de finalización no se cumple el algoritmo repite los pasos 2, 3 y 4. La condición de finalización del algoritmo usualmente es el máximo número de evaluaciones de la función objetivo, máximo número de iteraciones o un valor de tolerancia que permita la función objetivo.

2.5.3.2.1 Diagrama de flujo algoritmo PSO

A continuación, se presenta el diagrama de flujo del algoritmo PSO para una mejor comprensión del mismo:

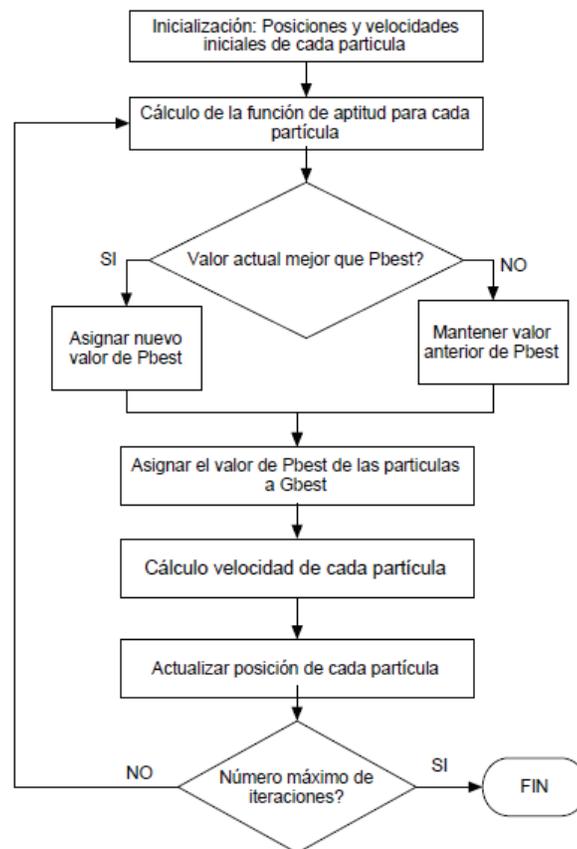


Figura 2.5 Diagrama de flujo algoritmo PSO [7]

2.5.3.2.2 Comportamiento del enjambre

Se presenta en la gráfica el ejemplo de comportamiento que tienen las partículas del enjambre durante el proceso de búsqueda de la solución óptima al problema. Se observa que el objetivo es minimizar el error de una función, las partículas del enjambre se mueven orientadas hacia el valor de cero que en este caso es el óptimo mínimo del objetivo.

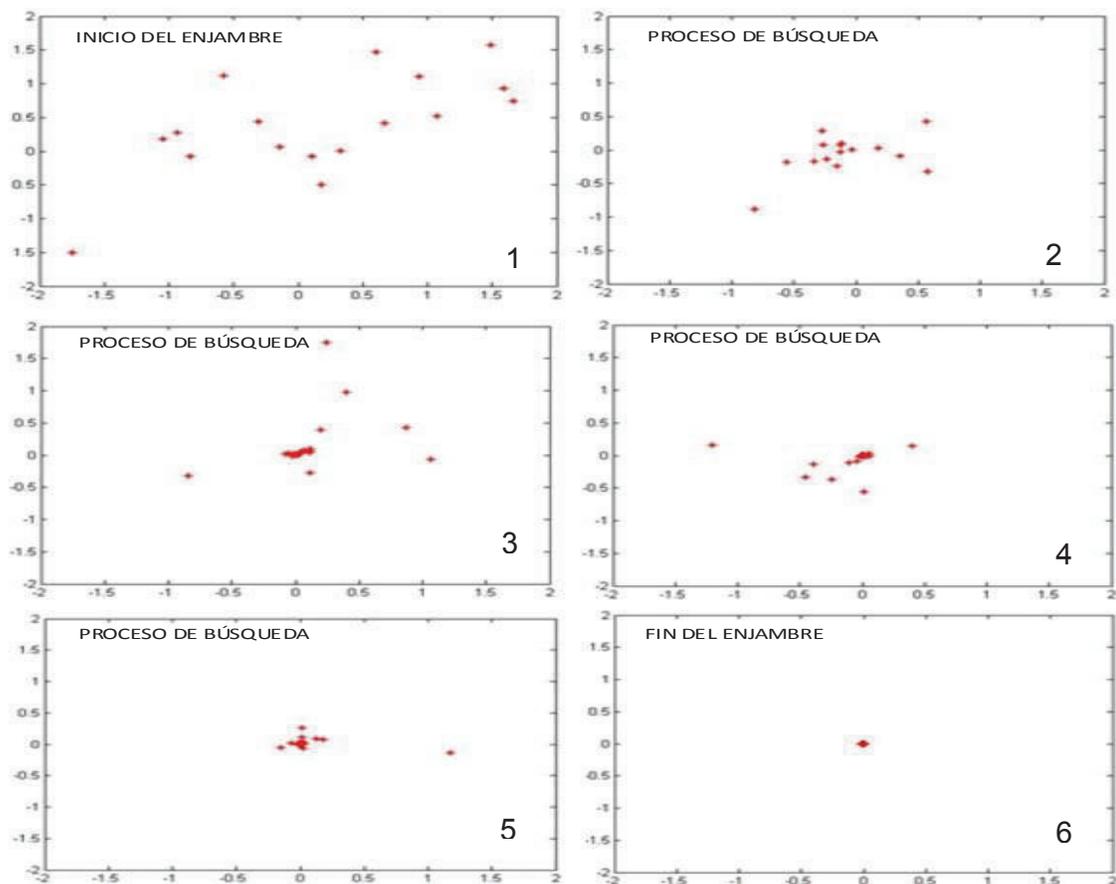


Figura 2.6 Simulación comportamiento de las partículas PSO en MATLAB

2.6 | OPTIMIZACIÓN POR MAPEO DE MEDIA VARIANZA MVMO [9], [10], [11]

2.6.1 | INTRODUCCIÓN [9]

La optimización por mapeo de media varianza (MVMO) es un algoritmo de tipo heurístico recientemente introducido para resolver problemas de una forma más eficiente llegando a soluciones lo suficientemente aceptables en un marco de tiempo razonable. La diferencia con los demás métodos de optimización evolutivos es que opera en una sola solución, es decir, se asigna solamente un padre para sacar una descendencia, permitiendo que la función objetivo sea evaluada solo una vez por iteración.

La optimización por mapeo de media varianza se desarrolla en un espacio de búsqueda restringido con límites $[0, 1]$. Por lo que los límites reales $[\text{máx}, \text{mín}]$ tienen que ser normalizados a $[0, 1]$. Para mejorar las soluciones en cada iteración es decir encontrar la descendencia adecuada, una función de mapeo, es desarrollada y las entradas de esta función son la media y la varianza de las mejores soluciones almacenadas hasta el momento. Las soluciones se almacenan en un archivo en orden descendente y son actualizadas si es que en la iteración actual la solución es mejor que la anterior. La capacidad del algoritmo MVMO de buscar la solución con intensificación y diversificación, buscando alrededor de la mejor solución encontrada hasta ese momento, con una pequeña posibilidad de quedar atrapado en óptimos locales, es su mejor característica.

Las cualidades de este algoritmo se las indica a continuación:

- Las variables de optimización son normalizadas dentro del rango de $[0, 1]$ y luego des-normalizadas para su evaluación dentro de la función objetivo con todas sus restricciones, el algoritmo siempre entrega nuevas variables de optimización dentro del rango $[0, 1]$.
- Determinación de una solución padre de la cual una nueva solución (hijo) es generada, la selección del padre se la hace desde el archivo solución el cual contiene las mejores soluciones encontradas hasta ese momento y actualizadas dinámicamente además se rige a un orden descendente de aptitud.

- Mutación de m dimensiones seleccionadas de la solución padre a través de la llamada función de mapeo.

2.6.2 FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL ALGORITMO ^[9]

2.6.2.1 Inicialización

Dentro de esta sección se debe especificar parámetros básicos para la correcta ejecución del algoritmo, en la tabla (2.2) se presentan valores referenciales para dichos parámetros. Adicionalmente la solución candidata inicial se genera de forma aleatoria entre los límites de las variables normalizadas, matemáticamente se tiene:

$$x_i^{ini} = x_i^{min} + rand(x_i^{max} - x_i^{min}), \quad i = 1 \dots D \quad (2.21)$$

De forma alternativa, los valores iniciales de las variables de decisión pueden ser especificadas de antemano y posteriormente cada variable de decisión x_i es normalizada a [0, 1].

Tabla 2.2 Parámetros utilizados en el algoritmo MVMO

NOMBRE	SÍMBOLO	VALOR
Tamaño de archivo	A	[2,5]
Factor de escalamiento	f	[0.9,10]
Factor de asimetría	AF	[1,10]
-----	sd	[10,75]
-----	kd	0.0505/D+1
D: Número de las variables de decisión		

2.6.2.2 Evaluación de aptitud de soluciones

Las variables de decisión son denormalizadas a sus límites originales [min, máx], de esta manera se las procede a evaluar dentro del modelo matemático de optimización, este proceso entrega como resultado el valor de la función objetivo y las restricciones en caso de existir. Si fuese el caso de que no existan restricciones en el problema de optimización, la función f^* corresponde al valor de la función objetivo incorporado a la solución candidata que es evaluada. La función f^* es aproximada con la siguiente expresión, la cual constituye un enfoque estático:

$$f^*(x) = f(x) + \sum_{i=1}^{N_{ic}} \gamma_i * \max\{0, g_i(x)\} + \sum_{j=1}^{N_{ec}} \vartheta_j * \max\{0, |h_j(x)| - \varepsilon\} \quad (2.22)$$

Donde:

x = vector solución

$f(x)$ = función objetivo

$g_i(x)$ = i -ésima restricción de desigualdad

$h_j(x)$ = j -ésima restricción de igualdad

ε = valor de tolerancia.

γ_i y ϑ_j = coeficientes de penalización.

N_{ic} y N_{ec} = muestran el número de restricciones.

2.6.2.3 Criterio de terminación

El criterio de terminación del algoritmo MVMO generalmente viene dado por el alcance de un número máximo de evaluaciones de la aptitud de las soluciones, o se lo puede finalizar en el caso de que en el transcurso de las iteraciones no se ve una mejoría en la evaluación de la aptitud de las soluciones.

2.6.2.4 Archivo solución

El archivo solución provee información crucial para guiar la dirección de la búsqueda y utiliza una memoria adaptiva, creando un archivo dinámico que se actualiza con las mejores soluciones encontradas hasta la iteración actual. El tamaño del archivo es fijo y definido por el usuario de antemano para todo el proceso, se sugiere que para problemas de sistemas de potencia tenga un tamaño de archivo A con valor entre $[2, 5]$. El archivo solución se llena en forma descendente de acuerdo a la aptitud de los valores. Una vez que el archivo está lleno, se realiza una actualización del mismo solo si la aptitud de alguna nueva solución generada es mejor que las ya almacenadas.

2.6.2.5 Cálculo de la media y la varianza

La media y la forma de las variables son calculadas después de cada actualización del archivo para cada variable de optimización x_i usando la siguiente expresión:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_i(j) \quad (2.23)$$

$$s_i = -\ln(v_i) \cdot fs \quad (2.24)$$

Donde la varianza v_i es calculada mediante:

$$v_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n [x_i(j) - \bar{x}_i]^2 \quad (2.25)$$

Al principio \bar{x}_i corresponde con el valor inicializado de x_i y la varianza v_i es definida en 1. La variable de forma s_i es una entrada de la función de mapeo con un alto grado de influencia en su forma geométrica, bajo esta condición es necesaria la inclusión de un factor de escalamiento fs que permite tener control sobre la forma de la función de mapeo y el proceso de búsqueda.

2.6.2.6 Selección de padre, cruce y mutación

El vector mejor posicionado del archivo de soluciones se procede a elegir como padre x^{parent} para proceder la creación del vector de solución secundaria $x^{child} = [x_1, x_2, \dots, x_D]$, que es creado a partir de una combinación del subconjunto de dimensión $D - m$ heredado directamente del vector padre y m dimensiones seleccionadas del proceso de mutación que se da a través del mapeo de la función basado en los valores actuales de la media \bar{x}_i y forma s_i . Las m variables que se seleccionan para ser mutadas dependen de una selección de estrategia tal como se muestra en la figura (2.7). El nuevo valor de cada dimensión seleccionada x_i se determina mediante:

$$x_i = h_x + (1 - h_1 + h_0) \cdot x_i^* - h_0 \quad (2.26)$$

Donde x_i^* es la variable modificada al azar con una distribución entre $[0,1]$ y h hace referencia a la función de mapeo la cual se define como:

$$h(\bar{x}_i, s_1, s_2, x) = \bar{x}_i \cdot (1 - e^{-xs_{i1}}) + (1 - \bar{x}_i) \cdot e^{-(1-x)s_{i2}} \quad (2.27)$$

Donde h_x , h_1 y h_0 son salidas de la función de mapeo, las cuales son determinadas por:

$$h_x = h(x = x_i^*) \quad h_0 = h(x = 0), \quad h_1 = h(x = 1) \quad (2.28)$$

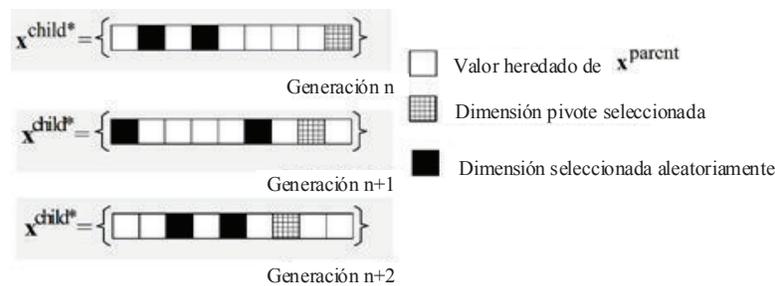


Figura 2.7 Estrategia de selección secuencial aleatoria [9]

La figura (2.7) explica la estrategia del proceso de mutación y cruce, en primera instancia para la generación n los cuadros en color blanco son valores directamente heredados del padre que es la actual mejor solución del archivo, los recuadros negros representan los valores seleccionados para el proceso de cruce y mutación que obedece a una estrategia de selección aleatoria en este caso se tiene un pivote que permite dar la referencia a la selección, consecuentemente para la siguiente generación se procede de igual manera, cada vector hijo x^{child} se llena con la estrategia seleccionada para posteriormente evaluar su aptitud, en caso de que refleje una mejor solución que el padre se procede a reordenar el archivo solución colocándolas en el rango desde la mejor.

La forma de la función h_x es determinada por la media \bar{x}_i y las variables forma s_1 y s_2 el efecto de estos parámetros en la función de mapeo de ilustra en la figura (2.8), al ir cambiando los parámetros indicados la función de mapeo cambia y la búsqueda de mejores soluciones se da alrededor de ésta.

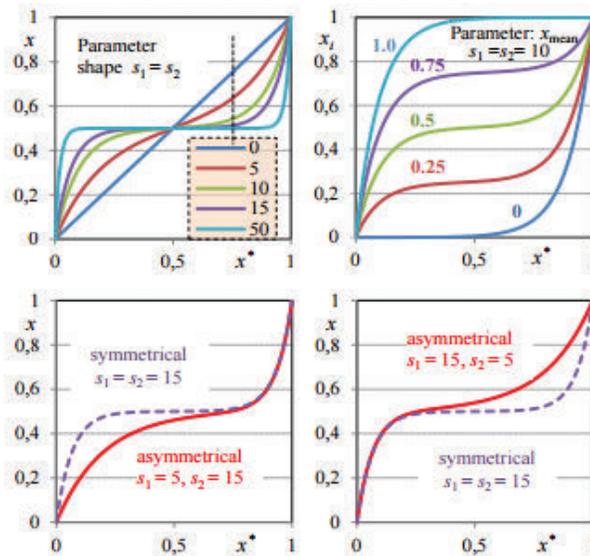


Figura 2.8 Función de mapeo. [13]

La propiedad del algoritmo MVMO es la habilidad de llevar a cabo una búsqueda global, enfocándose su búsqueda alrededor de la mejor solución. A continuación, se muestra en la figura (2.9) el proceso para dos variables:

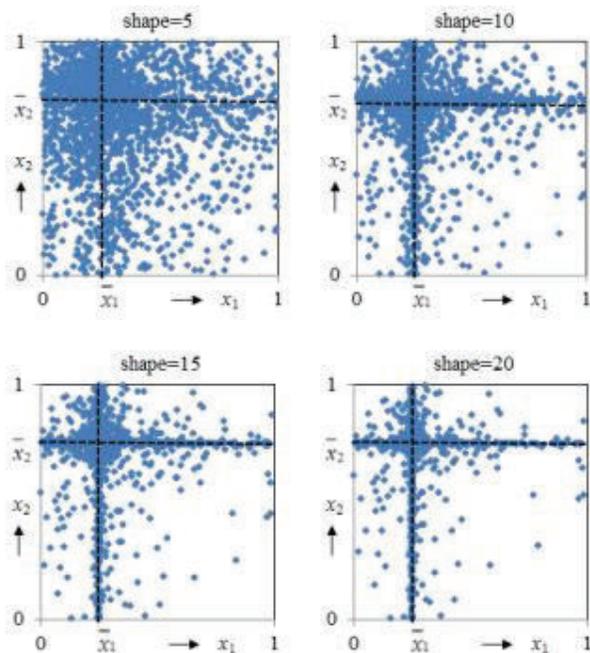


Figura 2.9 Espacio de búsqueda dependiendo del factor de forma para dos variables, $\bar{x}_1 = 0.25$ y $\bar{x}_2 = 0.75$, $s_1 = s_2$ para ambas variables. [13]

Mientras la forma de la función se ajusta a un rango específico de la media y la forma de la misma, se observa que la búsqueda se orienta en referencia a dichos factores. Para un valor de forma bajo ($\text{shape}=5$) la búsqueda de partículas se dispersa de la media de la función haciendo que el espacio de búsqueda sea mayor y se encuentren nuevas soluciones, mientras el valor de la forma se incrementa ($\text{shape}=20$) se observa que la búsqueda se centra en los valores de la media haciendo que el espacio de búsqueda se estanque alrededor de dichos valores y no se explore más posibilidades, la forma debe establecerse en un rango medio ni muy bajo ni muy alto para garantizar una buena búsqueda de soluciones.

Para asignar correctamente los valores de los parámetros forma se utiliza la siguiente estrategia de tal forma de explotar la asimetría de la función de mapeo para un mejor balance entre la exploración y la explotación:

$$\begin{aligned}
 & \text{si } x_i^{best} < \bar{x}_i \\
 & \text{entonces } s_{i1} = s_i ; \quad s_{i2} = s_i \cdot AF \\
 & \text{si } x_i^{best} > \bar{x}_i \\
 & \text{entonces } s_{i2} = s_i ; \quad s_{i1} = s_i \cdot AF
 \end{aligned}
 \tag{2.29}$$

Mientras la optimización procede y si la dimensión m que representa el número de partículas seleccionadas para el proceso de cruce y mutación se establece en un valor pequeño respecto a D que representa el tamaño total del vector de soluciones, se puede producir un estancamiento del proceso, ya que los individuos almacenados no difieren con respecto a las variables de optimización, lo que se traduce en una varianza cero, implicando que los parámetros de forma de la función son elevados, haciendo que la curva de mapeo tienda a reducir el espacio de búsqueda ocasionando que la optimización no avance. Para evitar el estancamiento se considera que el último valor de v_i no nulo se utiliza para el cálculo del factor s_i :

$$\begin{aligned}
 s_{i1} &= s_{i2} = s_i \\
 \text{si } & s_i < s_d \\
 s_d &= s_d \cdot k_d \quad ; \quad s_{i1} = s_d \\
 \text{si } & s_i > s_d \\
 \frac{s_d = s_d}{k_d} & ; \quad s_{i1} = s_d
 \end{aligned}
 \tag{2.30}$$

Es importante destacar que los valores \bar{x}_i, v_i, s_{i1} y s_{i2} se calculan después de que el archivo de soluciones se haya llenado parcial o totalmente, en inicio el mapeo se da con los factores $s_{i1} = s_{i2} = 0$ que corresponde a una línea recta en donde la varianza y media no afectan a la función, a medida que existan más soluciones la función se irá ajustando y orientando a las soluciones con mejor calidad.

2.6.2.7 Diagrama de flujo del MVMO

En la figura 2.10 se presenta el diagrama de ejecución del algoritmo MVMO.

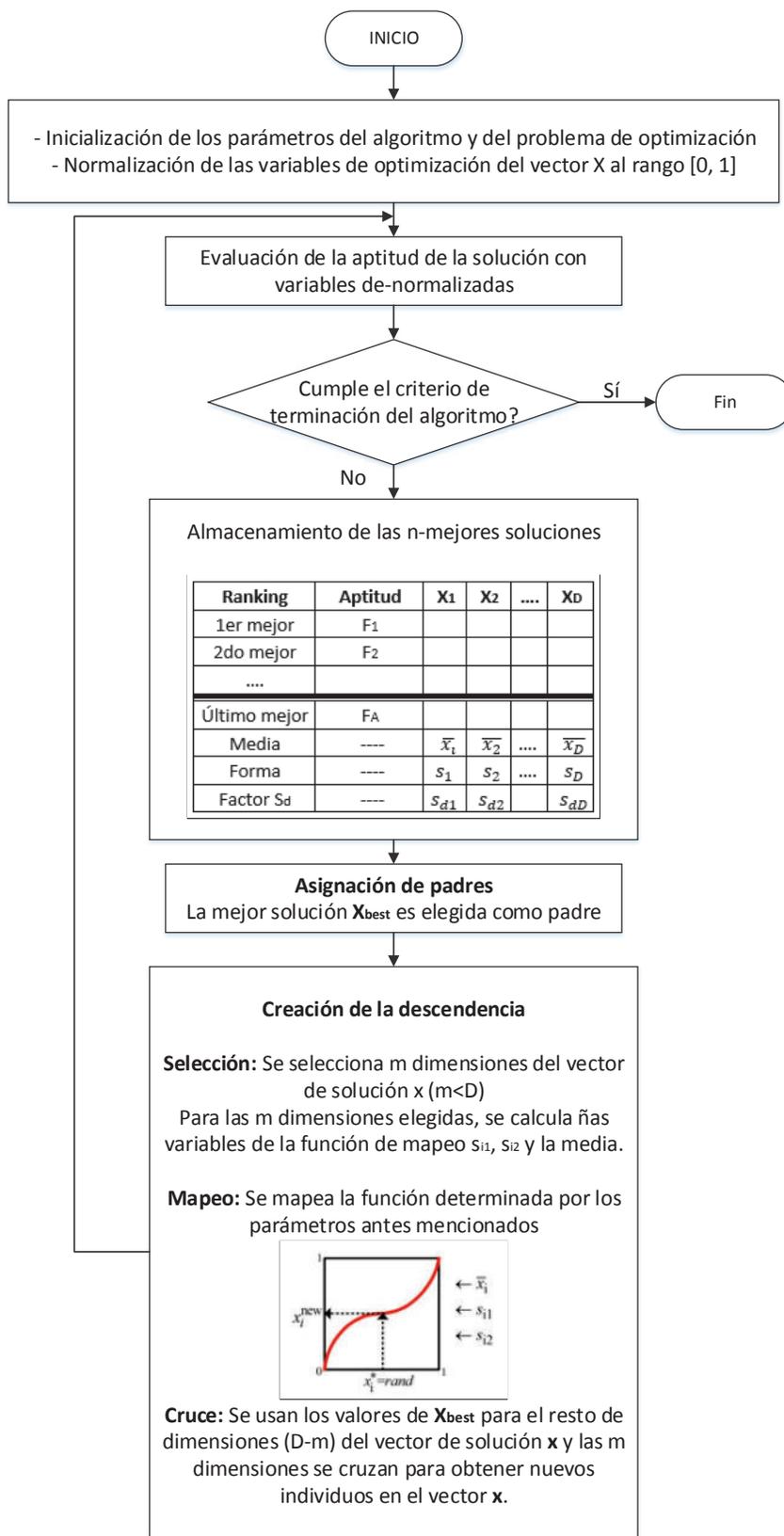


Figura 2.10 Diagrama de flujo del algoritmo MVMO [9]

CAPÍTULO III

3 APLICACIÓN PRÁCTICA DE ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN MVMO Y PSO EN UN SISTEMA DE PRUEBA

3.1 INTRODUCCIÓN

Dentro de esta sección se procederá a realizar la aplicación de los algoritmos desarrollados para la optimización de PSS enfocados al sistema de pruebas de nueve barras, el mismo que cuenta con tres generadores en donde se han modelado los sistemas de control respectivos incluidos el del estabilizador de potencia (PSS) que permitirá realizar una explicación de la metodología de aplicación tanto del algoritmo de optimización por mapeo de media varianza (MVMO) así como del de optimización por enjambre de partículas (PSO). Adicionalmente se realizará una comparación entre los resultados obtenidos para cada algoritmo de optimización tanto en pruebas de pequeña señal, así como en análisis de transitorios electromecánicos (RMS) dentro del sistema.

3.2 SISTEMA DE PRUEBA

El sistema de pruebas de nueve barras se encuentra incluido dentro de los ejemplos de la librería de PowerFactory 15.1.7, este sistema ha sido seleccionado para la explicación de la metodología de aplicación y funcionamiento de los algoritmos de optimización ya que cuenta con un reducido número de generadores lo que permite que los resultados que se obtienen sean más fáciles de comparar para cada uno de los métodos de optimización aplicados.

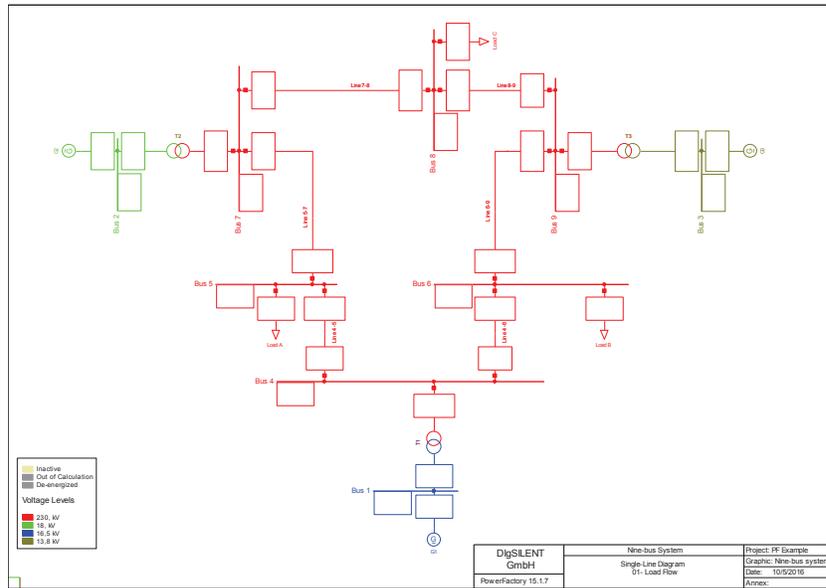


Figura 3.1 Diagrama Sistema de 9 Barras

3.2.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE PRUEBA

El sistema de pruebas se encuentra conformado por tres generadores de tipo hidráulico en donde se han incluidos los modelos de sistemas de control para máquinas de tipo hidráulico (Regulador de Velocidad (PCU), Regulador de Voltaje (AVR) y Estabilizador de Sistemas de Potencia (PSS)), en donde éste último es el elemento de control sobre el cual se enfocará la aplicación de los algoritmos de optimización.

3.2.1.1 Generadores

El sistema de prueba como se indicó anteriormente cuenta con tres máquinas de tipo sincrónico, cada una de las máquinas cuenta con sus parámetros eléctricos, los mismos que se detallan a continuación.

Tabla 3.1 Parámetros Generadores Sistema de Pruebas

Parámetro	Unidad	Valor		
		G1	G2	G3
Potencia nominal	[MVA]	247,5	192	128
Voltaje nominal	[kV]	16,5	18	13,8
Factor de potencia nominal	[--]	1	0,85	0,85
Frecuencia Nominal	[Hz]	60	60	60
Reactancia de eje directo x_d	[p.u.]	0,36135	1,719936	1,68
Reactancia transitoria de eje directo x_d'	[p.u.]	0,15048	0,230016	0,232064
Reactancia de eje en cuadratura x_q	[p.u.]	0,239828	1,65984	1,609984
Constante de tiempo transitoria de eje directo T_{d0}'	[s]	8,96	6	5,89
Resistencia de armadura	[p.u.]	0	0,005	0
Constante de Inercia H	[s]	9,551516	3,921568	2,766544
Amortiguamiento D	[p.u.]	0	0	0

3.2.1.2 Estabilizadores de Sistemas de Potencia (PSS)

Dentro del sistema de prueba se ha procedido a modelar un estabilizador de potencia básico ya que de esta manera se facilita la explicación de la metodología de calibración de los parámetros del mismo, a continuación, se presenta el modelo utilizado para las máquinas del sistema de pruebas.

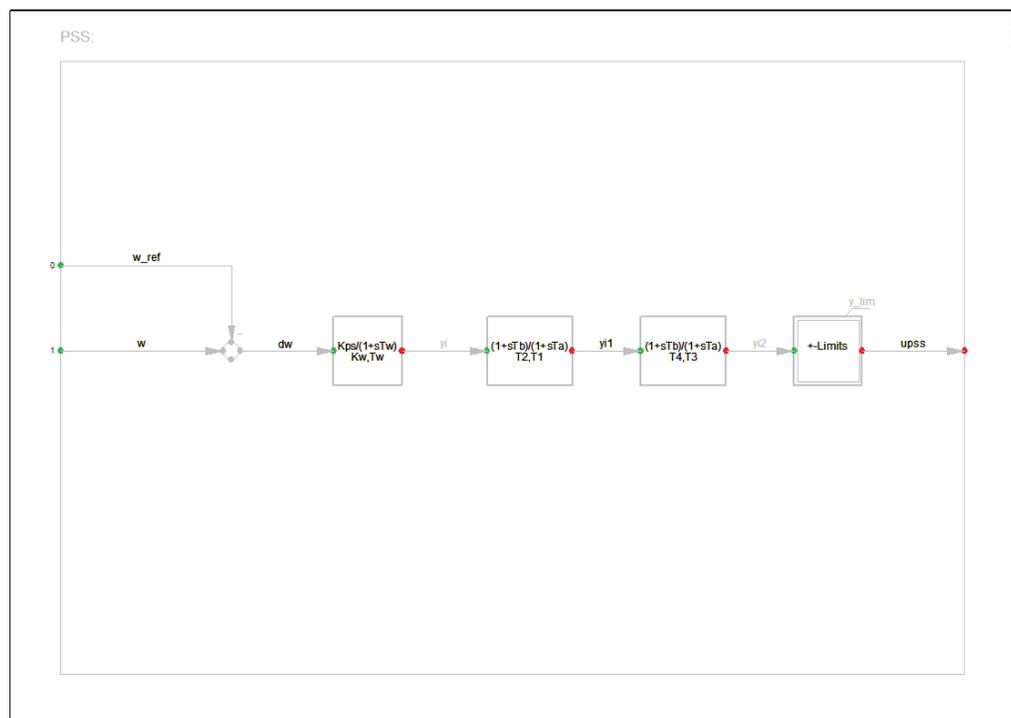


Figura 3.2 Diagrama de bloques del modelo del PSS implementado en centrales del sistema de pruebas

La imagen muestra el modelo de PSS que se utiliza dentro de los sistemas de control de cada uno de los generadores de la red, en este caso se seleccionó un modelo simplificado para que de esta forma se facilite la comprensión del proceso de optimización de los algoritmos utilizados. De esta manera el PSS modelado cuenta de forma general con un bloque de ganancia, dos bloques de adelanto – atraso y un bloque limitador de la señal de salida del mismo, la explicación detallada de cada uno de los bloques se encuentra dentro de la sección 2.3.1 del presente documento. Para la aplicación desarrollada, las variables de interés del estabilizador de potencia son las siguientes.

Tabla 3.2 Parámetros PSSs

Parámetro	Descripción	Unidad
Kw	Ganancia del PSS	[p.u.]
Tw	Constante de Tiempo de Filtro Washout	[s]
T1	1era Constante de tiempo derivativa adelanto - atraso	[s]
T2	1era Constante de tiempo de retardo adelanto - atraso	[s]
T3	2da Constante de tiempo derivativa adelanto - atraso	[s]
T4	2da Constante de tiempo de retardo adelanto - atraso	[s]

Estas variables del modelo del PSS son las que ingresan dentro del problema de optimización para los algoritmos MVMO y PSO, con la excepción de la constante de tiempo Tw que se encuentra establecida en un valor característico definido entre 10 a 20 segundos [9]. Dentro de la aplicación de los algoritmos se definen adicionalmente límites para los parámetros que ingresan dentro del problema de optimización K_{pss} , T1, T2, T3 y T4, los mismos que serán detallados en la sección de cada algoritmo de optimización utilizado.

3.2.2 ANÁLISIS INICIAL DEL SISTEMA

Para poder comprender el funcionamiento de los algoritmos de optimización aplicados al sistema se debe partir de la consideración de que el sistema en estado inicial no cuenta con estabilizadores de potencia (PSS), por lo que todos los modelos de PSS incluidos en los generadores del sistema han sido desactivados, en este punto se procede a realizar un análisis previo del sistema bajo esta consideración. El punto de enfoque del problema de optimización se encuentra en

maximizar los amortiguamientos del sistema sobre un determinado límite establecido mediante la optimización de la función objetivo que se detallará a continuación dentro de los algoritmos de optimización.

3.2.2.1 Análisis de pequeña señal

Como punto de partida se procede a realizar un análisis de pequeña señal del sistema de pruebas sin incluir los estabilizadores de potencia para observar los modos de oscilación que se presentan dentro del mismo, en el anexo digital 1 se muestra la tabla completa de los modos de oscilación que aparecen dentro del análisis modal del sistema. Adicionalmente se debe verificar la respuesta a transitorios electromecánicos ya que esta respuesta se compone de los diferentes modos oscilatorios detectados [2].

Dentro del análisis de pequeña señal que se corre sobre el sistema de pruebas es importante verificar la estabilidad de los valores propios del sistema, ya que éstos intervienen directamente sobre los modos de oscilación que se llegan a presentar. El objetivo que se persigue es que los valores propios se encuentren en el semiplano imaginario, es decir que sean estables para posteriormente mejorar los amortiguamientos de los diferentes modos característicos. A continuación se muestra el resultado del análisis modal del sistema mediante un gráfico de los valores propios del sistema de prueba.

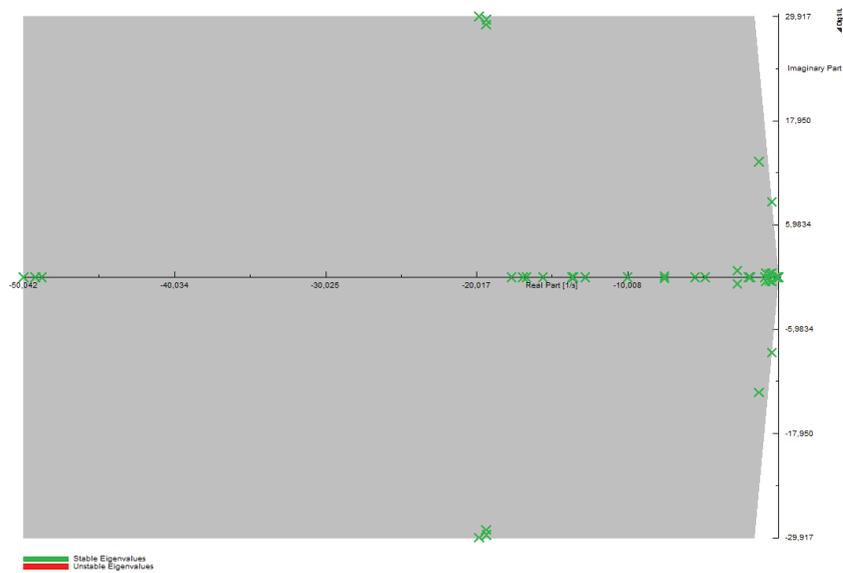


Figura 3.3 Plano complejo donde se muestran los valores propios del sistema

Se observa en el gráfico que todos los valores propios se encuentran en el lado estable del plano, por lo que desde este punto de vista se puede considerar que el sistema se encuentra estable a pesar de que no se cuenta aún con estabilizadores de potencia. La metodología a ser propuesta buscará que los modos oscilatorios característicos cumplan con los requerimientos planteados en cuanto a su amortiguamiento.

La función objetivo para el presente sistema de prueba contempla la maximización de los amortiguamientos por sobre un límite del 15% ($\zeta \geq 15$), para sistemas reales de mayor complejidad el valor establecido es del 5% ($\zeta \geq 5$). Por esta razón se consideran los modos que no cumplen con la restricción planteada. Los modos de oscilación problema son:

Tabla 3.3 Modos de oscilación del sistema

ANÁLISIS DE PEQUEÑA SEÑAL SISTEMA DE PRUEBAS CON PSS DESACTIVADOS				
Modo	Real part	Imaginary part	Damped Frequency	Damping Ratio
	1/s	[rad/s]	[Hz]	
Mode 00013	-1,3133	13,2464	2,1082	0,0987
Mode 00014	-1,3133	-13,2464	2,1082	0,0987
Mode 00015	-0,4691	8,6493	1,3766	0,0542
Mode 00016	-0,4691	-8,6493	1,3766	0,0542

Se observa en la tabla que los modos de oscilación que no cumplen el amortiguamiento requerido son los modos 00013 y 00014 cuyo amortiguamiento se encuentra en un valor del 9,87%, en tanto que para los modos 00015 y 00016 se encuentran en 5,42%, por lo que al momento de utilizar los algoritmos de optimización se deberá enfocar el problema de optimización sobre estos modos problema.

A continuación, se presentan los factores de participación de cada una de las máquinas del sistema sobre los modos problemas que se encontraron en el análisis de pequeña señal, estos factores de participación permiten observar la contribución de cada máquina a los modos de oscilación, con esta información se puede determinar las máquinas sobre las cuales se debe enfocar la optimización para mejorar los modos encontrados.

Para los modos 000130 y 00014 se tienen los siguientes factores de participación en donde se observa que las máquinas G3 y G2 son las que mayor contribución al modo de oscilación presentan en este caso.

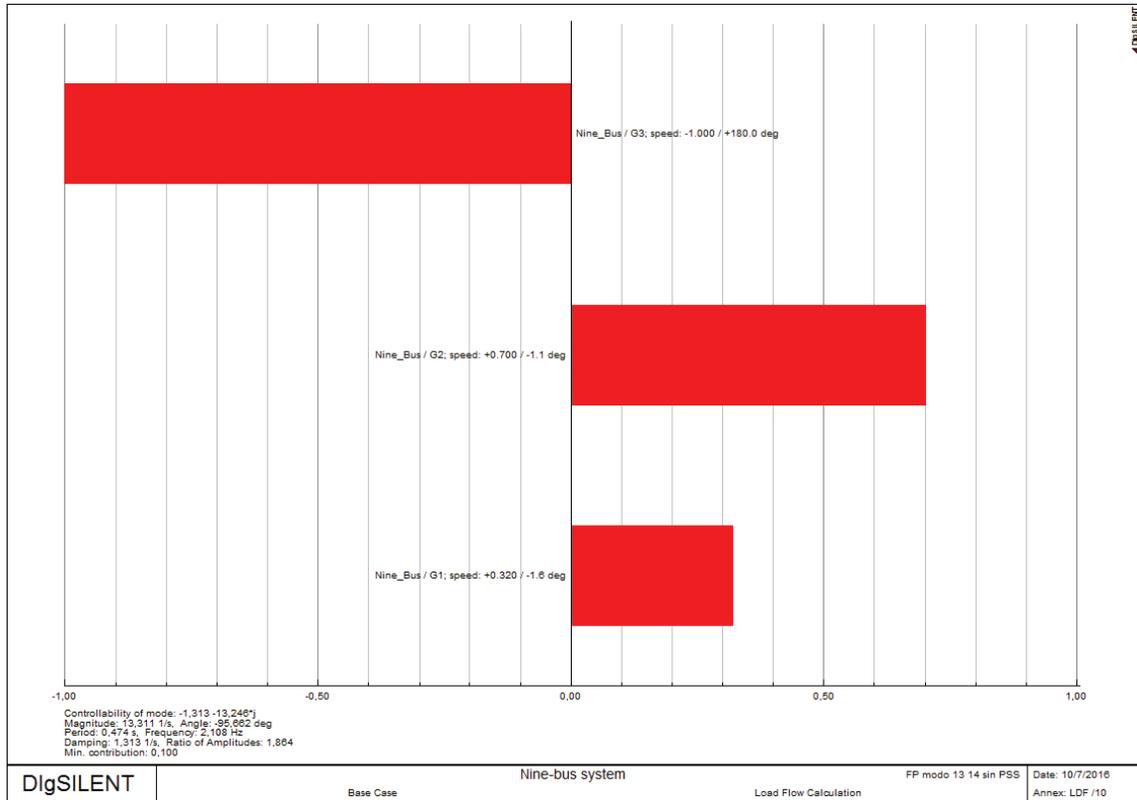


Figura 3.4 Factores de participación modos 13 y 14

A su vez para los modos 00015 y 00016 se presentan las siguientes contribuciones de las máquinas en donde las máquinas G1 y G2 son las que tienen mayor aporte al modo de oscilación indicado.

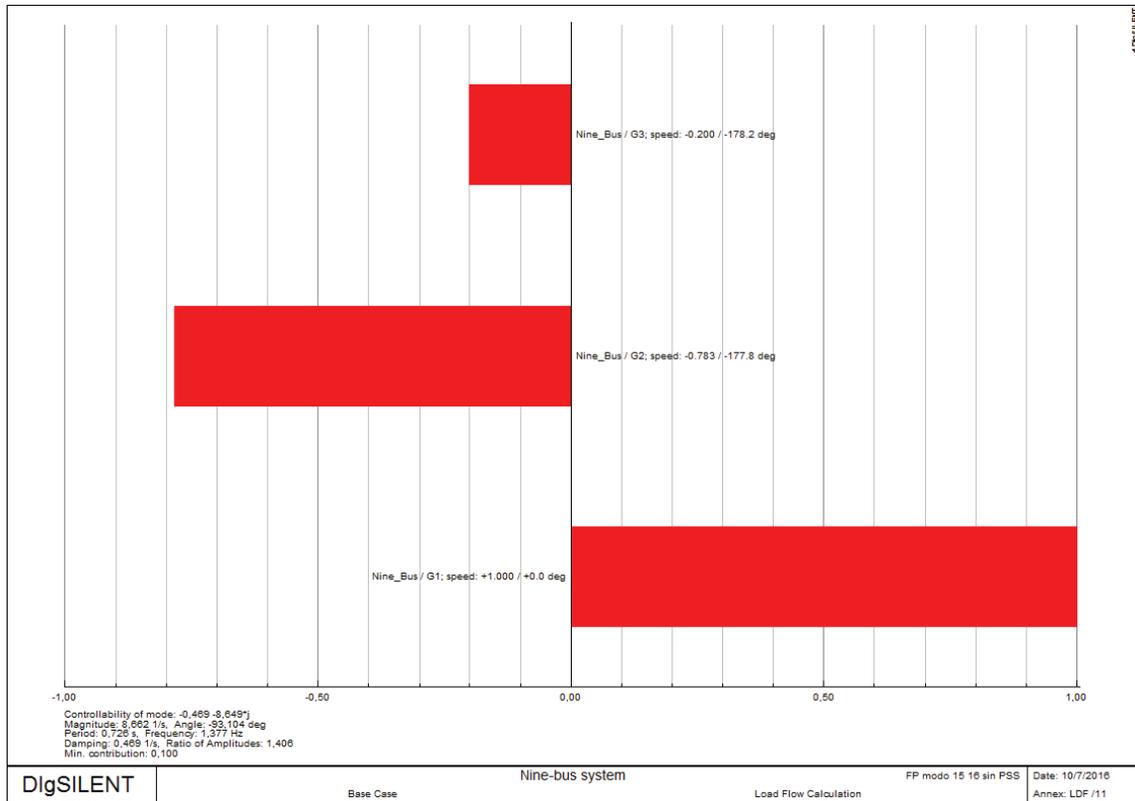


Figura 3.5 Factores de participación modos 15 y 16

Con esta información previa del sistema se puede enfocar el problema de optimización sobre estas máquinas, en este caso al ser un sistema reducido la optimización se centrará sobre el total de las máquinas que se encuentran operando, pero en el caso de una aplicación práctica con un mayor número de generadores se debe enfocar el problema sobre aquellas máquinas que tengan un mayor porcentaje de participación sobre los modos de oscilación debido a la gran cantidad de variables que intervienen en el problema.

3.3 APLICACIÓN DEL ALGORITMO MVMO

En esta sección se explicará la aplicación del algoritmo MVMO, la teoría de este algoritmo, así como su parte matemática se encuentra descrita en la sección 2.6.2, por lo que se procederá únicamente a la aplicación del mismo sobre el sistema de pruebas utilizado. Es importante detallar que el algoritmo con el que se va a trabajar pertenece a las siguientes referencias [9] [10], por lo que en el presente caso se ha

adaptado el algoritmo para los requerimientos del sistema de prueba con sus respectivas modificaciones.

La función objetivo que se pretende alcanzar con la aplicación del MVMO al sistema de pruebas es la de lograr que los amortiguamientos sean mayores o iguales al 15% ($\zeta \geq 15$) en donde, el algoritmo de optimización parte de valores aleatorios para su ejecución dentro de los límites de cada parámetro a optimizar, en este caso los límites que se plantean para cada una de las variables son los siguientes: $Kw \in [0, 100]$; $T1, T3 \in [0.01, 0.2]$; $T1/T2, T3/T4 \in [1, 15]$ [9], con esta información el algoritmo presenta la ventaja de que normaliza estos valores en el rango $[0, 1]$ para que el rango de búsqueda se realice en un espacio reducido que permita encontrar soluciones óptimas, posteriormente los mejores valores encontrados se denormalizan, es decir vuelven a valores dentro de los rangos establecidos cada parámetro, para su inclusión en los modelos de PSS y mediante la realización de un análisis modal del sistema utilizando la herramienta de PowerFactory se obtiene el resultado del amortiguamiento en cada iteración, con esta información se procede a la evaluación de la función objetivo en donde se verificará si el algoritmo cumplió el requerimiento de optimización o terminó su ejecución al haber alcanzado el valor máximo de iteraciones.

3.3.1 FUNCIÓN OBJETIVO

El algoritmo busca que los amortiguamientos de todos los modos sean superiores al valor especificado anteriormente, por lo que se centra en reducir el error existente entre el valor establecido como límite de amortiguamiento (ζ_{th}), que se fijó en valores superiores al 15% y el valor actual del sistema en cada iteración (ζ_{sys}), matemáticamente la función objetivo del programa se describe de la siguiente manera [9]:

$$\min OF = |\zeta_{th} - \zeta_{sys}| \quad (3.1)$$

Con:

$$\zeta_{sys} = \min_{p=1 \dots nm} (\zeta_p) \quad (3.2)$$

Donde:

OF: Función Objetivo

ζ_{th} : *Amortiguamiento mínimo del sistema [%]*

ζ_{sys} : *Amortiguamiento mínimo global del sistema [%]*

ζ_p : *Amortiguamiento de cada modo [%]*

La optimización se realiza en función de los límites de los parámetros establecidos anteriormente, de forma matemática se describe el rango de dichos parámetros de la siguiente manera:

$$X_{min} \leq X \leq X_{max} \quad (3.3)$$

Donde:

X : *Vector de almacenamiento de los parámetros $K_{pss}, T1, T2, T3$ y $T4$*

X_{min} : *Valor mínimo de los parámetros $K_{pss}, T1, T2, T3$ y $T4$*

X_{max} : *Valor máximo de los parámetros $K_{pss}, T1, T2, T3$ y $T4$*

En donde los valores de restricción para cada parámetro son:

Tabla 3.4 Rangos de valores parámetros PSSs

Parámetro	Rango	Unidad
Kw	[0, 100]	[p.u.]
T1	[0,01, 0,2]	[s]
T3		[s]
T1/T2	[1, 15]	[s]
T3/T4		[s]

El algoritmo procede a la obtención del valor de amortiguamiento del sistema en cada iteración para cada una de las mejores partículas obtenidas, de esta manera se verifican los mejores resultados obtenidos y se los almacena como las mejores soluciones posibles dentro del proceso de optimización, el análisis modal que se ejecuta en cada iteración permite verificar el estado de los valores propios del sistema en análisis, y mediante la obtención de los mismos dentro del proceso de ejecución del algoritmo se procede a realizar el cálculo del amortiguamiento generado por cada uno de los modos de oscilación que se presentan, en este aspecto la razón de amortiguamiento se determina mediante la composición de los valores propios del sistema como se describe en el anterior capítulo, de esta

manera el algoritmo se centrará en encontrar los parámetros óptimos de las variables que intervienen en el problema enfocándose en cumplir el criterio de evaluación de la función objetivo o a su vez concluyendo su operación por número de iteraciones, en donde dependerá del sistema en el cual se ejecute el algoritmo ya que para sistemas reducidos como el del presente ejemplo los tiempos de convergencia e iteración del MVMO son cortos mientras que en sistemas extensos los tiempos son mayores.

3.3.2 METODOLOGÍA DE APLICACIÓN DEL MVMO EN DIGSILENT POWERFACTORY

Para iniciar la ejecución del algoritmo se requieren definir las siguientes variables que intervienen en la optimización, estos parámetros son importantes ya que se encuentran directamente relacionados con el proceso matemático del algoritmo, en la siguiente imagen se observa la ventana inicial de ejecución del DPL.

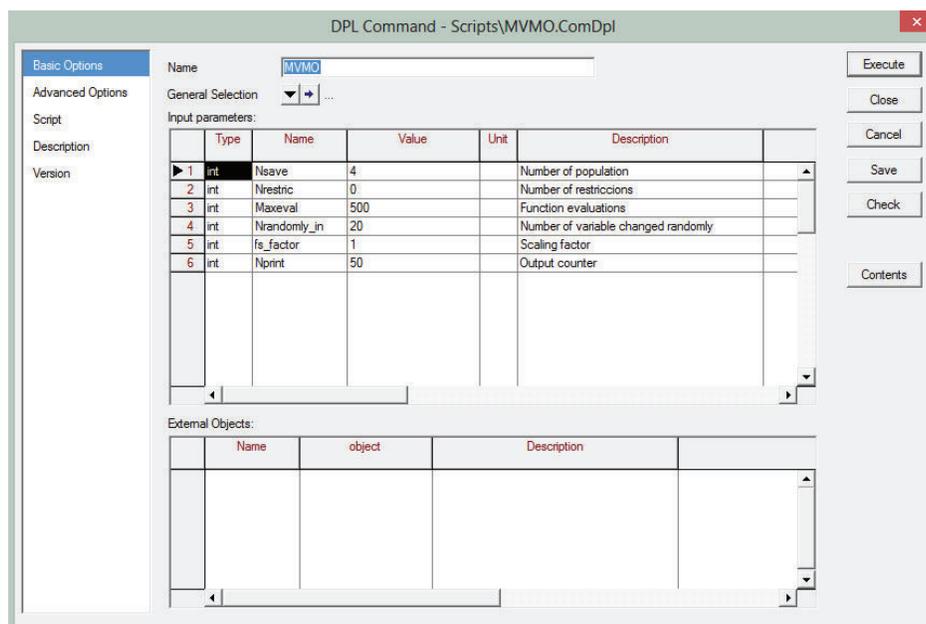


Figura 3.6 Ventana Inicial Ejecución DPL

Los parámetros de ingreso se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 3.5 Parámetros ingreso algoritmo MVMO

Parámetro		Descripción
Nsave	Número de la población	Define el número de partículas que intervienen
Nrestrict	Número de restricciones	No se considera ya que las restricciones se encuentran dadas para cada parámetro del PSS
Maxeval	Número máximo de iteraciones	Número máximo que se evalúa el programa para la terminación del mismo.
Nrandomly_in	Número de variables que cambian aleatoriamente	Define la aleatoriedad de las variables del problema
fs_factor	Factor de escalamiento	Define un factor de escalamiento
Nprint	Contador de salida	Despliega en la pantalla el valor de la función objetivo e iteración, en este caso lo hace cada 50 iteraciones

La parte matemática del algoritmo se encuentra programada en ambiente DPL dentro del script principal, en esta sección no se entrará en detalle de dicha parte sino más bien de la aplicación enfocada al sistema de pruebas, en la siguiente imagen se muestra como realizar el enlace de los PSSs del sistema con el script, dentro de los contenidos del script principal (Contents) se encuentra un segundo script donde se detalla la función objetivo (Obj_function).

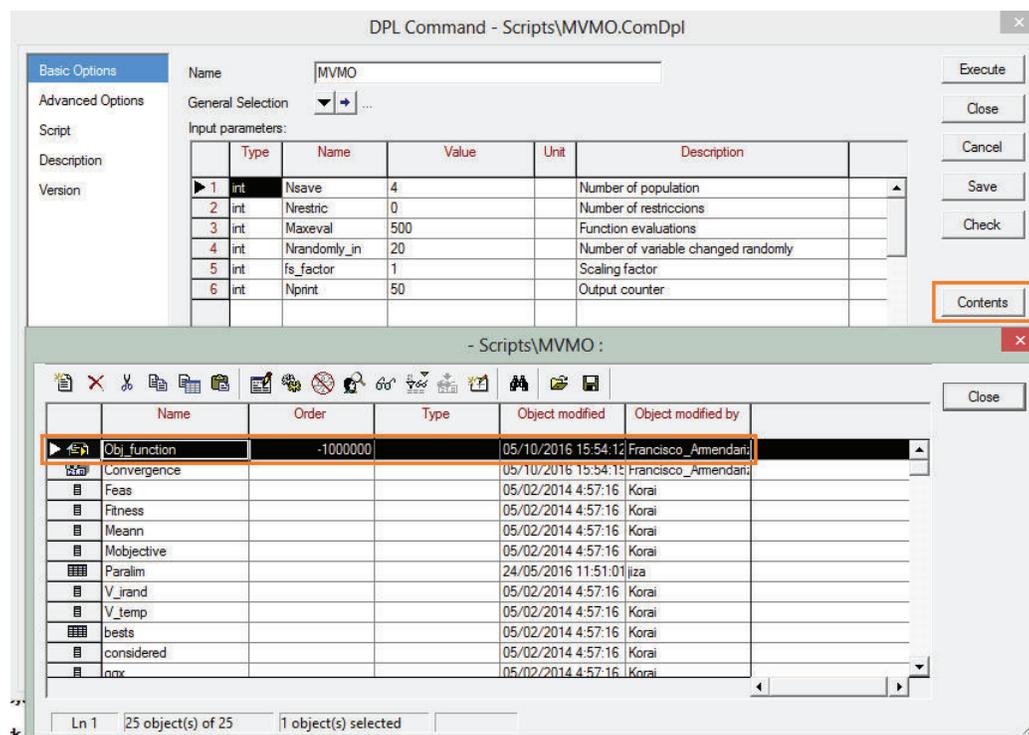


Figura 3.7 Contenidos del script

Dentro del script de la función objetivo se debe proceder a realizar el enlace de los modelos de PSSs que entrarán dentro de la optimización, para el presente caso se optimizarán todos los estabilizadores de potencia con que se cuenta, para este proceso se deben definir a los elementos como objetos externos, en la siguiente imagen se detalla como enlazar los modelos de estabilizadores de potencia al DPL, de esta manera el script procederá a utilizar los parámetros de dichos elementos para que sean optimizados.

Tabla 3.6 Detalles PSSs

Nombre	Objeto	Detalle
PSS1	PSSG1	Modelo de PSS del generador 1
PSS2	PSSG2	Modelo de PSS del generador 2
PSS3	PSSG3	Modelo de PSS del generador 3

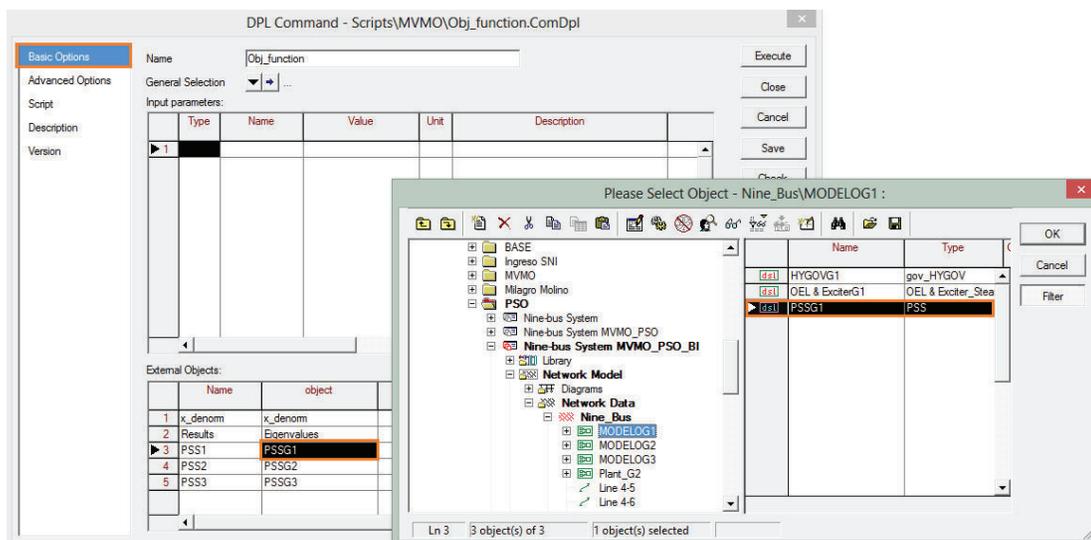


Figura 3.8 Variables de entrada externa en el script

Adicionalmente se deben tomar los resultados del análisis modal que ejecuta el programa por lo que de forma similar a los modelos de PSSs se debe incluir el archivo de resultados de los valores propios (**Eigenvalues**), el mismo que se lo toma como un objeto externo y se encuentra almacenado en los resultados del caso de estudio, en la imagen se resalta en color rojo las opciones que se deben elegir para poder seleccionar el resultado de los valores propios que arroja el análisis modal del sistema en estudio.

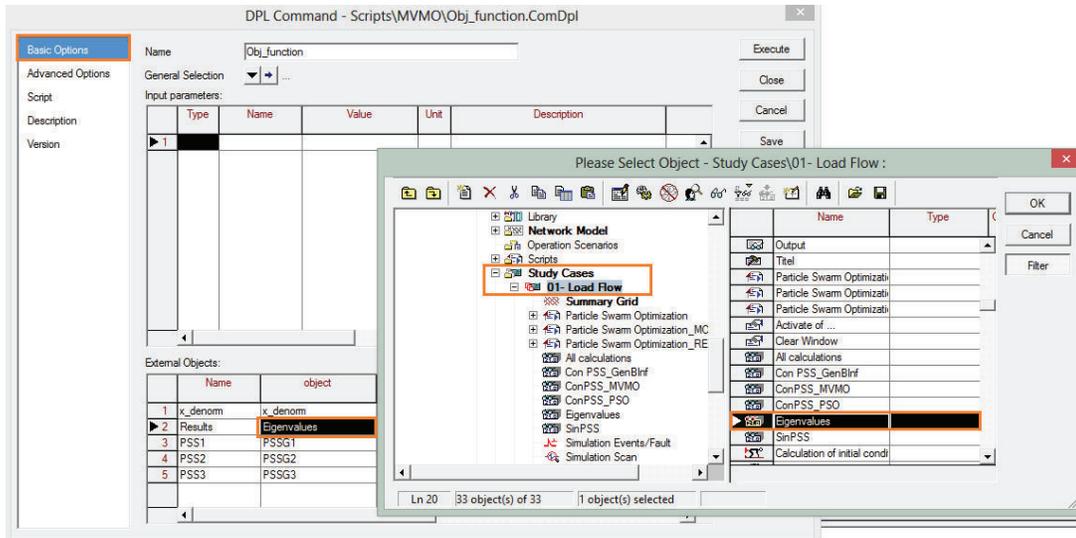


Figura 3.9 Enlace resultados análisis modal en el script

Como se había explicado en el proceso de ejecución del programa en primer lugar se normalizan las variables de búsqueda a un rango $[0, 1]$ [9] para posteriormente al momento de evaluarlas dentro de la función objetivo de-normalizarlas e incluirlas en los modelos y realizar cálculos y simulaciones, por lo que en este aspecto es necesario que se tomen las variables de-normalizadas del vector que las almacena (\mathbf{x}_{denorm}), el mismo que se encuentra como un objeto externo, en la figura (3.10) se indica como seleccionar dicho vector para la ejecución del DPL.

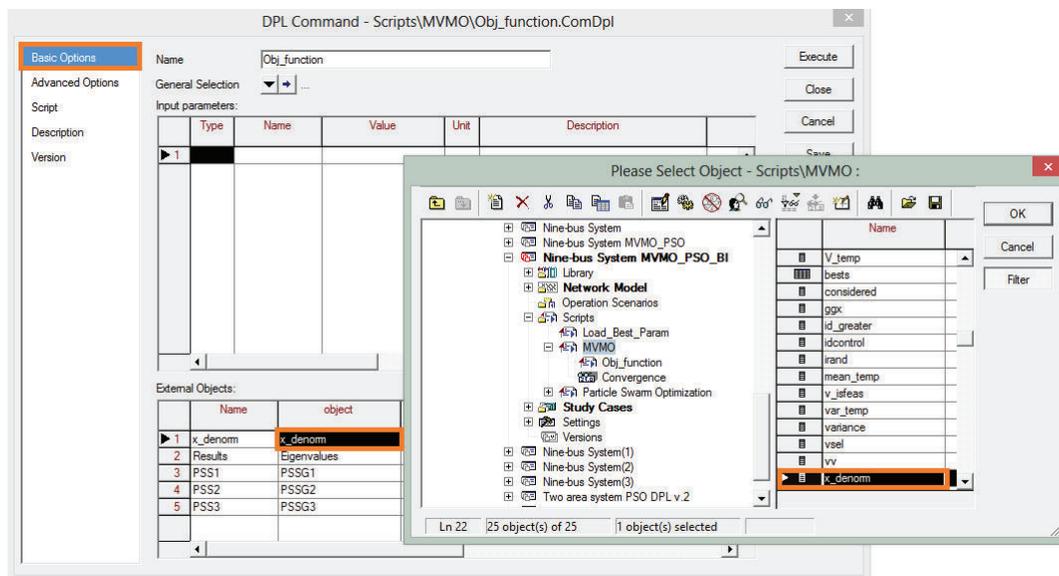


Figura 3.10 Vector de almacenamiento de variables de-normalizadas

Otro de los aspectos fundamentales para la ejecución del algoritmo DPL es el ingreso de los límites para la optimización, en donde dentro del contenido del script principal se encuentra definida una matriz (**Paralim**) que contiene los límites mínimos y máximos para cada parámetro a optimizar del PSS [9], la siguiente figura indica el proceso de ingreso de los límites de los parámetros a optimizar por cada PSS.

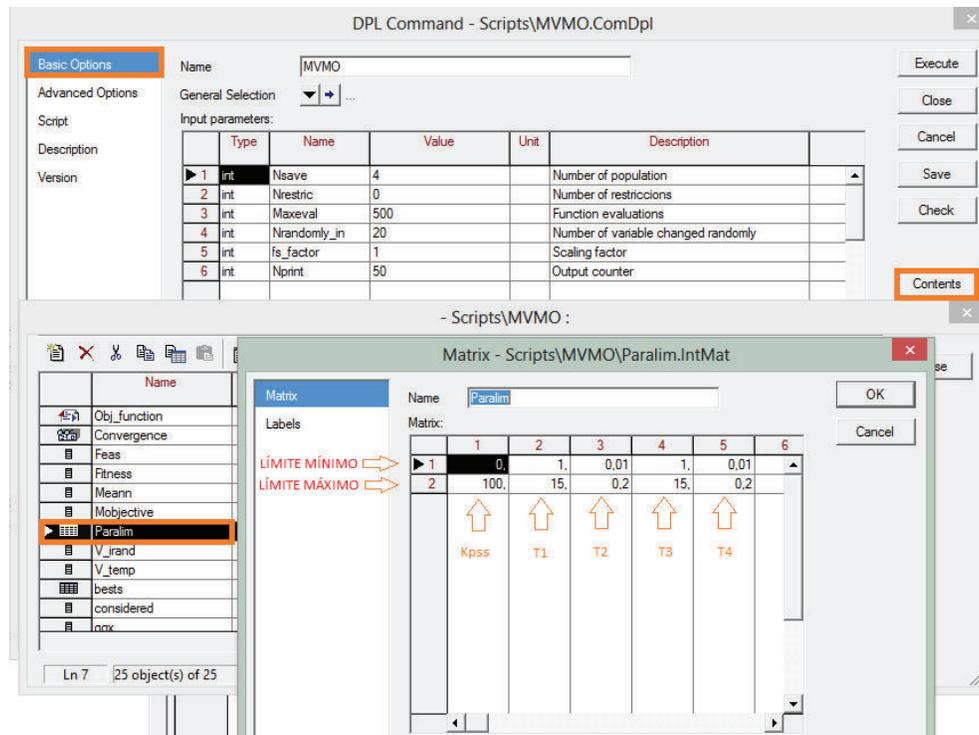


Figura 3.11 Matriz de límites de las variables a optimizar

La matriz que contiene los límites siempre será de tamaño $2 \times n$, en donde n tiene un valor de 5 para cada estabilizador de potencia, es decir si se tiene un solo PSS la matriz tiene un tamaño de 2×5 , para dos PSS tomaría un tamaño de 2×10 , y así consecuentemente como se muestra en la siguiente tabla [9].

Tabla 3.7 Matriz de límites parámetros PSSs

		PSS1					PSS2					PSSn				
		Kw	T1	T2	T3	T4	Kw	T1	T2	T3	T4	Kw	T1	T2	T3	T4
1	Límite mínimo	0	1	0,01	1	0,01	0	1	0,01	1	0,01	0	1	0,01	1	0,01
2	Límite máximo	100	15	0,2	15	0,2	100	15	0,2	15	0,2	100	15	0,2	15	0,2
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	n-4	n-3	n-2	n-1	n
		Número de Columna de la matriz Paralim														

Una vez ingresados los parámetros que requiere el algoritmo MVMO se puede proceder a su ejecución en el sistema de pruebas, para esto se activan nuevamente los modelos de PSSs del sistema para que se pueda optimizar sus parámetros.

3.3.3 RESULTADOS OBTENIDOS

Una vez ejecutado el script de optimización por método MVMO se obtienen los siguientes resultados.

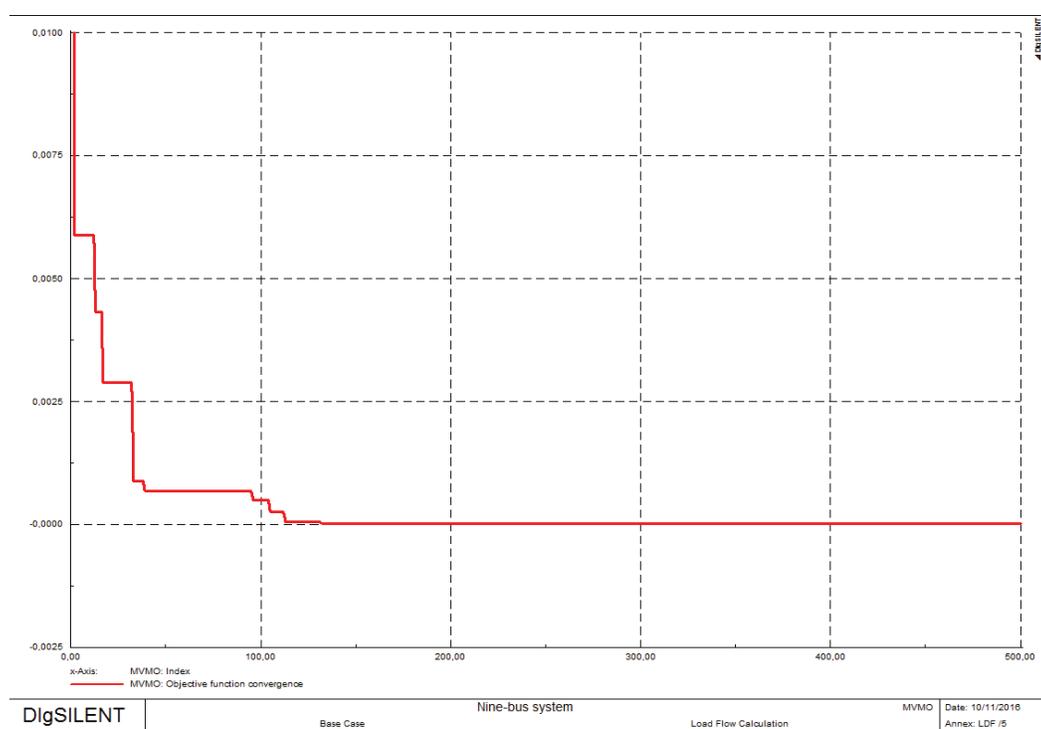


Figura 3.12 Gráfica de convergencia del algoritmo MVMO

Se observa que la convergencia de la función objetivo dentro de las 500 iteraciones propuestas se da de forma rápida tomando un tiempo de 29,022 segundos en su ejecución.

Los resultados que se obtienen utilizando este método de optimización son los siguientes para cada uno de los PSSs del sistema.

Tabla 3.8 Nuevos Parámetros de los PSSs

PARÁMETRO	MÉTODO DE OPTIMIZACIÓN MVMO		
	G1	G2	G3
Ganancia PSS Kw	32,67229	79,03977	63,61454
Constante de Tiempo Wash out Tw	10	10	10
T2	0,015129	0,020861	0,005103
T1	0,076302	0,155265	0,060267
T3	0,009961	0,014652	0,015181
T4	0,135324	0,144646	0,174588
ylim	0,1	0,1	0,1

3.3.3.1 Análisis de pequeña señal del sistema optimizado

Con los parámetros obtenidos mediante la optimización se procede a realizar el análisis de estabilidad del sistema de pruebas, para posteriormente poder contrastar los resultados con el otro método de optimización. Una vez realizado el análisis modal del sistema se obtienen los valores propios que se grafican en la figura (3.13), en el anexo digital 1 se presenta la tabla completa de los modos de oscilación del sistema, en la figura se aprecian los valores propios obtenidos y los resultados de los modos sobre los cuales se enfocó la optimización.

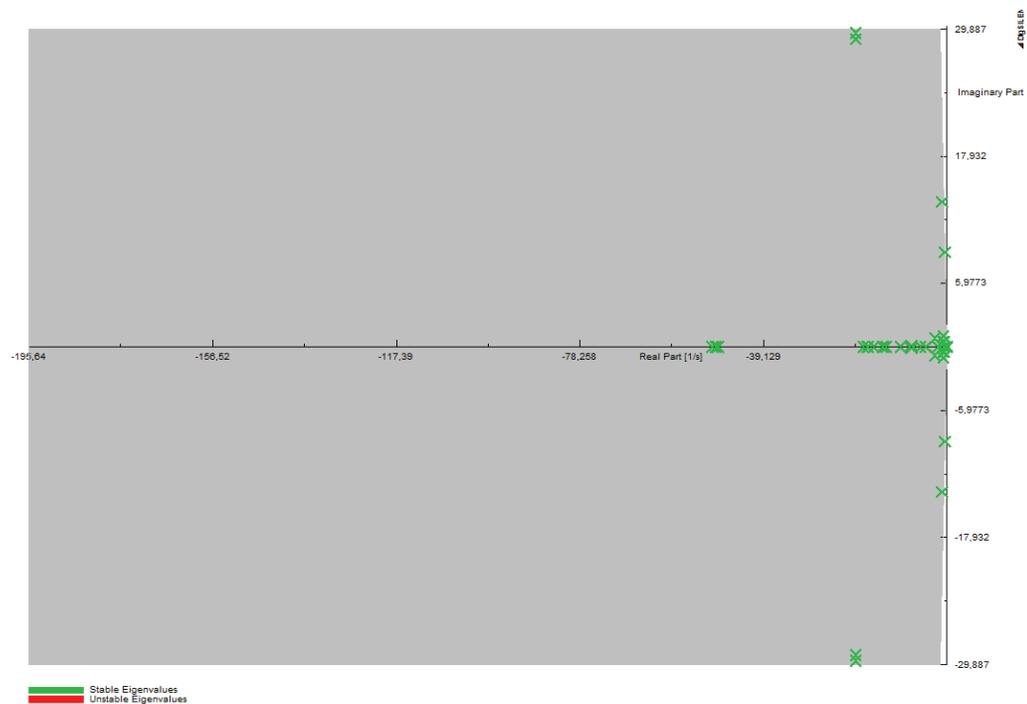


Figura 3.13 Gráfica valores propios del sistema

En el gráfico se observan que los valores propios del sistema al momento de haber incluido y optimizado los PSSs del sistema, se encuentran en una región más estable del semiplano imaginario, lo que implica un mejoramiento de la razón de amortiguamiento como se observa a continuación.

Tabla 3.9 Resultados Análisis Modal

ANÁLISIS DE PEQUEÑA SEÑAL SISTEMA DE PRUEBAS CON PSS CALIBRADOS UTILIZANDO MVMO				
Modo	Real part	Imaginary part	Damped Frequency	Damping Ratio
	1/s	[rad/s]	[Hz]	
Mode 00019	-3,0143	13,6896	2,1788	0,2150
Mode 00020	-3,0143	-13,6896	2,1788	0,2150
Mode 00021	-1,4215	8,6581	1,3780	0,1620
Mode 00022	-1,4215	-8,6581	1,3780	0,1620

Se tiene que los modos problema indicados anteriormente presentan un amortiguamiento superior al límite que se estableció como objetivo, de esta manera se verifica que la aplicación del algoritmo MVMO para la optimización de los estabilizadores de potencia del sistema cumple el objetivo planteado para su ejecución debido a que el mejoramiento de los modos de oscilación es notable.

3.3.3.2 Análisis Dinámico del sistema optimizado

En este punto es importante verificar adicionalmente la respuesta del sistema ante un transitorio de tipo electromecánico, se simula una falla trifásica en la línea 5 -7 del sistema de pruebas y se obtienen los resultados que se muestran en la figura (3.14). La respuesta en color rojo representa el comportamiento del sistema sin haber calibrado los estabilizadores de potencia, mientras las curvas en color verde son las respuestas de las máquinas con sus estabilizadores calibrados con el algoritmo MVMO. Se aprecia una diferencia ostensible en cuanto a reducción de oscilaciones de potencia activa y reactiva en donde se tiene que tanto la magnitud de la oscilación así como los tiempos de estabilización de las mismas se reducen considerablemente, lo que permite verificar una clara mejoría en respuesta a transitorios electromecánicos al momento de calibrar los PSSs con el presente algoritmo.

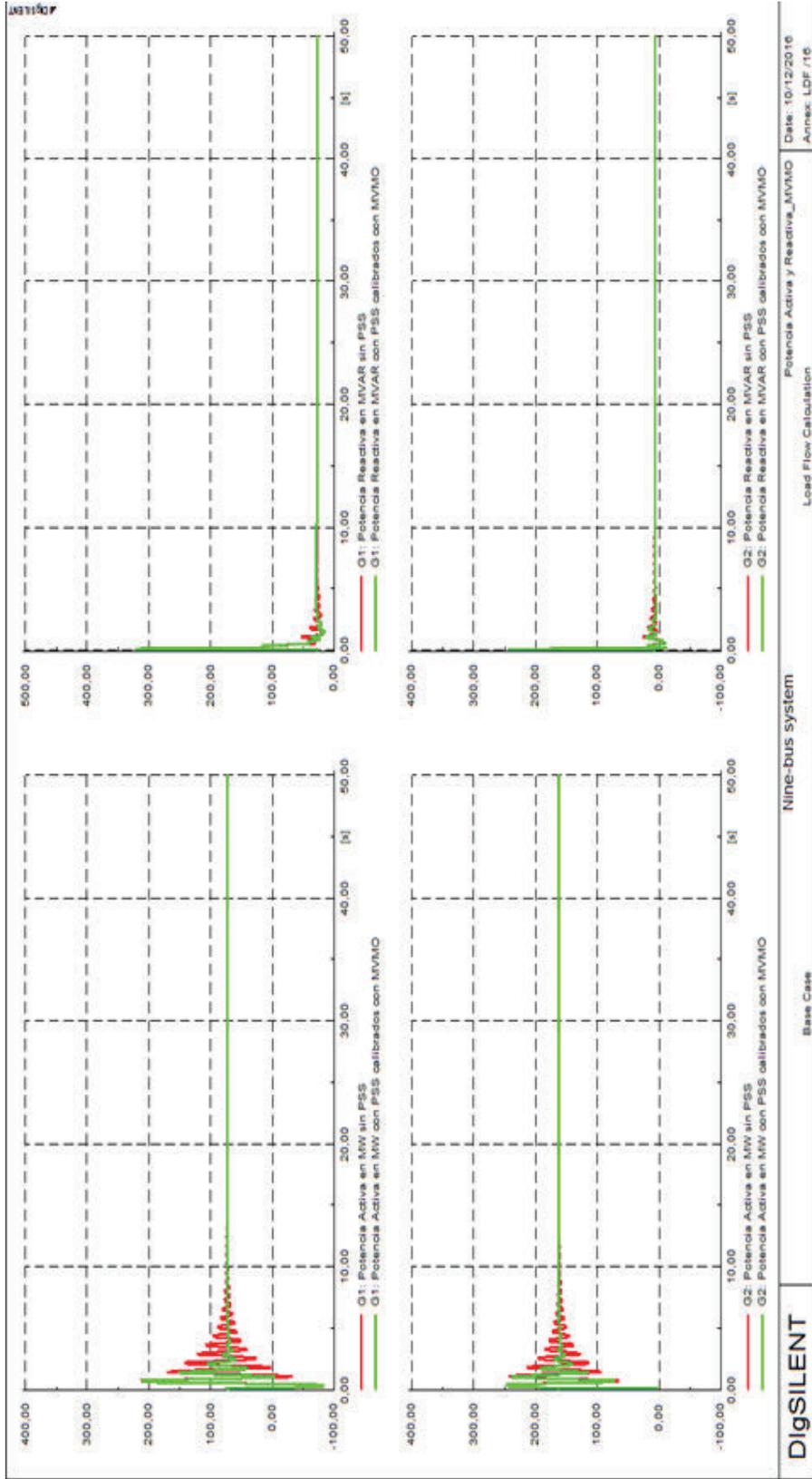


Figura 3.14 Resultados electromecánicos (RMS)

Adicionalmente es conveniente verificar la respuesta de voltaje y frecuencia del sistema ante el evento transitorio simulado. La respuesta de voltaje y frecuencia que tienen las máquinas ante la ocurrencia del evento transitorio presenta una clara mejoría ya que como se observa en las curvas de color verde los picos de la oscilación y los tiempos de estabilización de las señales se reducen, lo que implica que el amortiguamiento del sistema al haber calibrado los PSSs con el algoritmo MVMO mejora como se observó dentro del análisis de pequeña señal, esto representa un beneficio puesto que la frecuencia y voltaje logran retornar a sus valores de operación normales en menores tiempos y dentro de los rangos de operación segura del sistema. De esta manera se comprueba que el algoritmo MVMO enfocado a la optimización de los parámetros de los PSSs es válido ya que arroja buenos resultados para el mejoramiento del amortiguamiento del sistema.

3.4 APLICACIÓN DEL ALGORITMO PSO

Dentro de este apartado se procederá a realizar la explicación de la aplicación del algoritmo de optimización PSO enfocado a la sintonización óptima de los parámetros de los estabilizadores de potencia del sistema de pruebas en análisis. El detalle matemático, así como la teoría que engloba el presente método de optimización se encuentra en el capítulo 2. Es importante destacar que la consecución del algoritmo que se va a aplicar pertenece a las referencias [15], [16], [17], sobre el cual se ha procedido a realizar las modificaciones necesarias para que se enfoque a la problemática sobre la cual se está trabajando.

Dado el requerimiento de realizar una comparación entre ambos métodos utilizados (MVMO y PSO) se procede a utilizar la misma función objetivo para la optimización aplicada en el algoritmo anterior, en donde se requiere que el amortiguamiento del sistema de pruebas se encuentre con valores superiores al 15% ($\zeta \geq 15$), se tiene que el funcionamiento del algoritmo consiste con arrancar tomando valores iniciales que se encuentran dentro de los límites establecidos para la optimización de cada uno de los parámetros del PSS, en este caso $Kw \in [0, 100]$; $T1, T3 \in [0.01, 0.2]$; $T1/T2, T3/T4 \in [1, 15]$ [15]. Una vez obtenida esta información, se procede a ingresar dichos parámetros en los estabilizadores de

potencia a calibrar para realizar el proceso iterativo de optimización, en donde el PSO irá buscando las mejores soluciones en el espacio de búsqueda establecido y mediante el análisis de pequeña señal de PowerFactory se procederá a evaluar la función objetivo para cada iteración con cada partícula del enjambre. Posteriormente se seleccionan las mejores respuestas encontradas durante el proceso de búsqueda y se realiza el escogimiento de la mejor para cada parámetro de optimización del PSS, cabe destacar que en este caso el algoritmo tiene una finalización por número máximo de iteraciones.

3.4.1 FUNCIÓN OBJETIVO

La función objetivo que se plantea para la ejecución del DPL de optimización es la misma que se planteó para el script del MVMO en la sección anterior, por lo que no se detalla la misma, sino únicamente se recalca los límites de las variables a optimizar en los PSSs.

Tabla 3.10 Límites variables de optimización

Parámetro	Rango	Unidad
Kw	[0, 100]	[p.u.]
T1	[0,01, 0,2]	[s]
T3		[s]
T1/T2	[1, 15]	[s]
T3/T4		[s]

3.4.2 METODOLOGÍA DE APLICACIÓN DEL ALGORITMO PSO EN DIGSILENT POWERFACTORY

Se procederá a detallar la utilización del algoritmo de optimización por enjambre de partículas. Para proceder a la utilización del mismo se debe inicializar algunas variables que determinan el correcto proceso de optimización, en la siguiente imagen se detalla la definición de las mismas.

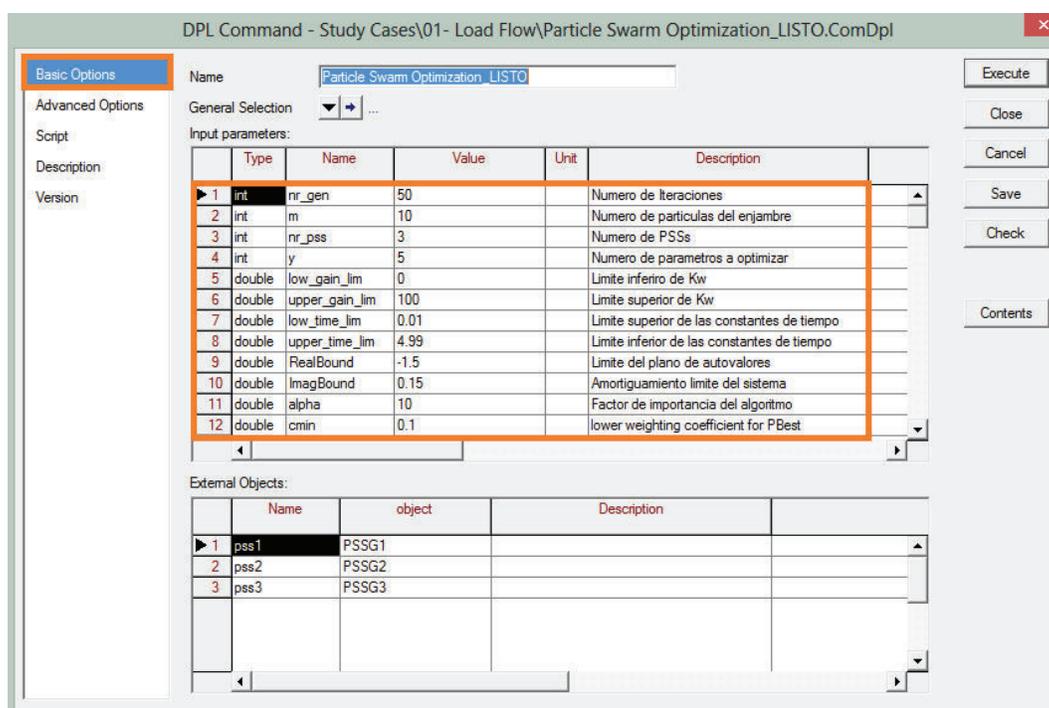


Figura 3.15 Ventana inicial script algoritmo de optimización PSO

Se presenta la siguiente tabla detallada:

Tabla 3.11 Variables de inicialización

Parámetro		Descripción
nr_gen	Número de iteraciones	Define el número de iteraciones que realiza el programa
m	Número de partículas del enjambre	Define el número de partículas que participan del enjambre de búsqueda.
nr_pss	Número máximo de iteraciones	Número de PSSs que intervienen en la optimización.
y	Número de parámetros del PSS a optimizar	Define el número de parámetros del PSS sobre los cuales se realizará la optimización.

Es importante destacar que en este DPL el ingreso de los límites de los parámetros de optimización se lo debe realizar en la ventana principal que se muestra en la figura (3.15), en este caso los límites se definen de forma general y el script los asigna a cada estabilizador de potencia que interviene.

Tabla 3.12 Límites variables de optimización

Parámetro		Descripción
low_gain_lim	Límite inferior de la ganancia del PSS	Define el límite inferior de la ganancia del estabilizador de potencia.
upper_gain_lim	Límite superior de la ganancia del PSS	Define el límite superior de la ganancia del estabilizador de potencia.
low_time_lim	Límite inferior de las constantes de tiempo del PSS	Define el límite inferior de las constantes de tiempo del estabilizador de potencia (T1, T2, T3 y T4).
upper_time_lim	Límite superior de las constantes de tiempo del PSS	Define el límite superior de las constantes de tiempo del estabilizador de potencia (T1, T2, T3 y T4).

Adicionalmente se deben ingresar otros parámetros importantes para la correcta ejecución del DPL como el límite de amortiguamiento y los factores de peso matemático del método de optimización como se detalla a continuación:

Tabla 3.13 Variables de entrada al algoritmo

Parámetro		Descripción
ImagBound	Límite de amortiguamiento	Define el amortiguamiento al cual se desea llegar como objetivo de la optimización.
alpha	Factor de importancia del algoritmo	Define un factor de importancia matemático al algoritmo.
c_min	Factor mínimo de peso del algoritmo	Define el factor de peso mínimo del algoritmo.
c_max	Factor máximo de peso del algoritmo	Define el factor de peso máximo del algoritmo.
c2	Coefficiente de peso grupal del algoritmo	Define el factor de peso matemático para las mejores soluciones grupales.
w_min	Factor de inercia mínimo	Define la inercia mínima para las velocidades de las partículas del enjambre.
w_max	Factor de inercia máximo	Define la inercia máxima para las velocidades de las partículas del enjambre.

Posteriormente al igual que en el caso del script de MVMO se debe enlazar los PSSs que participarán en la optimización como se muestra en la siguiente imagen:

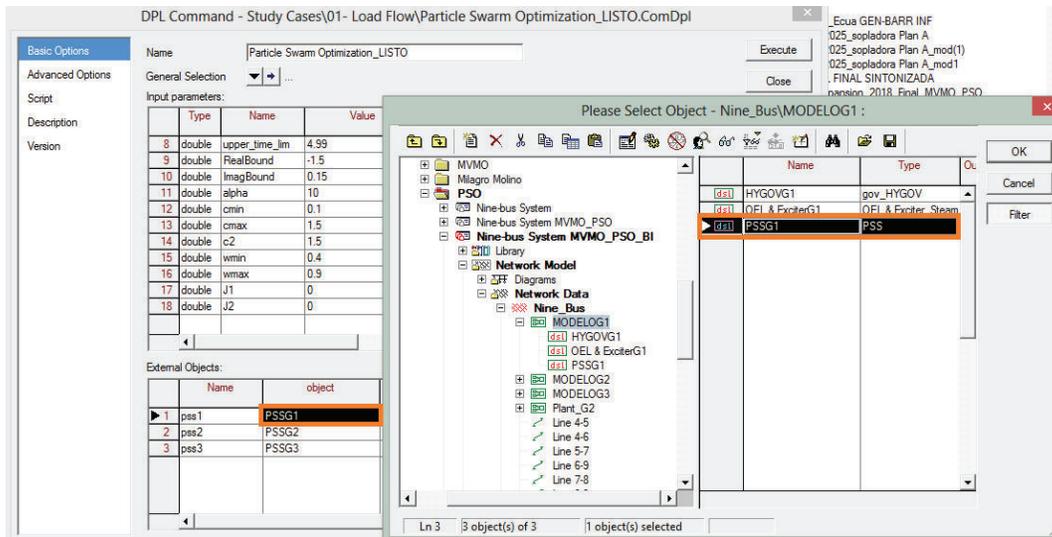


Figura 3.16 Variables de entrada externa PSSs

Al igual que en el caso anterior los PSSs que ingresan dentro de la optimización son los siguientes:

Tabla 3.14 Detalles de los PSSs

Nombre	Objeto	Detalle
PSS1	PSSG1	Modelo de PSS del generador 1
PSS2	PSSG2	Modelo de PSS del generador 2
PSS3	PSSG3	Modelo de PSS del generador 3

Finalmente, antes de proceder con la ejecución del algoritmo se debe referenciar el resultado del análisis modal hacia el DPL, en este caso a diferencia del MVMO el archivo de resultados se lo referencia internamente y no de forma externa, para esto se debe acceder al contenido del DPL principal y configurar el comando interno de ejecución de análisis modal (**ComMod**) para que los resultados se escriban en un archivo de resultados que almacene los valores propios del sistema (**res**), con ello se garantiza que en cada iteración del algoritmo este archivo se actualice y el DPL se ejecute correctamente.

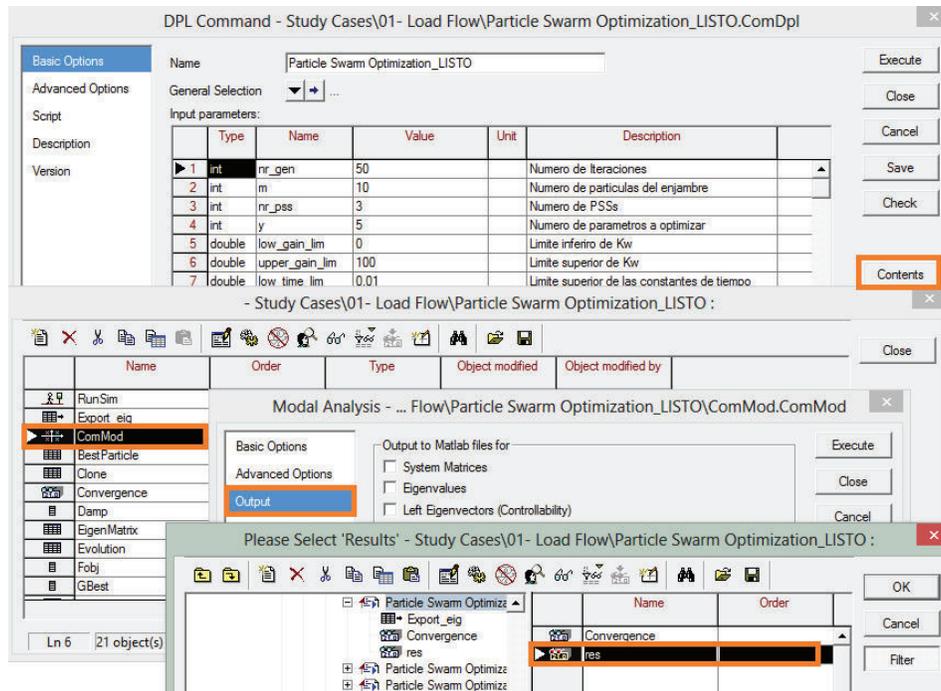


Figura 3.17 Variables resultados del análisis modal

3.4.3 RESULTADOS OBTENIDOS

Al ejecutar el DPL de optimización por método PSO, se obtuvieron los siguientes resultados.

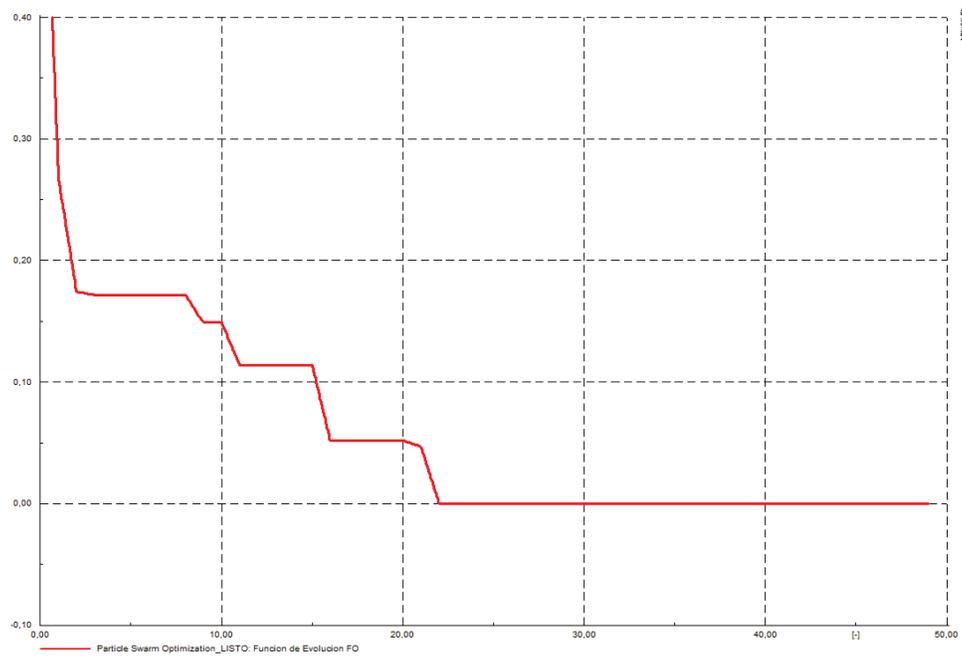


Figura 3.18 Gráfica de convergencia del algoritmo PSO

En la gráfica de convergencia del algoritmo PSO, se observa que se llega al objetivo de optimización dentro de las 50 iteraciones propuestas en un tiempo de 13,9 segundos. La convergencia del algoritmo se da de una forma rápida ya que entre las iteraciones 20 a 30 se determina la solución. A continuación, se presentan los parámetros óptimos encontrados por el algoritmo.

Tabla 3.15 Variables de salida algoritmo PSO

PARÁMETRO	MÉTODO DE OPTIMIZACIÓN PSO		
	G1	G2	G3
Ganancia PSS Kw	11,61361	90,99395	85,97201
Constante de Tiempo Wash out Tw	10	10	10
T2	0,01	0,01	2,911656
T1	4,134896	1,94617	3,213619
T3	3,574747	1,808936	2,643672
T4	1,683384	0,967603	2,181275
y _{lim}	0,1	0,1	0,1

3.4.3.1 Análisis de pequeña señal del sistema optimizado

Una vez realizada la optimización de los estabilizadores de potencia de las máquinas del sistema, se procede a realizar un análisis del sistema para verificar los resultados que se obtienen al ejecutar el algoritmo PSO. A continuación, se presenta el plano de los auto valores obtenidos del análisis modal ejecutado sobre el sistema de pruebas optimizado.

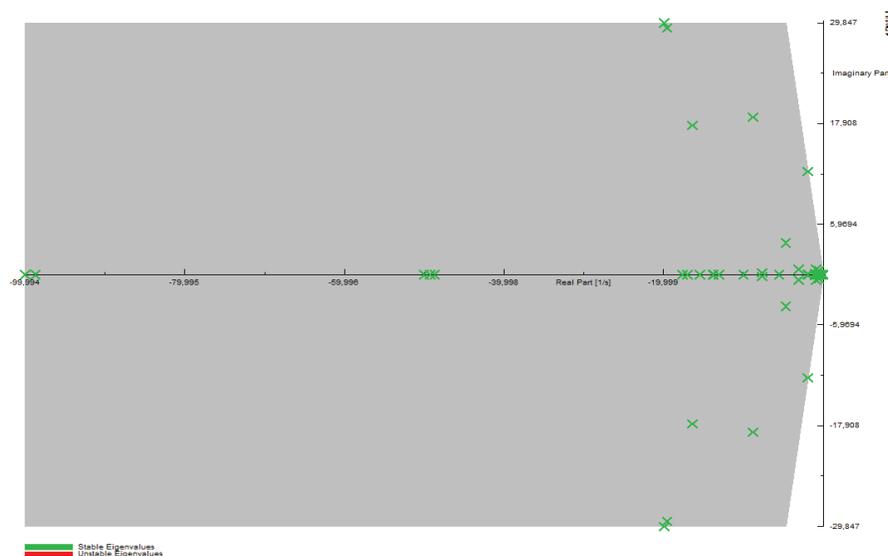


Figura 3.19 Gráfica de los valores propios del sistema

Se observa que los valores propios del sistema se encuentran en la zona estable del semiplano complejo, lo que implica que el amortiguamiento del sistema se vea incrementado, a continuación, se presentan los resultados de los modos de oscilación en análisis.

Tabla 3.16 Resultados modos de oscilación

ANÁLISIS DE PEQUEÑA SEÑAL SISTEMA DE PRUEBAS CON PSS CALIBRADOS UTILIZANDO MVMO				
Modo	Real part	Imaginary part	Damped Frequency	Damping Ratio
	1/s	[rad/s]	[Hz]	
Mode 00015	-8,7894	18,6839	2,9736	0,4257
Mode 00016	-8,7894	-18,6839	2,9736	0,4257
Mode 00017	-1,8987	12,2323	1,9468	0,1534
Mode 00018	-1,8987	-12,2323	1,9468	0,1534

Se observa que los modos problema han incrementado su razón de amortiguamiento logrando cumplir con el objetivo planteado para la optimización, en este caso el primer modo de oscilación 00015 y 00016 logra llegar a un amortiguamiento del 42,57% que se encuentra muy sobre el valor establecido como objetivo inicial, además el segundo modo problema 00017 y 00018 presenta un amortiguamiento de 15,34%, lo que permite verificar que el método de optimización por enjambre de partículas (PSO) arroja buenos resultados para la optimización de los PSSs del sistema.

3.4.3.2 Análisis dinámico del sistema optimizado

Como en el caso anterior es importante verificar la respuesta del sistema ante transitorios de tipo electro-mecánico, por lo que se procede a ejecutar el evento transitorio utilizado anteriormente en la aplicación del MVMO.

Se presentan gráficas de simulación de las variables de los generadores del sistema de prueba en donde la curva en color azul representa la respuesta del sistema con sus estabilizadores de potencia calibrados con el método PSO y la curva de color rojo la del sistema sin calibrar.

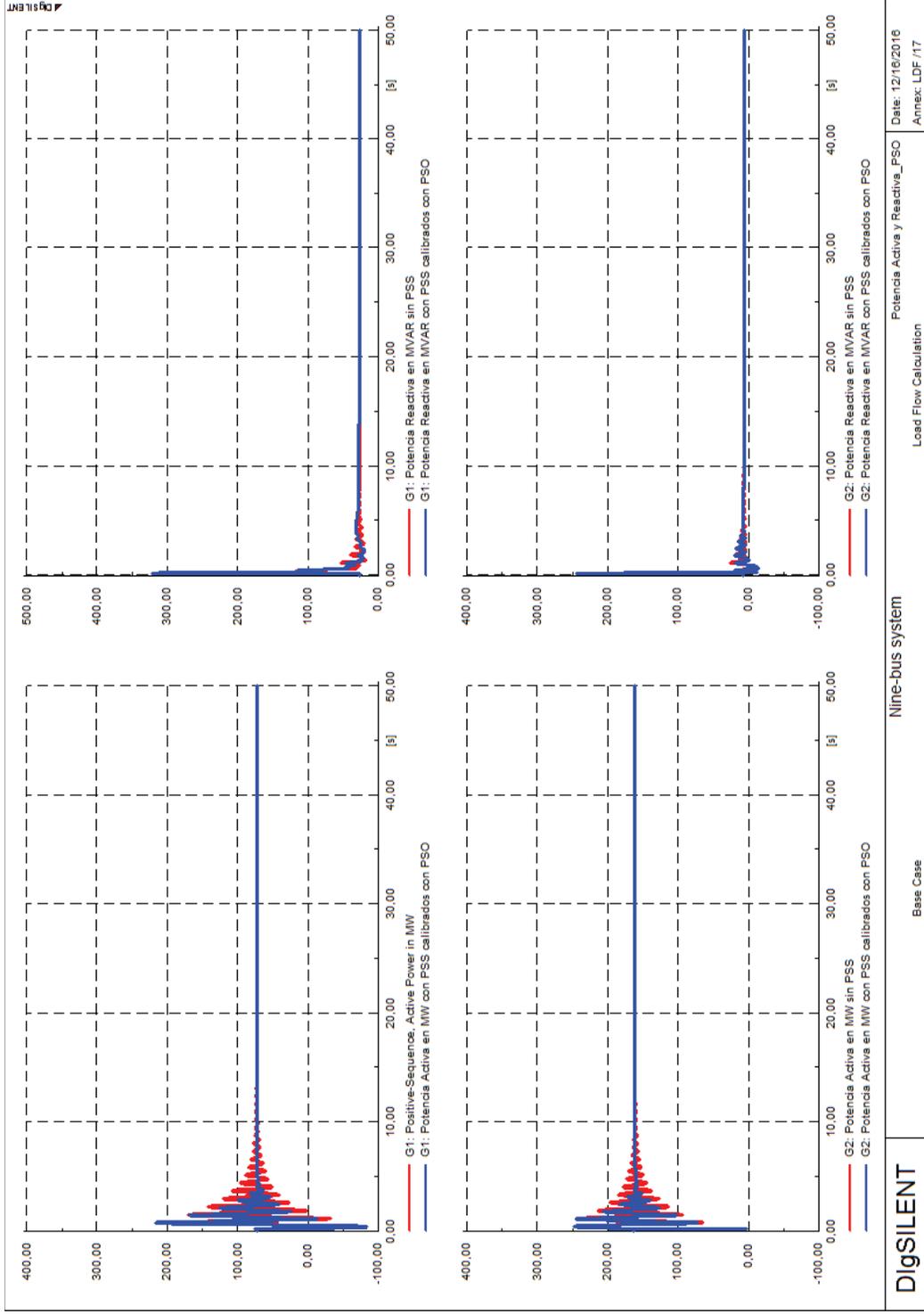


Figura 3.20 Resultados electromecánicos

Se observa que ante la ocurrencia de una falla en el sistema los tiempos de estabilización de las oscilaciones de potencia activa y reactiva se reducen al calibrar los estabilizadores de potencia en comparación con el sistema inicial tanto para potencia activa como reactiva de los generadores.

Adicionalmente es oportuno verificar la respuesta de voltaje y frecuencia de los generadores cuando ocurre el evento transitorio, se presentan los voltajes y frecuencias de las máquinas en las siguientes figuras.

La curva de color azul representa la respuesta del sistema con los estabilizadores de potencia calibrados mediante el método PSO, mientras que la gráfica en color rojo pertenece a la respuesta del sistema original sin calibrar estabilizadores de potencia. Se observa claramente que la respuesta de voltaje de las máquinas del sistema tiene una notable mejoría, en donde los tiempos de estabilización se reducen logrando una mejor estabilidad para el sistema ya que las oscilaciones que se presentan en el evento transitorio se reducen, además la frecuencia de las máquinas también mejora ostensiblemente en cuanto a tiempos de estabilización y los picos que se presentan durante la falla.

Estos resultados permiten verificar que el proceso de optimización para los estabilizadores de potencia del sistema mediante el algoritmo PSO arroja buenos resultados ya que el amortiguamiento del sistema mejora notablemente.

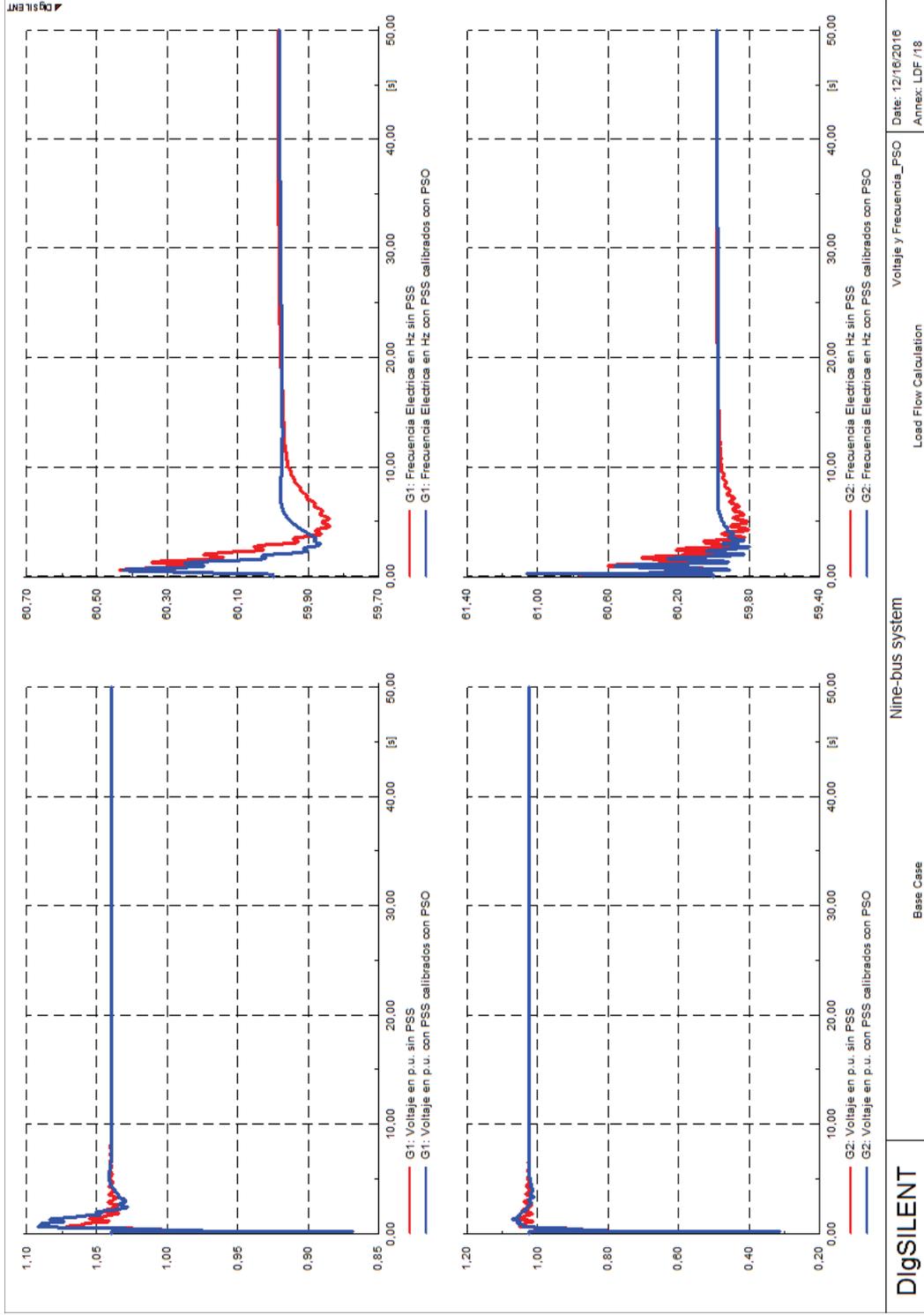


Figura 3.21 Resultados electromecánicos

3.5 COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN MVMO Y PSO

Una vez obtenidos los resultados entregados por cada uno de los métodos de optimización es conveniente realizar un análisis que permita definir cuál método ofrece mejores resultados para el sistema propuesto, por lo que en la presente sección se procederá a realizar una comparación entre los mismos.

3.5.1 ANÁLISIS DE PEQUEÑA SEÑAL

Como se había observado anteriormente es importante realizar un análisis de estabilidad del sistema de pruebas para verificar el estado del mismo, en este punto se muestra los modos de oscilación que se habían identificado como problema, es decir que presentaban un amortiguamiento menor al 15%. A continuación, se encuentra detallada la comparación de los modos de oscilación para cada uno de los métodos de optimización.

3.5.1.1 Modo Oscilación Local 1

En inicio este modo se había considerado como problema ya que su razón de amortiguamiento se encontraba por debajo del límite que se había establecido, como se observa en la tabla (3.17), al realizar el proceso de optimización de los estabilizadores de potencia de las máquinas que participaban en el modo, se obtuvieron resultados que reflejan una clara mejoría en cuanto a incremento del amortiguamiento del modo de oscilación.

Tabla 3.17 Resultados modos de oscilación local 1

MODO DE OSCILACIÓN LOCAL 1				
Método Sintonización	Modo	Damped Frequency	Damping Ratio	Damping Ratio
		[Hz]	[-]	[%]
Sin Sintonizar	Mode 00013	2,1082	0,0987	9,8659
	Mode 00014	2,1082	0,0987	9,8659
MVMO	Mode 00019	2,1788	0,2150	21,5039
	Mode 00020	2,1788	0,2150	21,5039
PSO	Mode 00015	2,9736	0,4257	42,5677
	Mode 00016	2,9736	0,4257	42,5677

La comparación permite determinar, cómo se observa en la gráfica, que el porcentaje de amortiguamiento se incrementa considerablemente en ambos métodos, recalando que en el caso del algoritmo PSO llega a un valor superior que en el caso del algoritmo MVMO, lo que muestra que en este caso la optimización por enjambre de partículas genera mejores resultados.

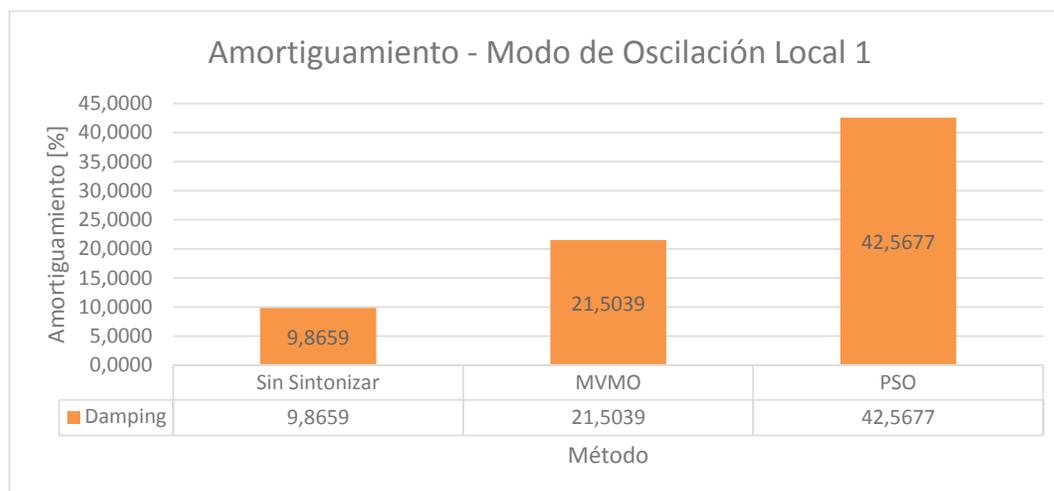


Figura 3.22 Diagrama de barras comparativo

Es conveniente analizar el porcentaje de incremento en el amortiguamiento de los modos de oscilación, para realizar una evaluación de cuál método ofrece mejores resultados, se presenta a continuación el detalle del incremento obtenido para cada uno de los métodos de optimización aplicados.

Tabla 3.18 Comparación resultados modos de oscilación local 1

MODO DE OSCILACIÓN LOCAL 1				
Método Sintonización	Modo	Damping Ratio	Damping Ratio	Incremento Amortiguamiento
		[-]	[%]	[%]
MVMO	Mode 00019	0,2150	21,5039	11,6381
	Mode 00020	0,2150	21,5039	11,6381
PSO	Mode 00015	0,4257	42,5677	32,7018
	Mode 00016	0,4257	42,5677	32,7018

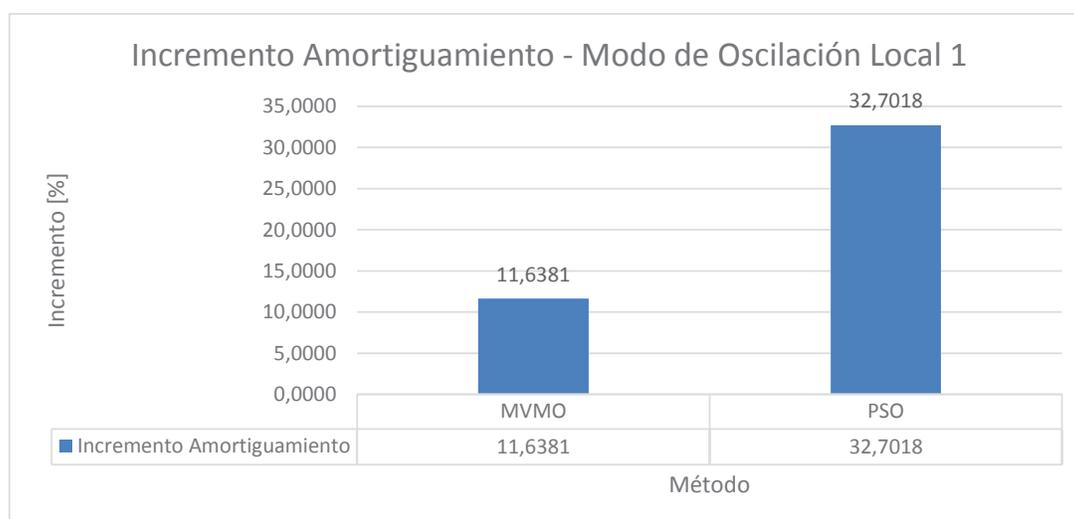


Figura 3.23 Diagrama de barras comparativo

Se observa que para el primer modo en estudio el método PSO incrementa en mayor porcentaje el amortiguamiento.

3.5.1.2 Modo Oscilación Local 2

Al igual que el anterior modo de oscilación éste presentaba un amortiguamiento muy por debajo del límite, al aplicar los métodos de optimización para los estabilizadores de potencia de las máquinas que participaban en el modo, se obtuvieron resultados muy buenos tomando en cuenta que la razón de amortiguamiento se incrementó a valores sobre el 15% como se observa en la tabla (3.19).

Tabla 3.19 Resultados modos de oscilación local 2

MODO DE OSCILACIÓN LOCAL 2				
Método Sintonización	Modo	Damped Frequency	Damping Ratio	Damping Ratio
		[Hz]	[-]	[%]
Sin Sintonizar	Mode 00015	1,3766	0,0542	5,4152
	Mode 00016	1,3766	0,0542	5,4152
MVMO	Mode 00021	1,3780	0,1620	16,2018
	Mode 00022	1,3780	0,1620	16,2018
PSO	Mode 00017	1,9468	0,1534	15,3383
	Mode 00018	1,9468	0,1534	15,3383

En este caso se tiene que la aplicación del método MVMO generó resultados con una ligera mejoría que en el caso del algoritmo PSO, como se muestra en la figura (3.24).

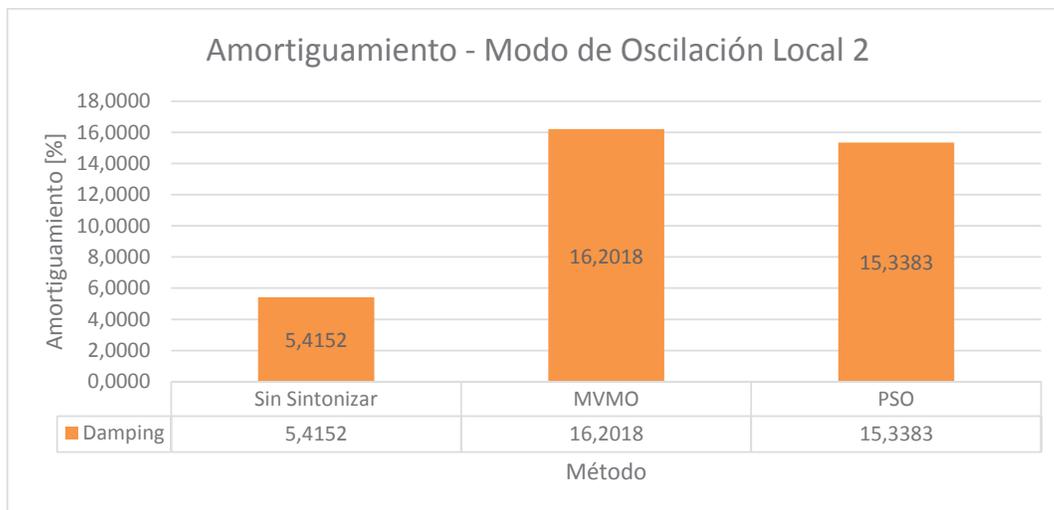


Figura 3.24 Diagrama de barras comparativo

Adicionalmente si bien en el segundo modo de oscilación en análisis el incremento del amortiguamiento es mayor para el método MVMO, la diferencia con el PSO no es tan amplia como se observa en la tabla y la gráfica siguientes. En este punto es importante destacar que el valor inicial del amortiguamiento de este modo estaba muy por debajo del caso del primer modo, por lo que el incremento que consigue el MVMO es más notable.

Tabla 3.20 Comparación resultados modos de oscilación local 2

MODO DE OSCILACIÓN LOCAL 2				
Método Sintonización	Modo	Damping Ratio	Damping Ratio	Incremento Amortiguamiento
		[-]	[%]	[%]
MVMO	Mode 00021	0,1620	16,2018	10,7865
	Mode 00022	0,1620	16,2018	10,7865
PSO	Mode 00017	0,1534	15,3383	9,9230
	Mode 00018	0,1534	15,3383	9,9230

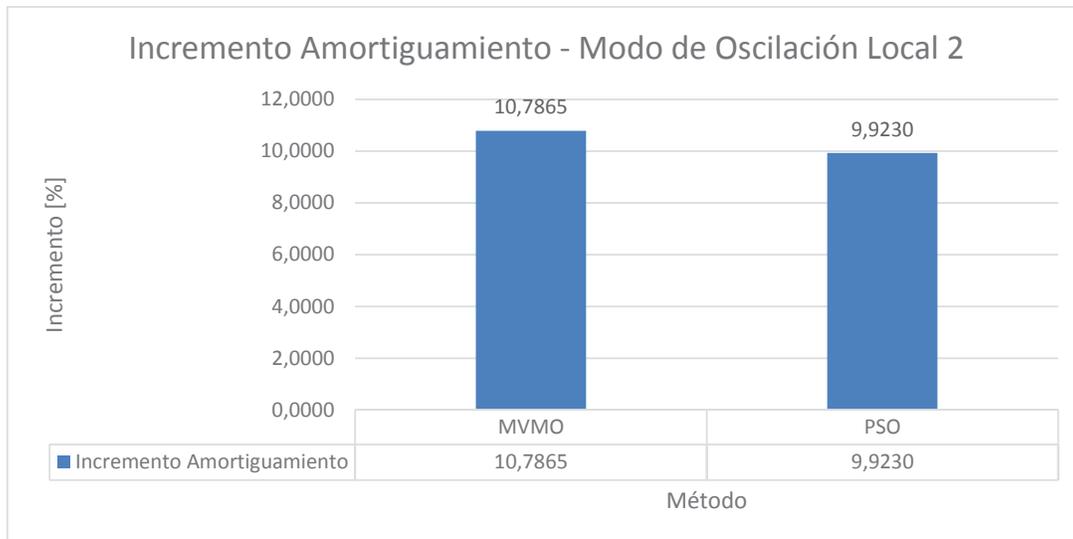


Figura 3.25 Diagrama de barras comparativo

Con los resultados obtenidos se tiene que hacer un análisis comparativo muy detallado para determinar qué método ofrece mejor accionar sobre el sistema, desde este punto de vista al tener que el PSO alcanza valores de amortiguamiento relativamente superiores que en el caso del MVMO, se puede aseverar que el algoritmo PSO actúa de mejor manera. Es importante realizar adicionalmente una evaluación en cuanto a respuesta de transitorios electromecánicos para poder realizar una mejor comparación de los métodos.

3.5.2 ANÁLISIS DINÁMICO DEL SISTEMA

Para establecer una comparación entre los métodos de optimización utilizados es necesario verificar la respuesta que tiene el sistema ante eventos transitorios, con esta información se puede deducir qué método brinda mayor número de mejoras al sistema de pruebas.

En esta sección se procede al análisis de una de las máquinas del sistema (Generador 1), la información restante de las otras máquinas se encuentra en el Anexo 1.

3.5.2.1 Voltaje Terminal

En las gráficas de la figura (3.26 y 3.27) se muestra la comparativa detallada de los métodos de optimización utilizados.

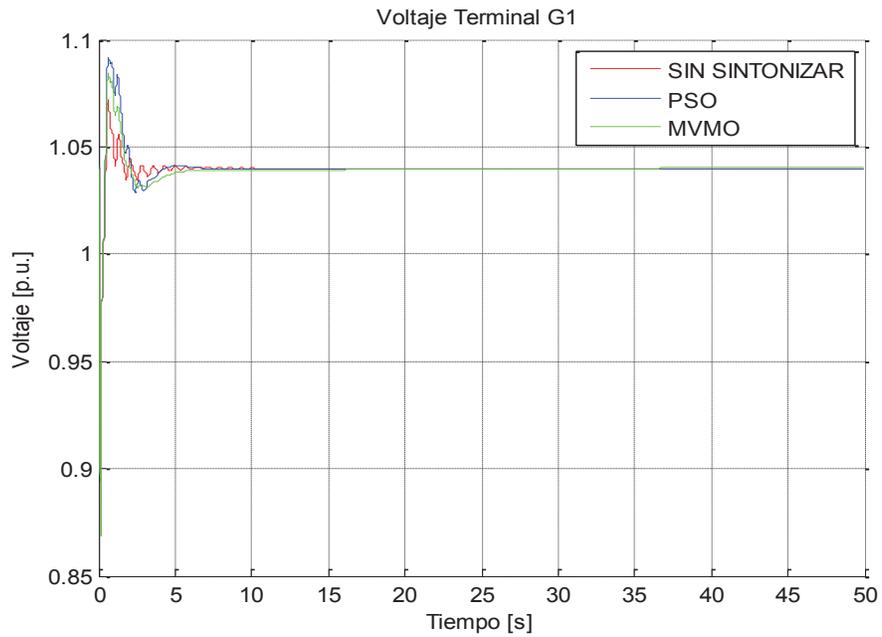


Figura 3.26 Respuesta de voltaje terminal G1

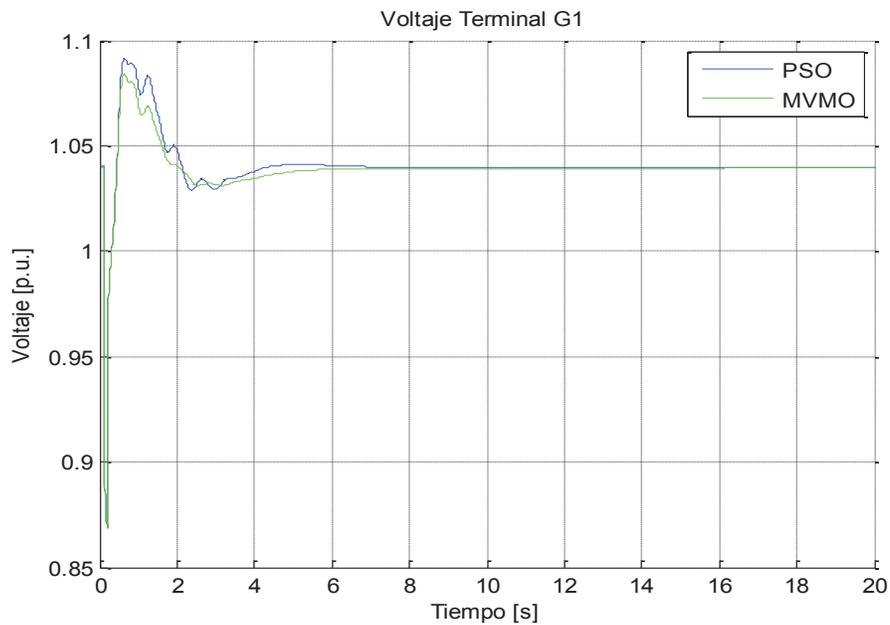


Figura 3.27 Respuesta de voltaje terminal G1

La respuesta de voltaje ante el evento transitorio para los métodos PSO y MVMO es similar, los tiempos de estabilización se dan en el mismo rango y los picos de las oscilaciones no difieren mucho en su magnitud, centrándose en la comparación en este caso se puede decir que la respuesta del MVMO es mejor que la respuesta del PSO, sin embargo la diferencia no es relativamente significativa.

3.5.2.2 Frecuencia Eléctrica

En las gráficas de la figura (3.28 y 3.29) se muestra la comparación detallada de los métodos de optimización utilizados.

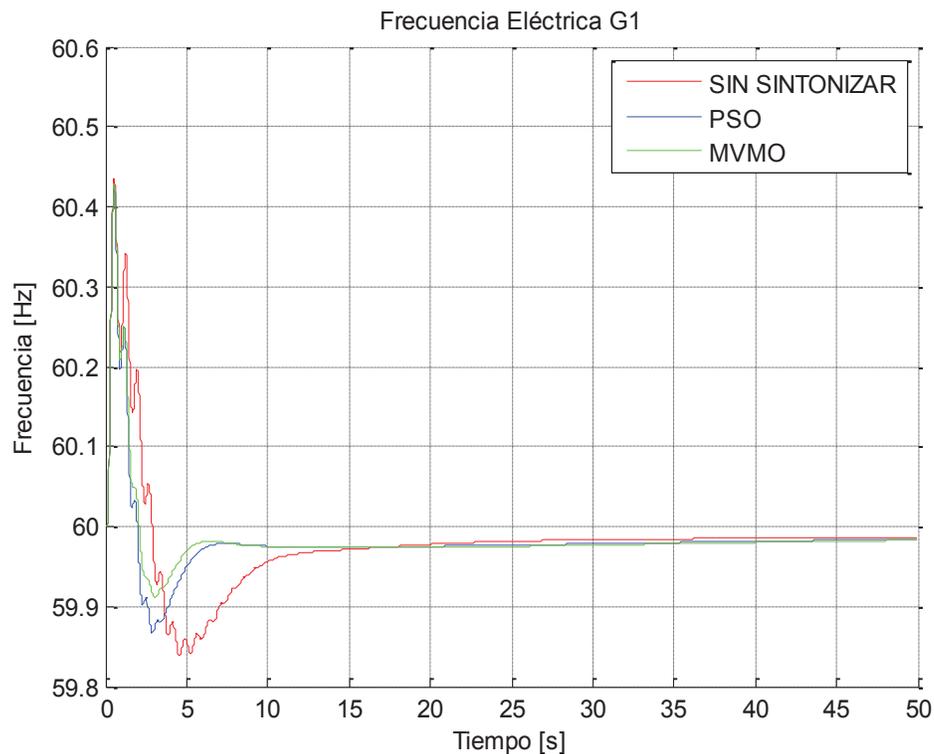


Figura 3.28 Respuesta de Frecuencia Eléctrica G1

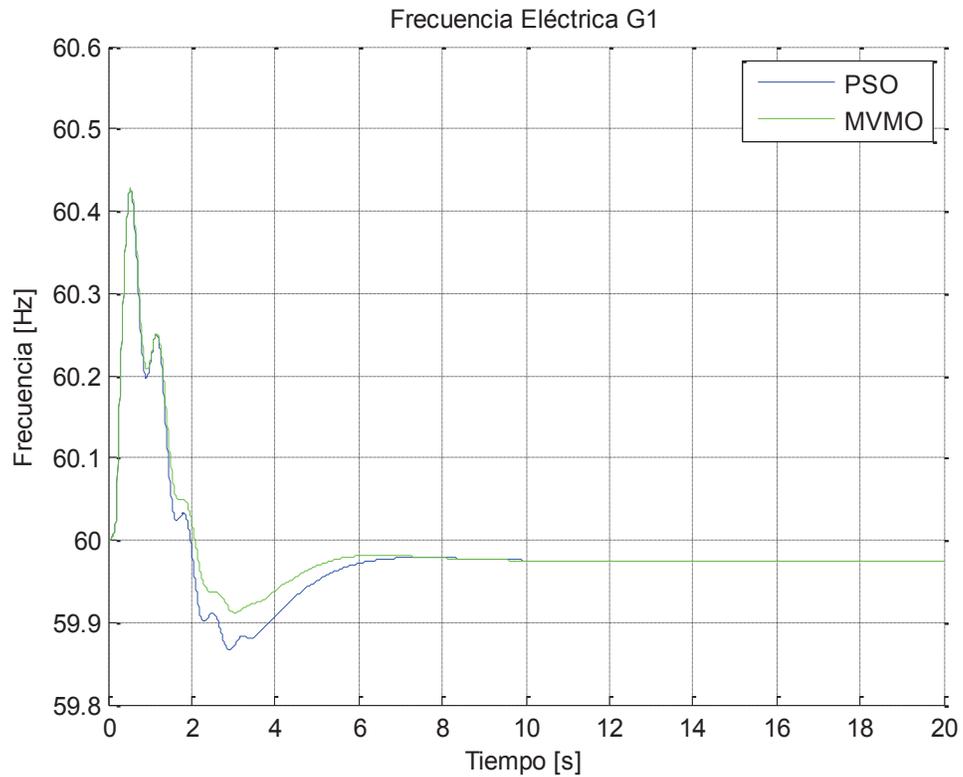


Figura 3.29 Respuesta de Frecuencia Eléctrica G1

En el caso de la frecuencia eléctrica se tiene que la respuesta al aplicar el algoritmo MVMO es ligeramente mejor que en el caso del PSO, puesto que si bien los tiempos de estabilización son similares se aprecia diferencias en los picos de las oscilaciones, siendo la respuesta del MVMO la que presenta picos de menor magnitud haciendo que la frecuencia oscile en menor medida.

3.5.2.3 Potencia Activa

En las gráficas de las figuras (3.30 y 3.31) se muestra la comparativa detallada de los métodos de optimización utilizados.

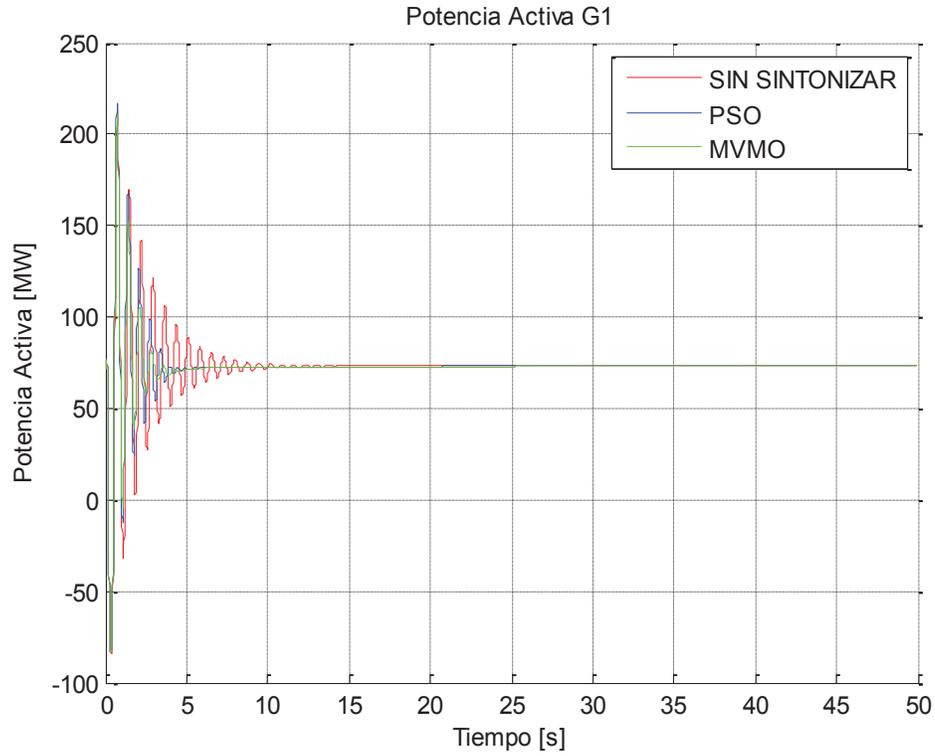


Figura 3.30 Respuesta de Potencia Activa G1

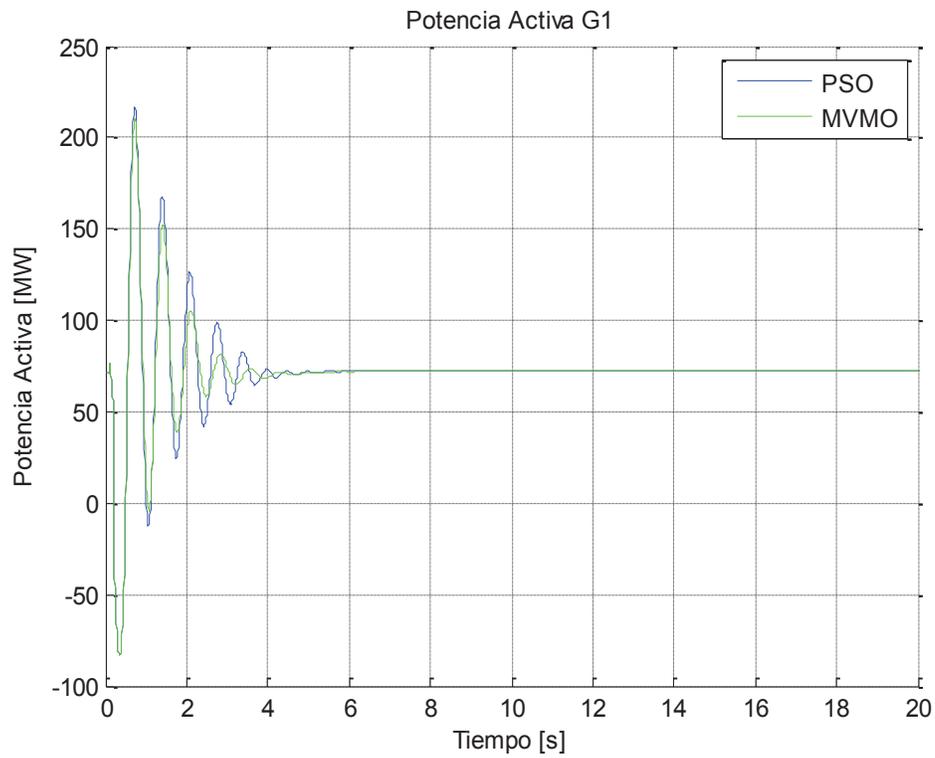


Figura 3.31 Respuesta de Potencia Activa G1

Las oscilaciones de potencia activa tienen una respuesta similar para ambos métodos, ligeramente la respuesta del algoritmo MVMO es mejor que la del PSO debido a que las magnitudes de los picos son menores y la estabilización de la respuesta también tiene una pequeña mejoría.

3.5.2.4 Potencia Reactiva

En las gráficas de las figuras (3.32 y 3.33) se muestra la comparación detallada de los métodos de optimización utilizados.

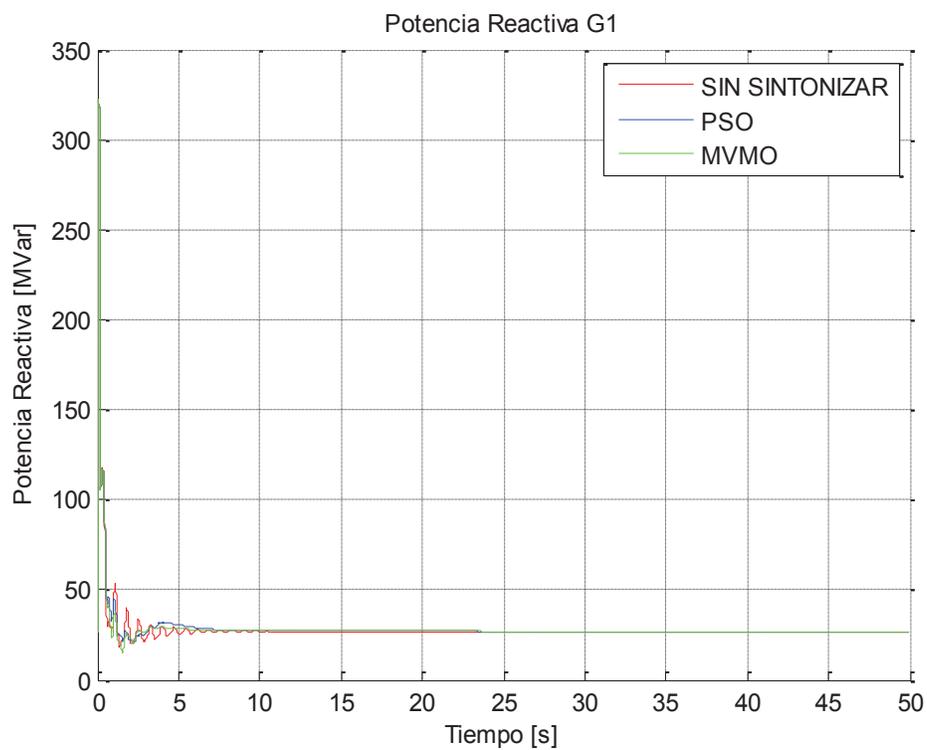


Figura 3.32 Respuesta de Potencia Reactiva G1

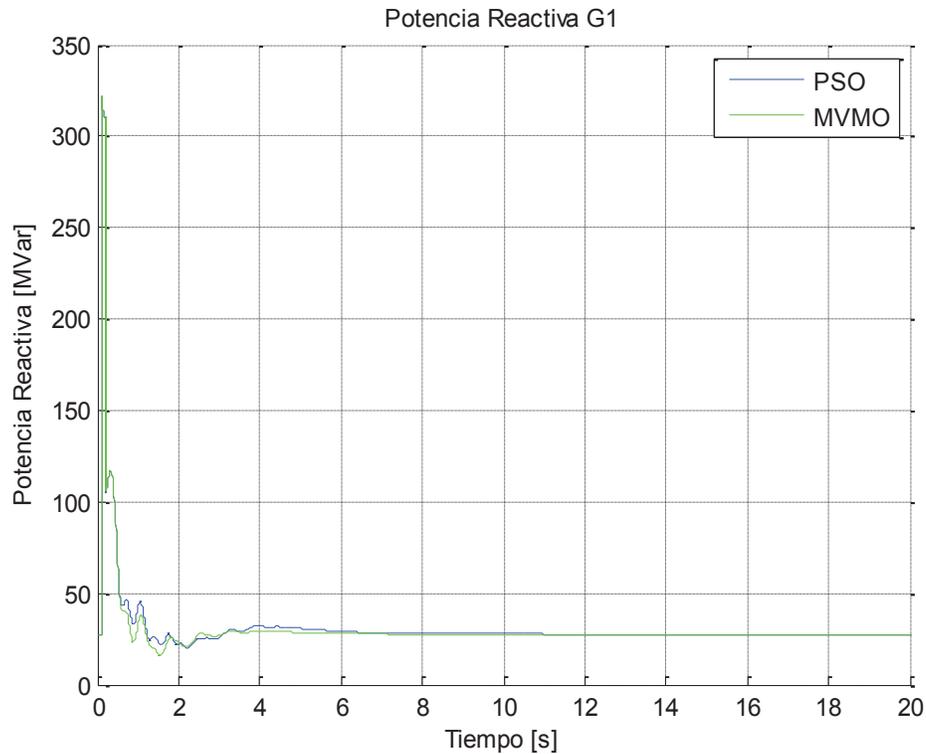


Figura 3.33 Respuesta de Potencia Reactiva G1

La potencia reactiva tiene una mejor respuesta para el algoritmo MVMO, dado que su comportamiento es similar a los anteriores casos, en donde tiempos de estabilización y picos de las oscilaciones muestran una ligera mejoría con respecto al PSO.

Con la información obtenida de las gráficas se puede llegar a asegurar que la respuesta que ofrece el sistema ante la calibración de PSSs con el método MVMO tiene mejorías en cuanto a respuesta de transitorios electromecánicos con respecto a la respuesta que ofrece el algoritmo PSO.

3.5.3 ANÁLISIS DE CONVERGENCIA Y TIEMPOS DE EJECUCIÓN

Para el análisis de convergencia de los algoritmos en estudio se procede a graficar el proceso de convergencia de cada uno de los algoritmos respectivamente como se muestran en las figuras (3.34 y 3.35).



Figura 3.34 Evolución función objetivo algoritmo MVMO

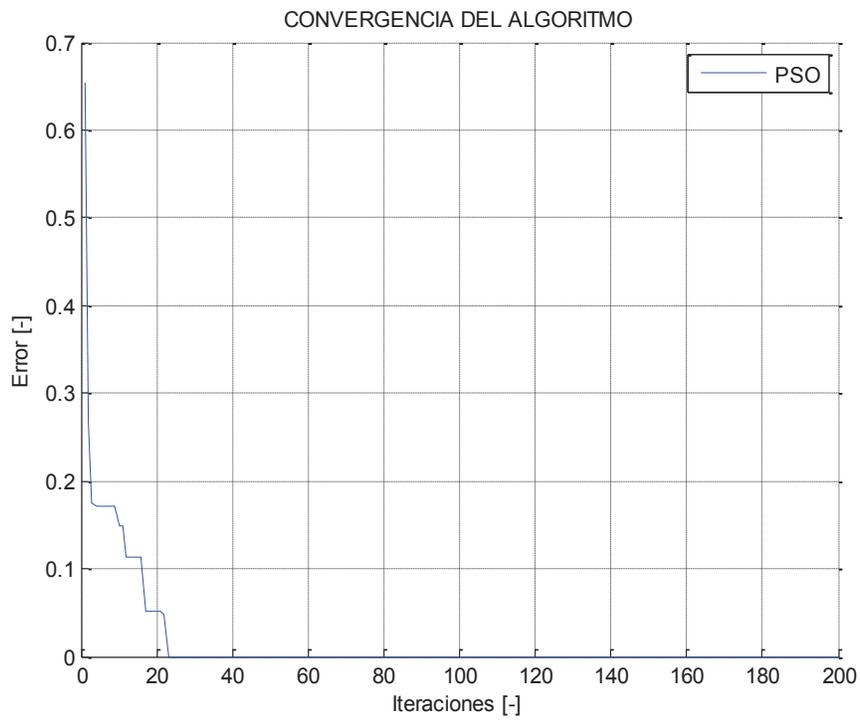


Figura 3.35 Evolución función objetivo algoritmo PSO

Para poder analizar la convergencia de los algoritmos se procede a realizar un acercamiento en la figura (3.36) para que se observe de mejor manera el proceso de convergencia de cada uno de los algoritmos en un rango comparativo.

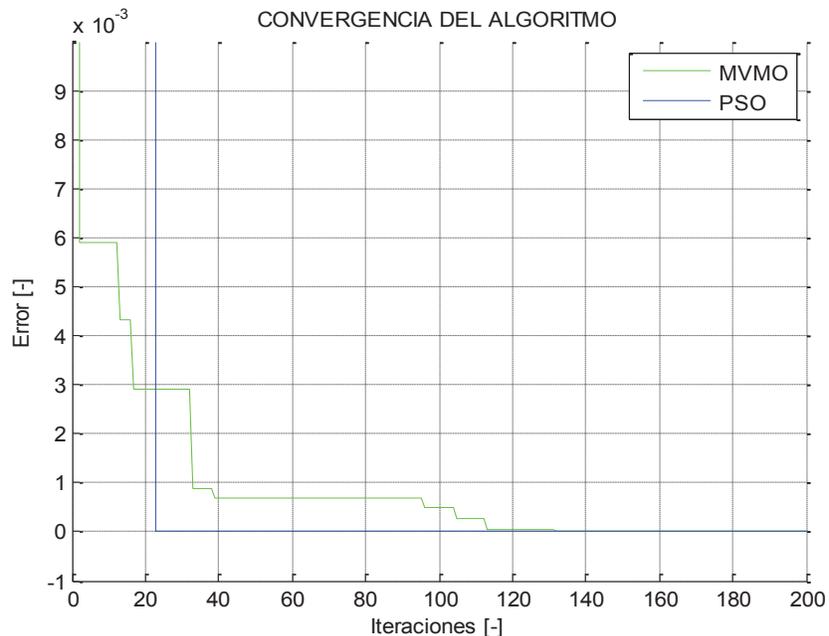


Figura 3.36 Comparación Evolución función objetivo algoritmo MVMO y PSO

El algoritmo MVMO tiene una convergencia que tarda un número mayor de iteraciones ya que para aproximarse al objetivo son necesarias alrededor de 115, es decir el proceso de búsqueda de soluciones requiere un número alto de iteraciones para este algoritmo.

En el caso del algoritmo PSO se requieren alrededor de 25 iteraciones lo que implica que el proceso de búsqueda de la solución del problema requiere un menor número de iteraciones que en el caso del MVMO.

Para poder analizar los tiempos de ejecución de los métodos de optimización en estudio, es necesario encontrar una tendencia de los algoritmos para aproximarse a la solución ya que de esto dependerá la comparación de los tiempos, en este caso al haber determinado un número aproximado de iteraciones que requiere cada programa se procede a realizar la comparación que se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 3.21 Comparación tiempos de ejecución

TIEMPO DE EJECUCIÓN DE LOS ALGORITMOS			
Método Sintonización	Tiempo	Iteraciones necesarias para alcanzar objetivo	Iteraciones utilizadas en el algoritmo
	[s]		
MVMO	29,022	Entre 100 a 300	250
PSO	13,9	Entre 25 a 50	50

La comparación se establece a partir del número de iteraciones que necesita cada programa, si se analiza la ejecución de cada uno se observa que en alrededor de 50 iteraciones el algoritmo PSO requiere aproximadamente 14 segundos, mientras que el MVMO tarda cerca de 29 segundos para iterar alrededor de 250 veces, por lo que se puede definir desde este punto de vista que el algoritmo PSO tiene un tiempo mayor de ejecución en comparación con el tiempo del algoritmo MVMO

En síntesis, el MVMO tiene un tiempo de ejecución menor pero su convergencia se da en un mayor número de iteraciones, mientras que el PSO tiene un tiempo mayor de ejecución, pero su convergencia requiere menor cantidad de iteraciones, esto es muy relevante ya que al realizar una comparación de todos los aspectos tanto de análisis de pequeña señal y respuesta a transitorios electromecánicos se puede indicar que para el sistema de prueba en análisis el algoritmo MVMO ofrece mejores resultados.

CAPÍTULO IV

4 APLICACIÓN PRÁCTICA DE LOS ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN MVMO Y PSO EN EL SNI 2018

Debido al cambio en la matriz energética que ha impulsado el gobierno actual con la construcción de nuevas centrales hidroeléctricas en diferentes zonas del país, así como la expansión del sistema nacional de transmisión, se establece la necesidad de mejorar su estabilidad ante perturbaciones electromecánicas o de pequeña señal.

El presente capítulo tiene como objetivo el desarrollo de los sistemas de control de las nuevas unidades de generación que entraron en funcionamiento en 2016 y otras que todavía se están desarrollando hasta 2018 como año horizonte, posteriormente con la base de datos validada se procede a la aplicación de los algoritmos de optimización MVMO y PSO para la sintonización de los estabilizadores de potencia del sistema.

4.1 ACONDICIONAMIENTO DE LA BASE DE DATOS

A partir de una base de datos validada hasta el año 2015 con modelos de control correctamente funcionales se inicia la inclusión de las nuevas centrales, así como el incremento en la demanda tomando en cuenta cambios en la topología de la red y la inclusión de nuevos elementos tanto estáticos como dinámicos, es importante considerar que en la expansión de la base de datos el sistema colombiano no tendrá cambios.

En primera instancia los modelos de control serán probados en una red en isla para su posterior inclusión al sistema y puesta en funcionamiento. Para fines ilustrativos se explicará en esta sección el desarrollo de los modelos de control de las unidades de Delsintanisagua.

4.1.1 DESARROLLO DE MODELOS DE CONTROL INDIVIDUALES DE LAS NUEVAS CENTRALES DE GENERACIÓN

De acuerdo en la metodología desarrollada en la referencia [18] se procedió en primera instancia a la recolección de información de los proyectos hidroeléctricos que han sido y van a ser ejecutados, de acuerdo a la información facilitada por las instituciones CENACE y CELEC EP TRANSELECTRIC se han desarrollado los modelos de las siguientes centrales de generación.

Tabla 4.1 Centrales hidroeléctricas

Nombre Central	Ubicación	Zona SNI	Potencia Instalada MW
Coca Codo Sinclair	Napo Sucumbíos	Zona SNI	1500
Sopladora	Azuay Morona Santiago	Zona SNI	487
Toachi Pilatón	Pichincha Cotopaxi Sto. Domingo	Zona SNI	253
Minas- San Francisco	Azuay	Zona SNI	270
Delsintanisagua	Zamora Chinchipe	Zona SNI	115
Manduriacu	Pichincha Sto. Domingo	Zona Sto Domingo - Quevedo	60

4.1.1.1 Metodología para el modelamiento de los sistemas de control ^[10]

El modelamiento en DigSilent PowerFactory de los sistemas de control de una unidad de la Central Delsintanisagua se presenta a continuación, con el fin de mostrar un ejemplo práctico de la aplicación de la metodología en el desarrollo de los modelos de las demás centrales a incorporar en la base de datos del SNI 2018. La información de los modelos se encuentra en el anexo digital (2.1).

En la figura (4.1) se muestra la red que se utilizó para la realización de las diferentes pruebas en isla para validar los sistemas de control implementados, así como para realizar su respectivo afinamiento.

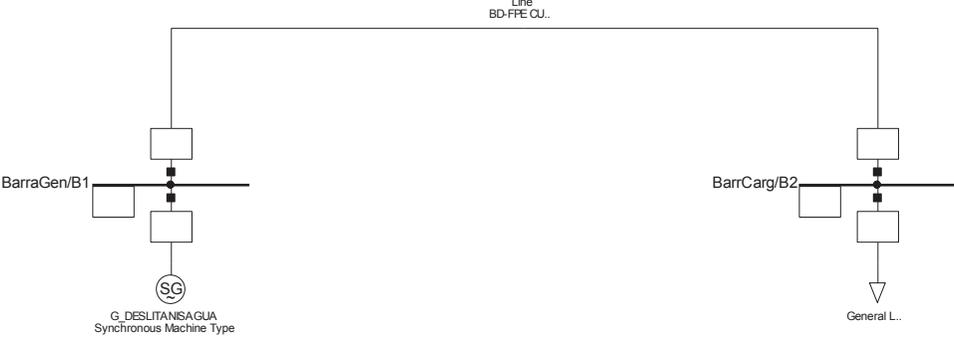


Figura 4.1 Red de prueba para validación del generador de la central Hidroeléctrica Delsintanisagua

4.1.1.1.1 Modelamiento del Regulador de Voltaje (AVR)

El diagrama de bloques implementado es presentado en la figura (4.2), este sistema de excitación tiene un control por realimentación, regulando así el voltaje de campo del generador ante una perturbación en su entrada.

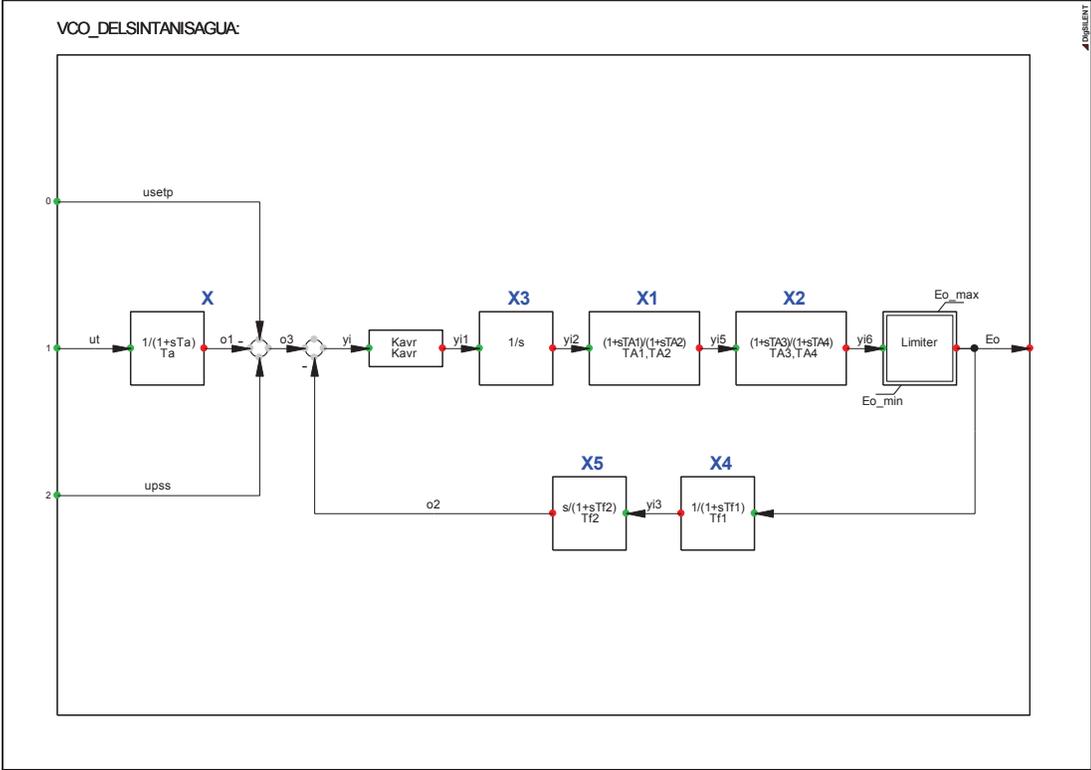


Figura 4.2 Diagrama de bloques del modelo del AVR implementado en unidades de la central Delsintanisagua.

Los parámetros calibrados inicialmente en el modelo (common model) del regulador de voltaje se obtuvieron de información referencial de fabricantes, para posteriormente ser afinados de acuerdo a las pruebas realizadas. Los valores obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 4.2 Parámetros del AVR en unidades de la central Delsintanisagua.

Parámetro	Valor	Unidad	Descripción
Tf1	1	[s]	Constante de tiempo del VCO
Tf2	0,05	[s]	Constante de tiempo 2 del VCO
Kavr	30	[-]	Ganancia del AVR
TA1	8,5	[s]	Constante de tiempo del primer bloque adelanto/atraso
TA2	2	[s]	Constante de tiempo del primer bloque adelanto/atraso
Ta	0,001	[s]	Constante de tiempo del generador
TA3	8,5	[s]	Constante de tiempo del segundo bloque adelanto/atraso
TA4	2	[s]	Constante de tiempo del segundo bloque adelanto/atraso
Eo_min	-10	[p.u.]	Límite mínimo de la salida
Eo_max	10	[p.u.]	Límite máximo de la salida

4.1.1.1.2 Modelamiento de la excitatriz

Para una mejor respuesta del sistema de control del AVR, se modela la excitatriz con bloques limitadores y de ganancia para mejorar la señal antes de alimentar al campo del generador, el diagrama de bloques y los parámetros utilizados se detallan a continuación.

Tabla 4.3 Parámetros del control de la excitatriz en unidades de la central Delsintanisagua.

Parámetro	Valor	Unidad	Descripción
E1	7,403	[-]	Factor 1 de saturación
E2	9,87	[-]	Factor 3 de saturación
SE1	0,242	[-]	Factor 2 de saturación
SE2	1,537	[-]	Factor 4 de saturación
Ke	8,26	[s]	Ganancia de la excitatriz
T	1	[s]	Constante de tiempo del control integral
Te	0	[s]	Constante de tiempo de la excitatriz

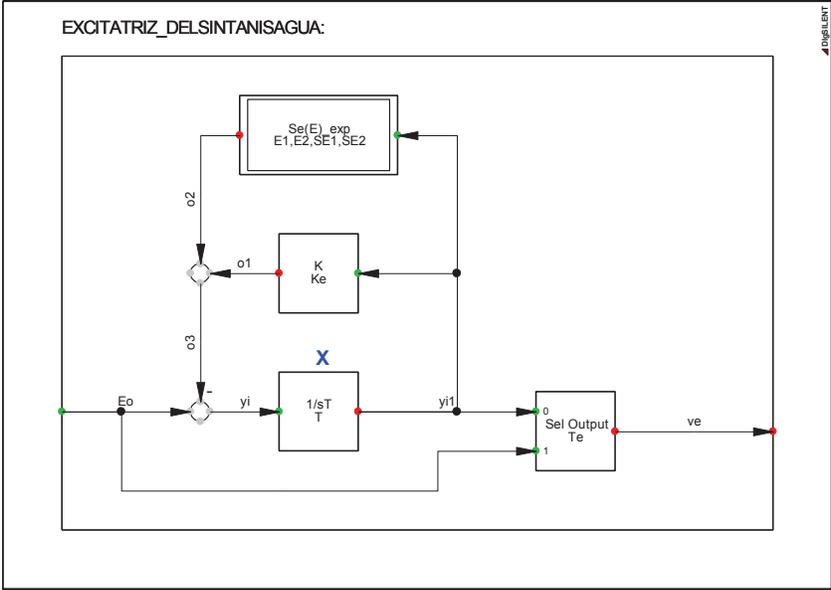


Figura 4.3 Diagrama de bloques del modelo de la excitatriz implementada en unidades de la central Delsintanisagua.

4.1.1.1.3 Modelamiento del regulador de velocidad (PCU)

Para las unidades de la central Delsintanisagua se modela un control de velocidad como el que se detalla en el diagrama de bloques de la figura 4.4.

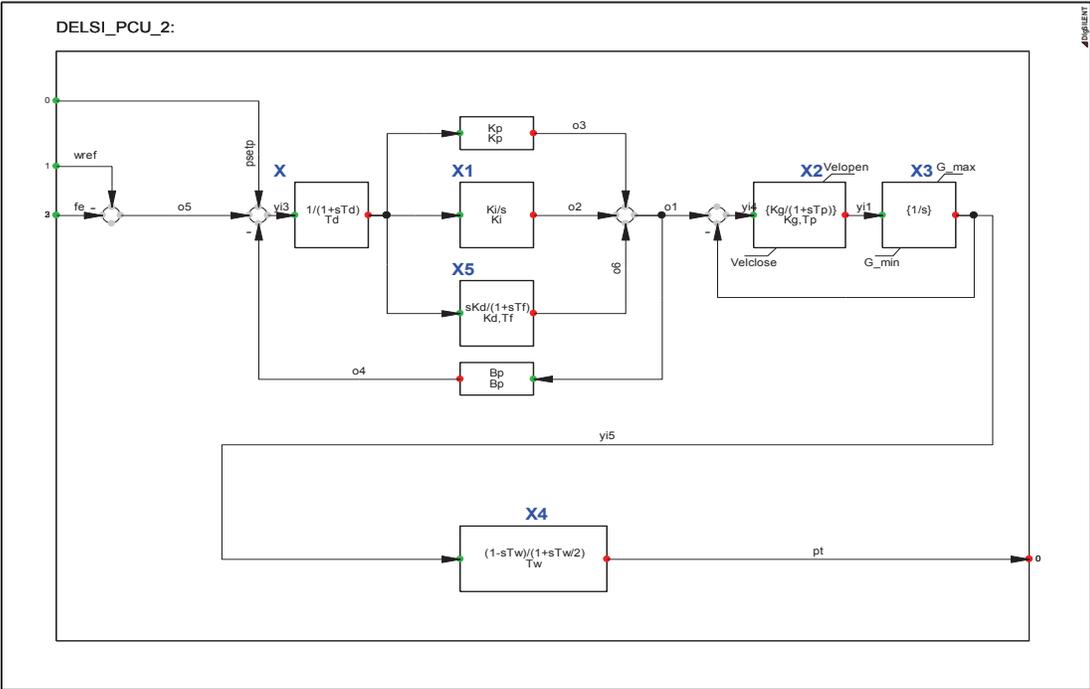


Figura 4.4 Diagrama de bloques del modelo del PCU implementado en unidades de la central Delsintanisagua.

Se puede observar que contiene una etapa de control por medio del PID con una realimentación para la actuación de dicho control, luego se tiene la etapa de control de apertura y cierre de compuerta para finalmente pasar al bloque de la turbina.

Los valores configurados en el modelo (Common Model) de este control se muestran en la tabla (4.4), estos valores fueron sintonizados de acuerdo a las pruebas realizadas para este modelo, las cuales se detallan posteriormente en la sección (4.1.1.2).

Tabla 4.4 Parámetros del control de velocidad en unidades de la central Delsintanisagua.

Parámetro	Valor	Unidad	Descripción
Kp	6	[-]	Ganancia Proporcional
Ki	1,2	[-]	Ganancia Integral
Bp	0,001	[-]	Estatismo
Kg	5	[-]	Ganancia de las válvulas
Tp	0,01	[s]	Constante de tiempo 2
Td	0,02	[s]	Constante de tiempo 1
Tw	0,5	[s]	constante de tiempo de arranque del agua
Kd	3	[-]	Ganancia diferencial
Tf	0,01	[s]	Constante de tiempo 3
G_min	0	[p.u.]	Apertura mínima
Velclose	-1	[-]	Velocidad de cierre
G_max	1	[p.u.]	Apertura máxima
Velopen	0,05	[-]	Velocidad de apertura

4.1.1.1.4 Modelamiento del estabilizador de potencia (PSS)

El modelamiento del PSS de esta unidad consta de bloques de ganancia, redes de adelanto-atraso, bloque wash-out y limitadores como se puede observar en la figura (4.5).

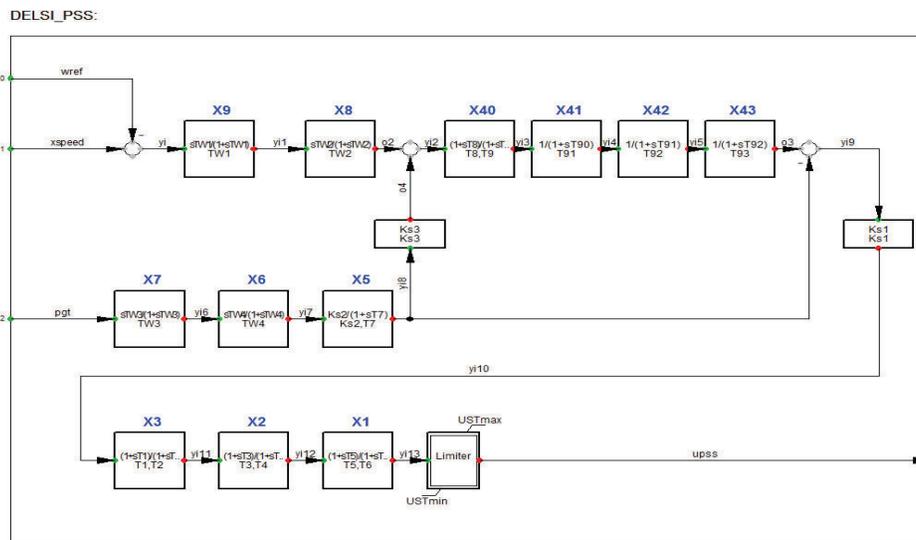


Figura 4.5 Diagrama de bloques del modelo del PSS implementado en unidades de la central Delsintanisagua.

Los valores parametrizados del diagrama de bloques del PSS son obtenidos de la información referencial de fabricantes, cabe destacar que estos parámetros no se encuentran aún sintonizados.

Tabla 4.5 Parámetros del estabilizador de potencia en unidades de la central Delsintanisagua.

Parámetro	Valor	Unidad	Descripción
TW1	2	[s]	Constante de tiempo wash-out del canal de velocidad 1,10
TW2	2	[s]	Constante de tiempo wash-out del canal de potencia 1,30
T92	1	[s]	Constante de tiempo filtro de rampa 0.1,0.5
T93	1	[s]	Constante de tiempo filtro de rampa 0.1,0.5
T91	1	[s]	Constante de tiempo filtro de rampa 0.1,0.5
T8	0	[s]	Constante de tiempo filtro de rampa 0.2
T9	1	[s]	Constante de tiempo filtro de rampa 0.1,0.5
Ks1	5	[p.u.]	Ganancia del PSS 0,150
TW3	2	[s]	Constante de tiempo wash-out del canal de potencia 1,30
TW4	2	[s]	Constante de tiempo wash-out del canal de potencia 1,10
Ks2	0,2	[p.u.]	Ganancia del PSS 0,1
T7	2	[s]	Constante de tiempo del canal de potencia 1,30
Ks3	3,33	[p.u.]	Ganancia del PSS
T1	0,1768	[s]	Constante de tiempo (1) filtro de atraso/adelanto de fase 0.10
T2	1,5915	[s]	Constante de tiempo (1) filtro de atraso/adelanto de fase 0.015,3
T3	0,1768	[s]	Constante de tiempo (2) filtro de atraso/adelanto de fase 0.10
T4	1,5915	[s]	Constante de tiempo (2) filtro de atraso/adelanto de fase 0.015,3
T5	0,01	[s]	Constante de tiempo (3) filtro de atraso/adelanto de fase 0.10
T6	0,01	[s]	Constante de tiempo (3) filtro de atraso/adelanto de fase 0.015,3
USTmin	-0,1		
USTmax	0,1		

4.1.1.2 Pruebas de los modelos en isla ^[18]

Una vez construidos los modelos (Common Model) de los reguladores de Voltaje (AVR), Velocidad (PCU) y Estabilizadores de Potencia se unen en un marco general en donde se integran estos modelos con el generador, para esto se ha desarrollado el siguiente frame.

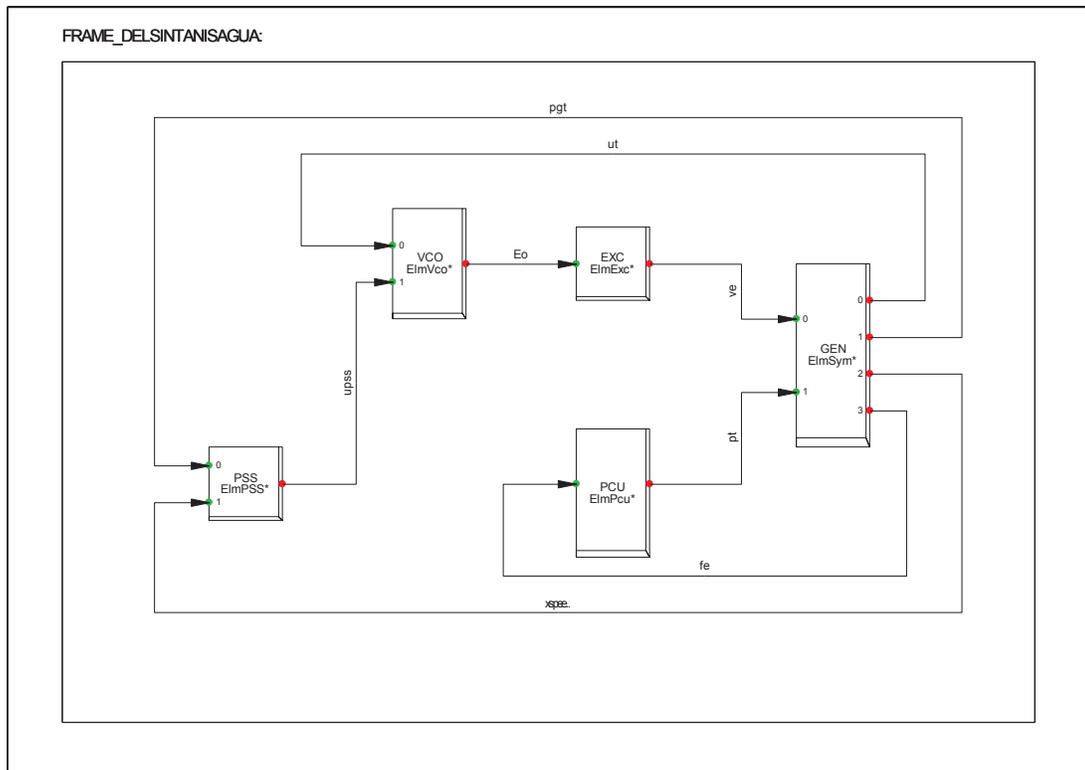


Figura 4.6 Frame implementado en unidades de la central Delsintanisagua.

4.1.1.2.1 Pruebas en estado estable

Con los modelos de los controladores activos se procede a simular la respuesta del sistema en condiciones normales, es decir sin ocurrencia de perturbaciones, la validación de que los modelos implementados funcionan correctamente en esta instancia se detalla en las gráficas (4.7 y 4.8), considerando un tiempo de simulación de 300 segundos.

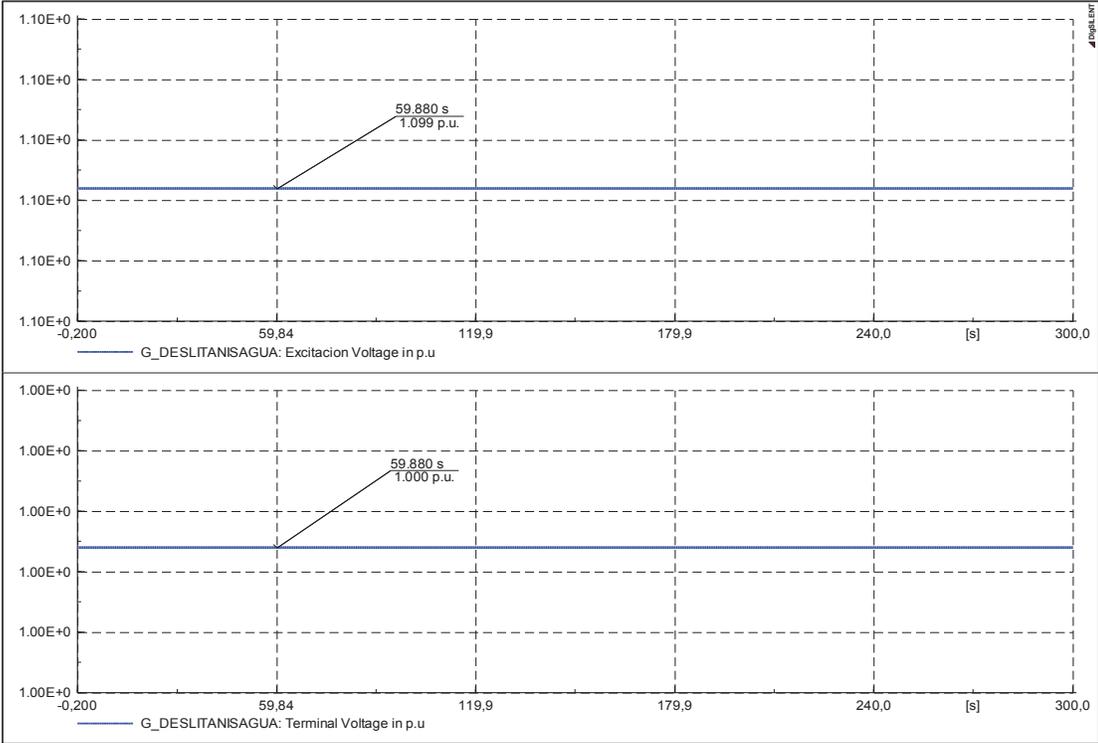


Figura 4.7 Pruebas del regulador de voltaje de la unidad de Delsintanisagua en estado estable.

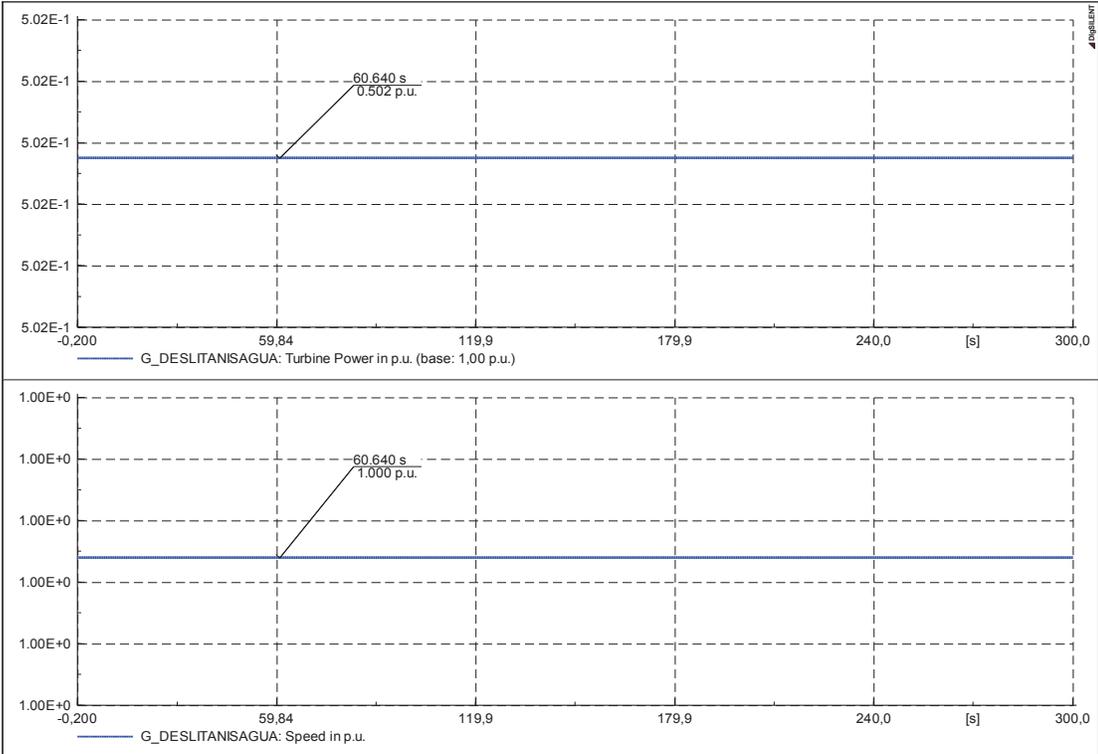


Figura 4.8 Pruebas del regulador de velocidad voltaje de la unidad de Delsintanisagua en estado estable.

Al analizar la respuesta en estado estable se observa claramente como en el transcurso del tiempo de simulación no existe ninguna variación en el valor de los resultados, debido a que los controladores en estado estable operan correctamente para el modelo.

4.1.1.2.2 Pruebas del regulador de voltaje (AVR)

Para esta prueba se varía la señal de referencia a la cual tiene que tender el voltaje de salida del controlador, dado que existe un cambio en forma de escalón en la entrada, se establece la actuación de todos los bloques del sistema de control.

Para esta prueba se varía la referencia de voltaje en un +/- 5%.

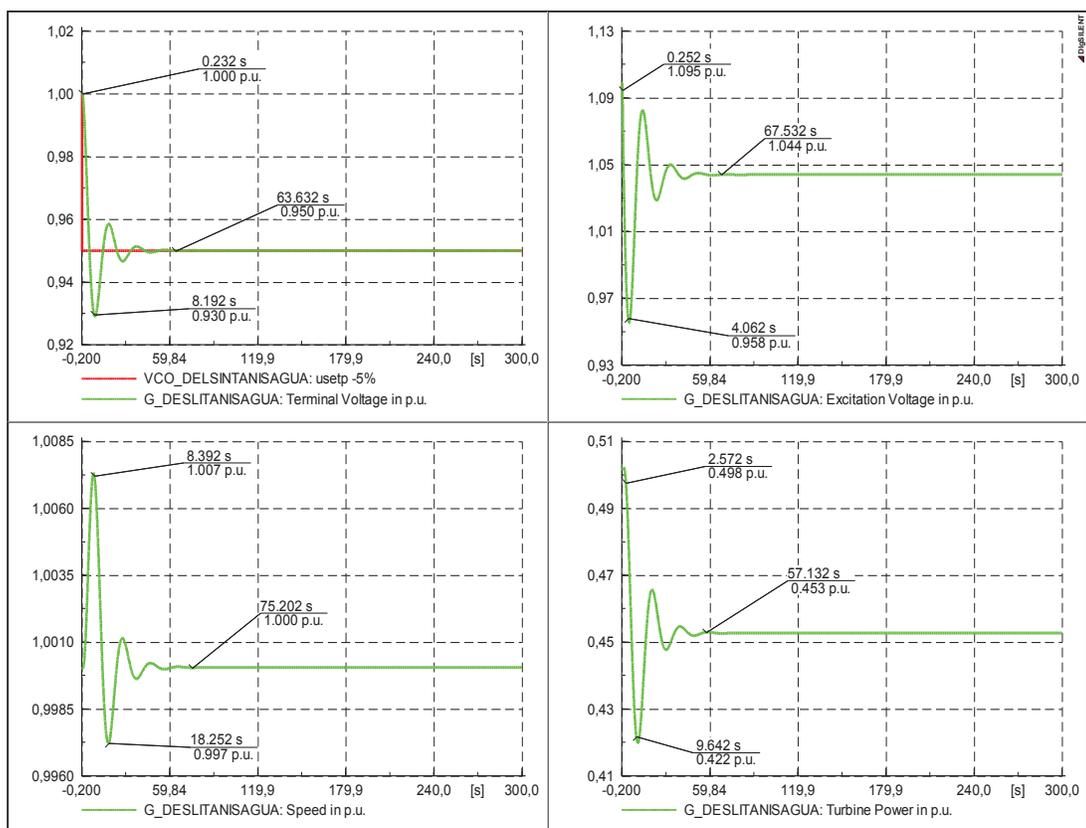


Figura 4.9 Prueba de escalón de voltaje de referencia -5% para el regulador de voltaje de Delsintanisagua.

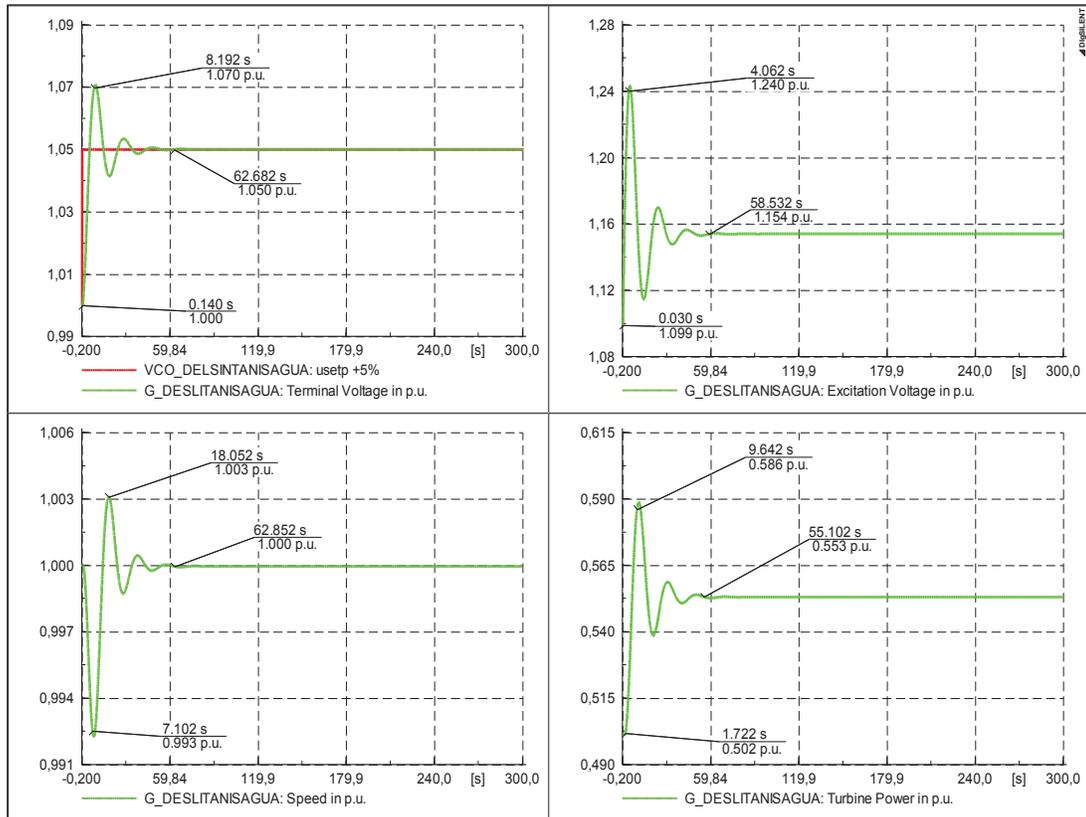


Figura 4.10 Prueba de escalón voltaje de referencia +5% para el regulador de voltaje de Delsintanisagua.

Se observa en las gráficas obtenidas que la actuación del AVR produce que el voltaje terminal llegue al valor de la señal de referencia establecida para la prueba, por lo que se puede conjeturar que el funcionamiento del controlador es correcto, adicionalmente se tiene que la respuesta de velocidad del generador también se ve alterada, por lo que el regulador de velocidad entra en operación consiguiendo que la señal se estabilice en un nuevo de operación normal.

4.1.1.2.3 Pruebas del regulador de velocidad (PCU)

La prueba consiste en dar una variación del +/- 5% a la señal de referencia para verificar que el controlador actúe correctamente haciendo que la velocidad se establezca en el valor de referencia al cual se escaló la señal.

En las figuras se presenta la respuesta de la velocidad del generador para esta prueba.

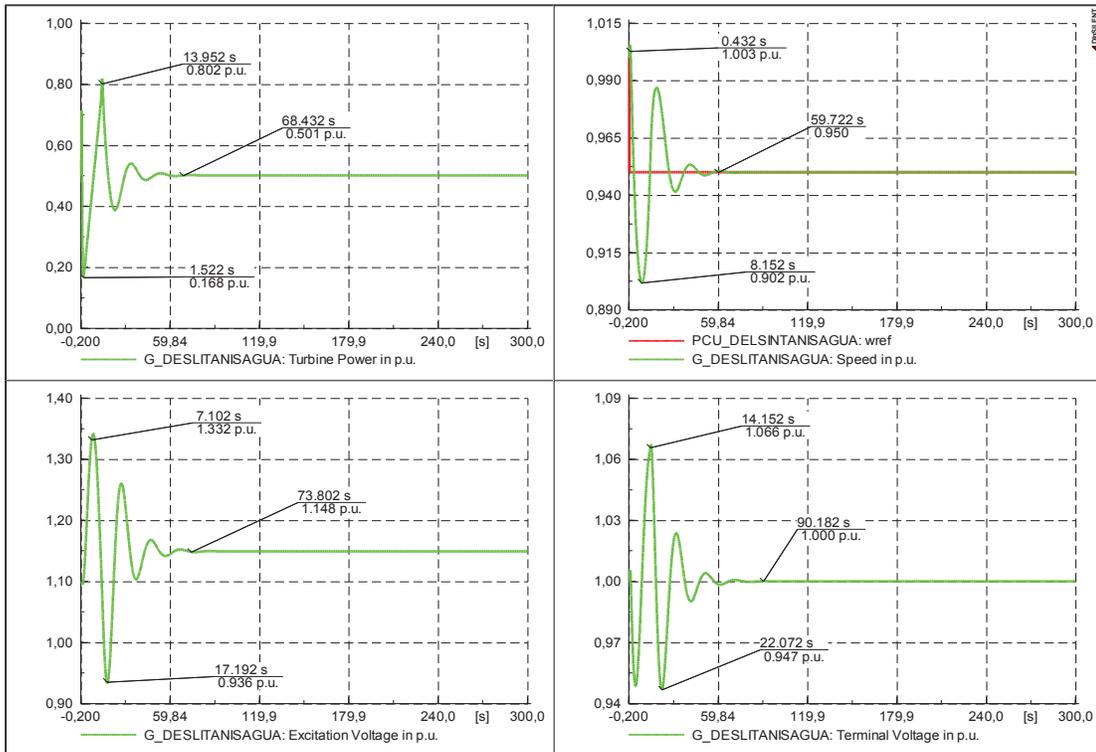


Figura 4.11 Prueba de escalón velocidad de referencia -5% regulador de velocidad de Delsintanisagua.

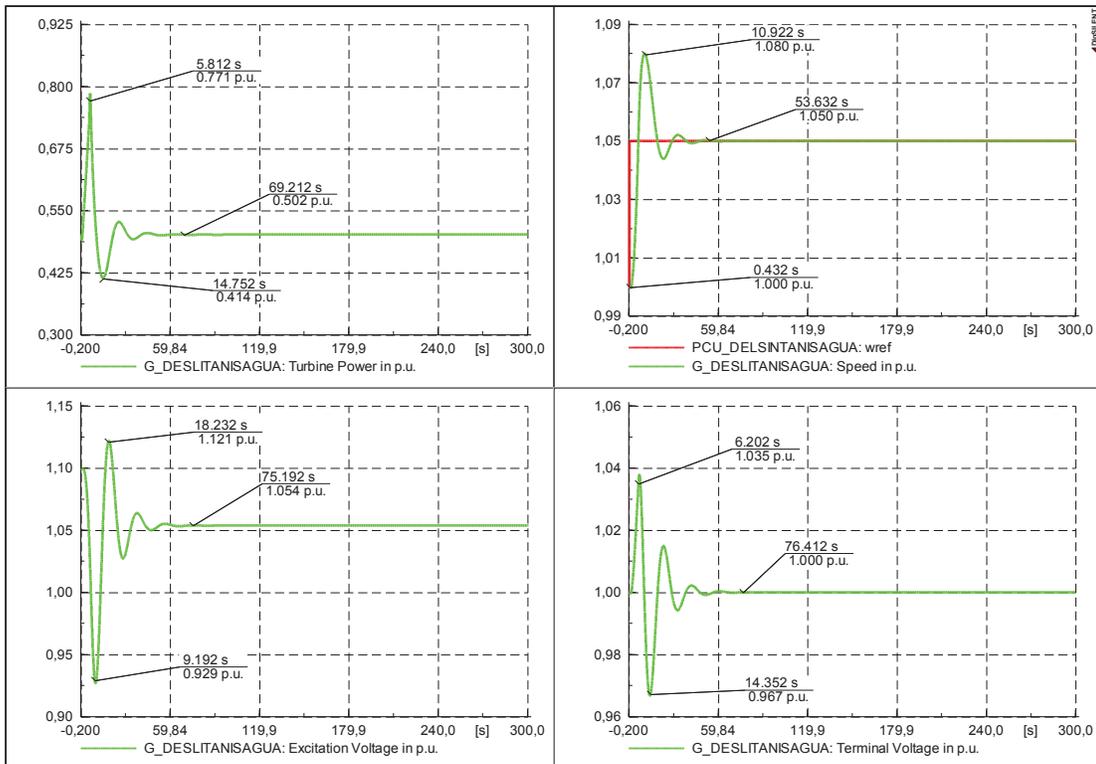


Figura 4.12 Prueba de escalón velocidad de referencia +5% regulador de velocidad de Delsintanisagua.

Analizando la respuesta obtenida se puede concluir que el controlador funciona correctamente ya que al variar la velocidad de referencia el PCU hace que la velocidad del generador se establezca en dicho valor en un tiempo determinado.

4.1.1.2.4 Rechazo de carga del 100%

Para realizar ésta prueba se produce un disparo total de la carga a la cual se abastece, siendo esta una perturbación en la cual tendrán que responder todos los controladores del generador.

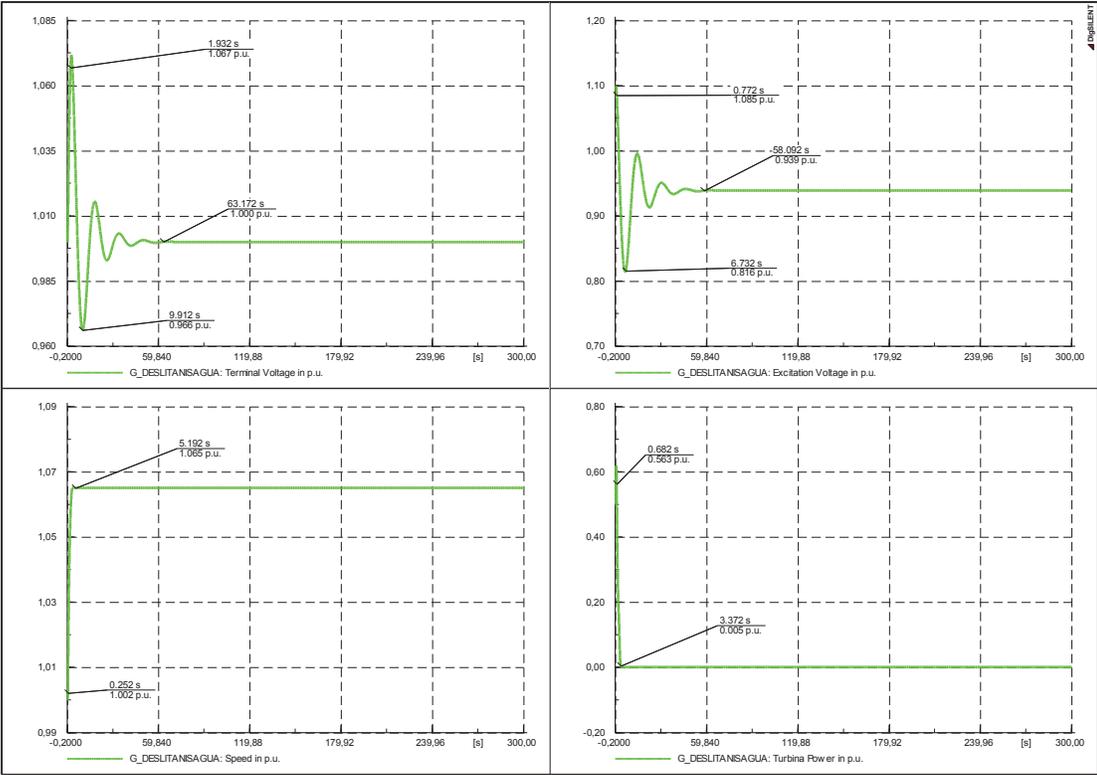


Figura 4.13 Prueba rechazo del 100% de carga en la unidad de Delsintanisagua.

Se observa en la respuesta que el regulador de velocidad mantiene la velocidad en un nuevo punto de operación de 1.065 p.u. a un tiempo de 5.192 segundos al igual que el VCO que estabiliza el voltaje terminal en un tiempo de 69.172 segundos.

4.1.1.2.5 Variación de carga del +/- 10%

Esta prueba consiste en generar una perturbación pequeña en la entrada de los reguladores mediante la variación del +/-10% del total de la carga nominal abastecida por el generador.

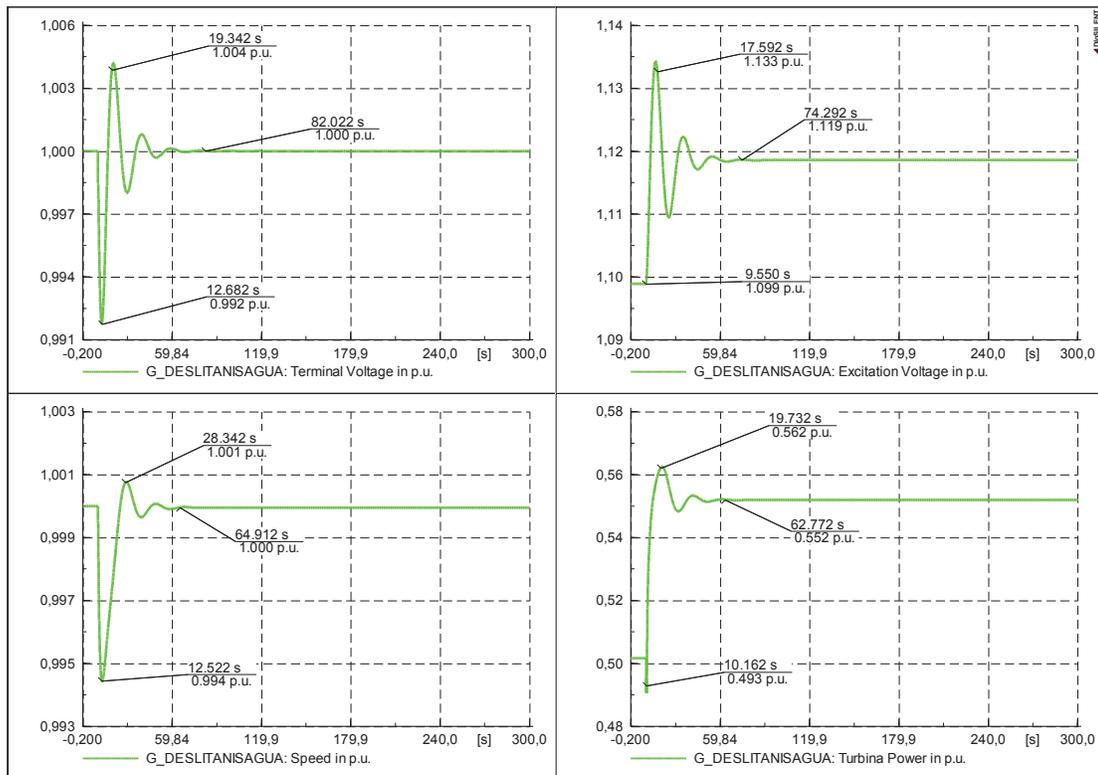


Figura 4.14 Prueba variación del +10% de carga en la unidad de Delsintanisagua.

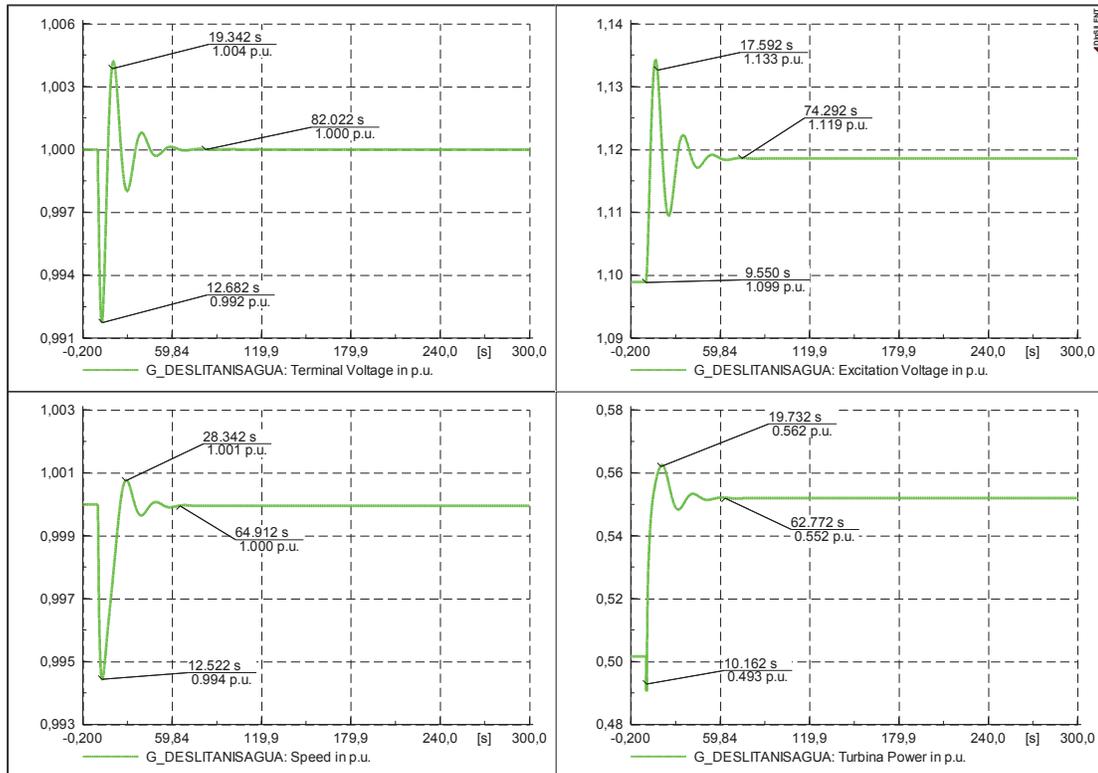


Figura 4.15 Prueba variación del -10% de carga en la unidad de Delsintanisagua.

Se observa que en los dos casos tanto el AVR como el PCU llevan al voltaje terminal y la velocidad del generador respectivamente, a su valor de estado estable en un tiempo menor a los 90 segundos, lo que permite corroborar que los sistemas de control modelados operan correctamente.

4.1.2 PROCEDIMIENTO DE ADECUACIÓN DE LA BASE DE DATOS PROYECTADA AL AÑO 2018

Se presenta los procedimientos que se siguieron para el acondicionamiento de una base de datos con modelos de control de las nuevas centrales de generación proyectada al año 2018.

4.1.2.1 Validación inicial de la base de datos

En este punto se procede a verificar la correcta convergencia de la base de datos de expansión de CELEC EP TRANSELECTRIC al simular flujos de potencia y análisis modal, para esto se realizó la estabilización de los voltajes de las barras

del SNI dentro de un rango entre 0.9 a 1.1 p.u., para que así al simular transitorios electromecánicos no se generen problemas de convergencia en el sistema de ecuaciones diferenciales.

En la figura (4.16) se observan las respuestas de voltaje y frecuencia en la barra Molino 230 kV ante una falla en la línea de transmisión Molino – Pascuales simulada en la base de expansión sin incorporar ningún modelo de control en el escenario de operación Lluvioso Demanda Máxima.

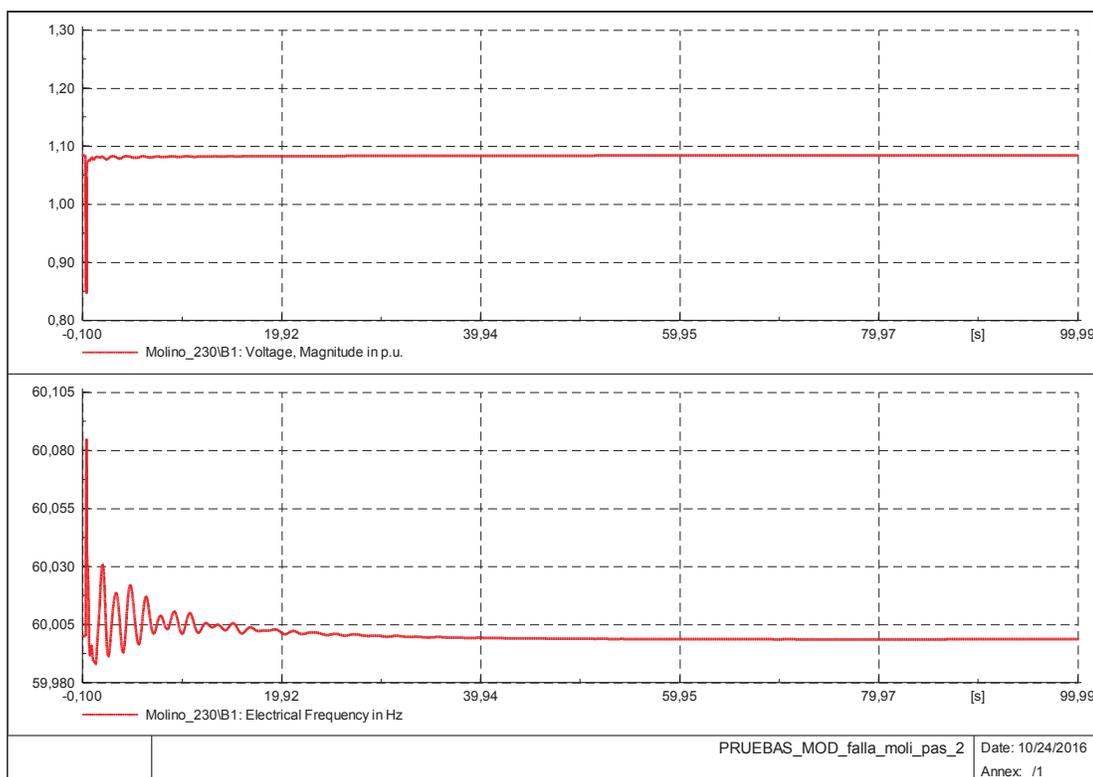


Figura 4.16 Respuesta voltaje y frecuencia en la barra Molino 230 kV - Falla en la línea Molino-Pascuales en el sistema sin modelos de control

Se observa que la respuesta que se tiene para el sistema bajo estas condiciones iniciales es buena, ya que se tiene una correcta estabilidad tanto para voltaje como para frecuencia.

4.1.2.2 Incorporación de modelos en unidades en operación hasta el año 2015

En este punto se procede a incorporar los modelos de control de las centrales existentes hasta el año 2015, dichos modelos se encuentran validados y se obtuvieron de la referencia [18].

En la figura (4.17) se encuentra una comparación de la respuesta de voltaje y frecuencia en la barra Molino 230 kV del sistema sin incorporar modelos de control e incorporando modelos de control de generadores existentes hasta el año 2015, ante la ocurrencia de una falla en un circuito de la línea de transmisión Molino-Pascuales.

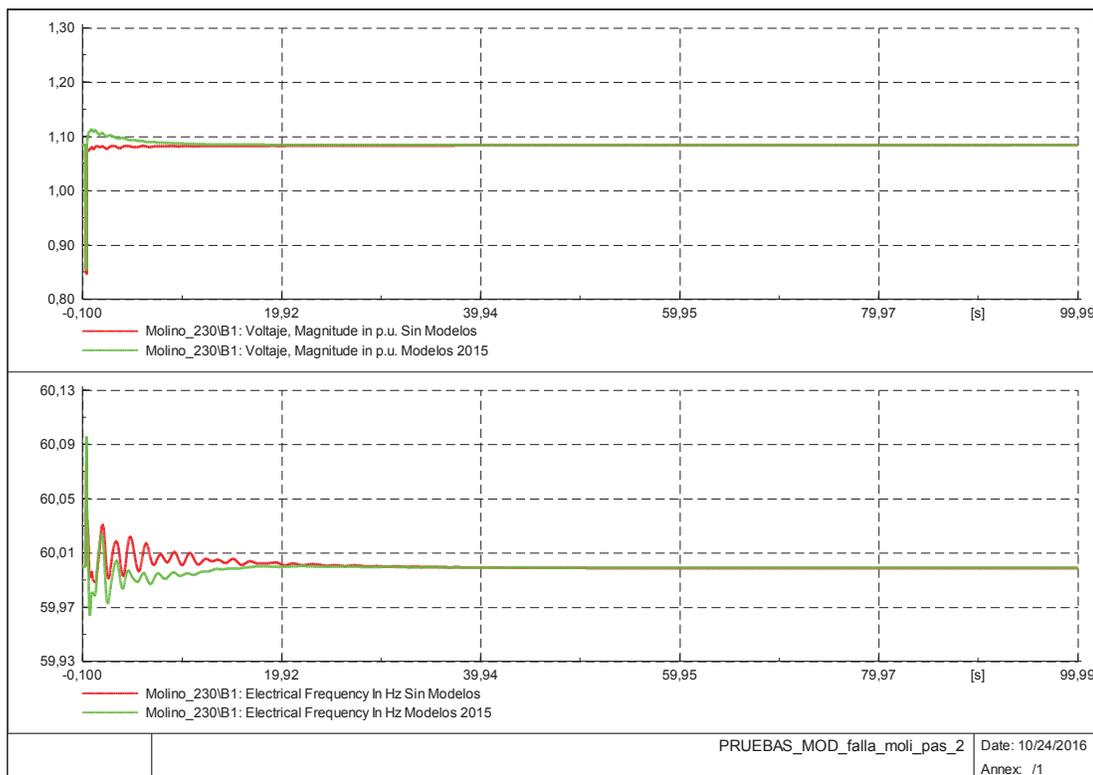


Figura 4.17 Respuesta voltaje y frecuencia en la barra Molino 230 kV – Falla en la línea Molino-Pascuales en el SNI con modelos de control de unidades en operación hasta el año 2015.

Se observa que la respuesta que se obtiene al incorporar los modelos de control permite que la estabilización de voltaje y frecuencia se de en un menor tiempo con referencia a la base inicial, lo que permite verificar que los controladores de dichas unidades se encuentran operando correctamente.

4.1.2.3 Incorporación de nuevos modelos de unidades proyectadas en operación al año 2018

Finalmente teniendo los modelos de las nuevas centrales de generación validados mediante las pruebas desarrolladas en el presente capítulo, se procede a la incorporación de los controladores a la base de datos de expansión que hasta este punto contaba únicamente con los modelos de centrales hasta el

año 2015, las centrales incluidas en el sistema son las que se detalló en la tabla (4.1).

En la gráfica (4.18) se presenta la respuesta de voltaje y frecuencia para el evento transitorio simulado en los anteriores casos de estudio.

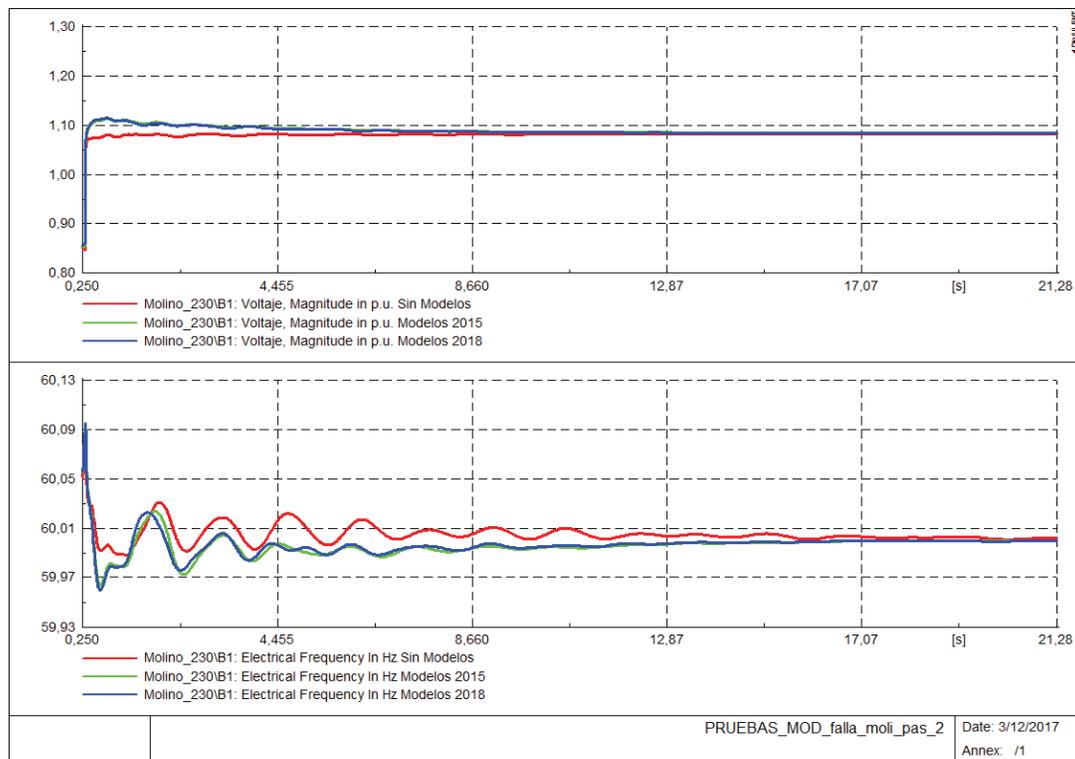


Figura 4.18 Respuesta voltaje y frecuencia en la barra Molino 230 kV – Falla en la línea Molino-Pascuales en el SNI con modelos de control de unidades proyectadas en operación al año 2018.

Se observa que la respuesta del sistema tiende a mejorar en relación a los casos anteriores, de tal manera que la estabilización de voltaje y frecuencia se da en un menor tiempo, lo que implica directamente que la estabilidad del sistema mejora al incluir controladores en las nuevas unidades de generación y adicionalmente que los modelos utilizados operan correctamente.

En este punto se tiene una base de datos del SNI proyecta al año 2018, validada y que permitirá desarrollar las aplicaciones del presente estudio.

4.2 APICACIÓN DE LOS ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN MVMO Y PSO PARA LA SINTONIZACIÓN DE PSS EN EL SNI 2018

Una vez realizada la proyección de la base de datos al año horizonte planteado, se procede a la aplicación de los algoritmos de optimización MVMO y PSO. El Sistema Nacional Interconectado (SNI) que se ha tomado para el presente estudio representa un caso real ya que cuenta con la parte colombiana en su totalidad puesto que se pretende obtener resultados lo más aproximados a la realidad, dicha zona de Colombia está integrada en la base de datos de expansión proporcionada por CELEC EP TRANSELECTRIC.

4.2.1 CARACTERÍSTICAS DEL CASO DE ESTUDIO

Para el presente caso de estudio se plantea obtener amortiguamientos de los modos oscilatorios superiores al 5%, este amortiguamiento es considerado adecuado cuando se encuentran activos todos los elementos de transmisión y se tiene como razón de amortiguamiento un 3% cuando se tiene la pérdida de algún elemento [5].

El análisis del sistema se da para el caso de demanda máxima lluviosa ya que en esta condición es cuando la mayoría de centrales hidroeléctricas se encuentran en operación, los datos de despacho y demanda son reales de acuerdo al plan de expansión de transmisión.

El sistema ecuatoriano se encuentra interconectado con el sistema eléctrico colombiano, el mismo que cuenta con sus propios sistemas de control en sus unidades generadoras, de esta manera la respuesta que se obtiene se acercará de una forma más aproximada a la realidad.

La metodología aplicada sobre el sistema consiste en realizar un análisis previo para identificar los principales modos oscilatorios que se presentan y posteriormente centrarse en las máquinas que mayor participación tengan sobre estos modos.

El estado inicial de la base de datos proyectada cuenta con todos los controladores activados incluidos los estabilizadores de sistemas de potencia, los parámetros de los PSS modelados para la expansión han sido obtenidos de datos referenciales de fabricantes, posteriormente se contrastará estas respuestas con las obtenidas al calibrar los parámetros de los estabilizadores con los métodos de optimización planteados.

4.2.2 ANÁLISIS INICIAL DEL SISTEMA

Es importante verificar el punto de partida del sistema en estudio puesto que esta información es relevante a la hora de realizar la aplicación de los algoritmos de optimización, en este punto se debe considerar un análisis de pequeña señal del sistema.

4.2.2.1 Análisis de pequeña señal

El análisis de pequeña señal del sistema permite obtener la información necesaria para realizar la aplicación de los algoritmos de optimización, en inicio como se había indicado anteriormente el sistema cuenta con todos los sistemas de control activados y con parámetros que han sido obtenidos de datos referenciales de fabricantes.

Se procede a realizar un análisis modal del sistema inicial para verificar la estabilidad de los valores propios y adicionalmente determinar los modos de oscilación que se encuentren por debajo del límite de amortiguamiento especificado para el problema.

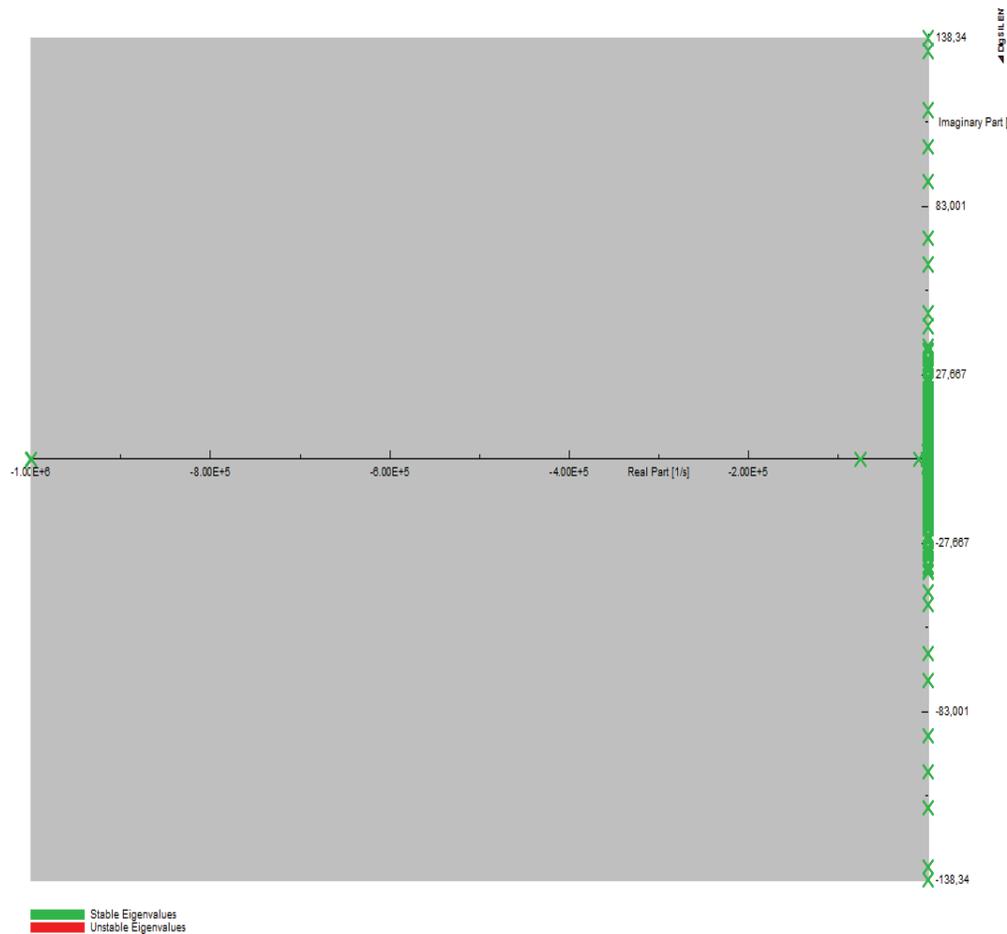


Figura 4.19 Plano de los valores propios del SNI 2018 con PSSs sin sintonizar.

Se observa que los valores propios del sistema se encuentran dentro de la zona estable del plano, lo que implica que el sistema tiende a tener un comportamiento estable. En este punto es importante obtener la información detallada de los modos de oscilación del sistema, puesto que con esto se podrán determinar aquellos modos que no cumplan con el límite de amortiguamiento propuesto del 5%.

Se presentan los modos de oscilación que no cumplen con el límite planteado para el problema, la tabla completa del total de los modos de oscilación se presenta en el anexo digital (3.1).

Tabla 4.6 Modos de oscilación de la base SNI 2018 sin sintonizar PSS

MODOS DE OSCILACIÓN BASE SIN SINTONIZAR PSS					
Modo	Real part	Imaginary part	Damped Frequency	Damping Ratio	Damping Ratio
	1/s	[rad/s]	[Hz]	[-]	[%]
Mode 01259	-0,23389	10,72849	1,70749	0,02180	2,1795
Mode 01260	-0,23389	-10,72849	1,70749	0,02180	2,1795
Mode 01265	-0,2794	10,5276	1,6755	0,0265	2,6529
Mode 01266	-0,2794	-10,5276	1,6755	0,0265	2,6529
Mode 01467	-0,2682	6,4710	1,0299	0,0414	4,1412
Mode 01468	-0,2682	-6,4710	1,0299	0,0414	4,1412
Mode 01699	-0,1111	3,7635	0,5990	0,0295	2,9508
Mode 01700	-0,1111	-3,7635	0,5990	0,0295	2,9508
Mode 01711	-0,1726	4,1188	0,6555	0,0419	4,1857
Mode 01712	-0,1726	-4,1188	0,6555	0,0419	4,1857
Mode 01713	-0,1726	4,1188	0,6555	0,0419	4,1857
Mode 01714	-0,1726	-4,1188	0,6555	0,0419	4,1857

Se observa en la tabla que existen 6 modos oscilatorios que no cumplen con el límite de amortiguamiento establecido. Con la información obtenida se procede a encontrar los factores de participación de cada modo para obtener las máquinas que tienen mayor participación.

Se presentan los factores de participación correspondientes a los modos oscilatorios obtenidos previamente.

4.2.2.1.1 Modo de oscilación local – Máquina participante Baba

Tabla 4.7 Detalles del modo de oscilación local – Máquina participante Baba

MODO DE OSCILACIÓN LOCAL - MÁQUINA PARTICIPANTE BABA				
Método Sintonización	Modo	Damped Frequency	Damping Ratio	Damping Ratio
		[Hz]	[-]	[%]
Sin Sintonizar	Mode 01259	1,70749	0,02180	2,1795
	Mode 01260	1,70749	0,02180	2,1795

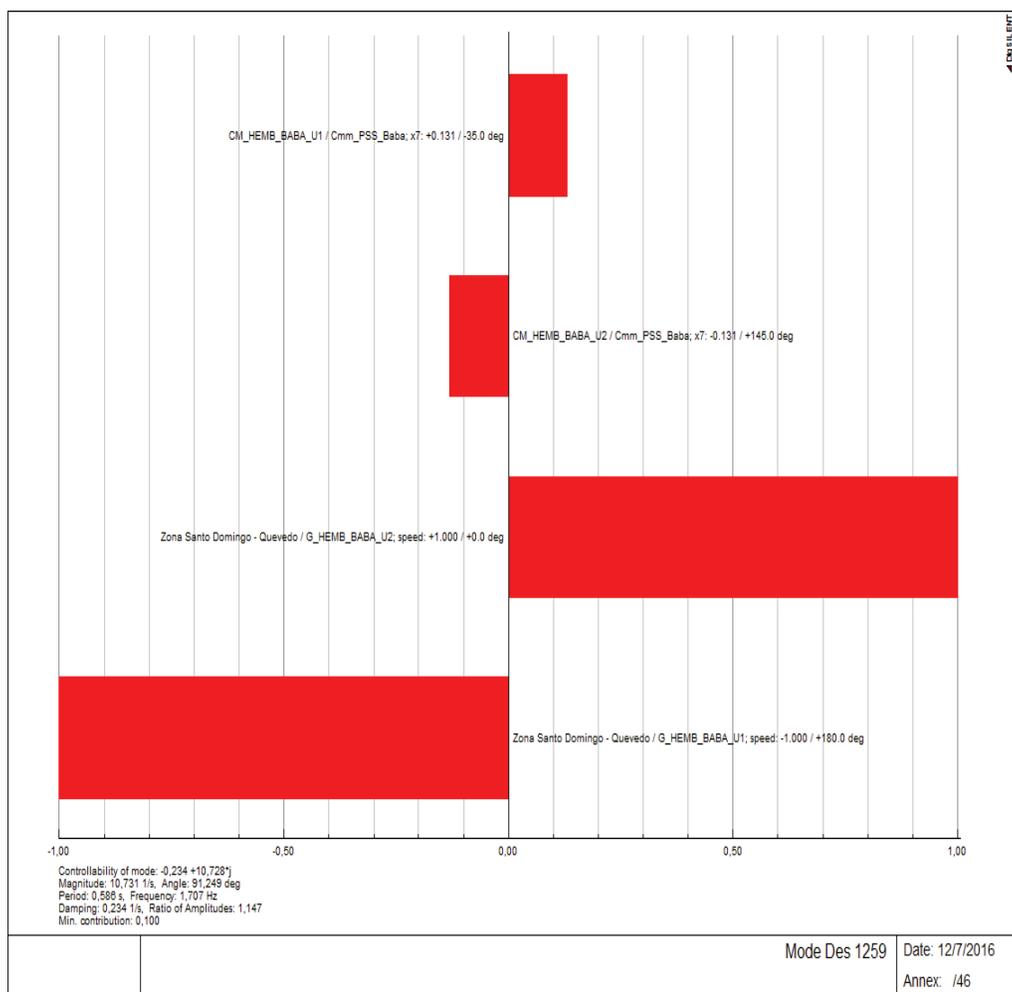


Figura 4.20 Factores de participación del modo de oscilación local – Máquina participante Baba

4.2.2.1.2 Modo de oscilación local – Máquinas participantes Baba y Coca Codo Sinclair

Tabla 4.8 Detalle del modo de oscilación local – Máquinas participantes Baba y Coca Codo Sinclair

MODO DE OSCILACIÓN LOCAL - MÁQUINAS PARTICIPANTES BABA Y COCA CODO SINCLAIR				
Método Sintonización	Modo	Damped Frequency	Damping Ratio	Damping Ratio
		[Hz]	[-]	[%]
Sin Sintonizar	Mode 01265	1,6755	0,0265	2,6529
	Mode 01266	1,6755	0,0265	2,6529

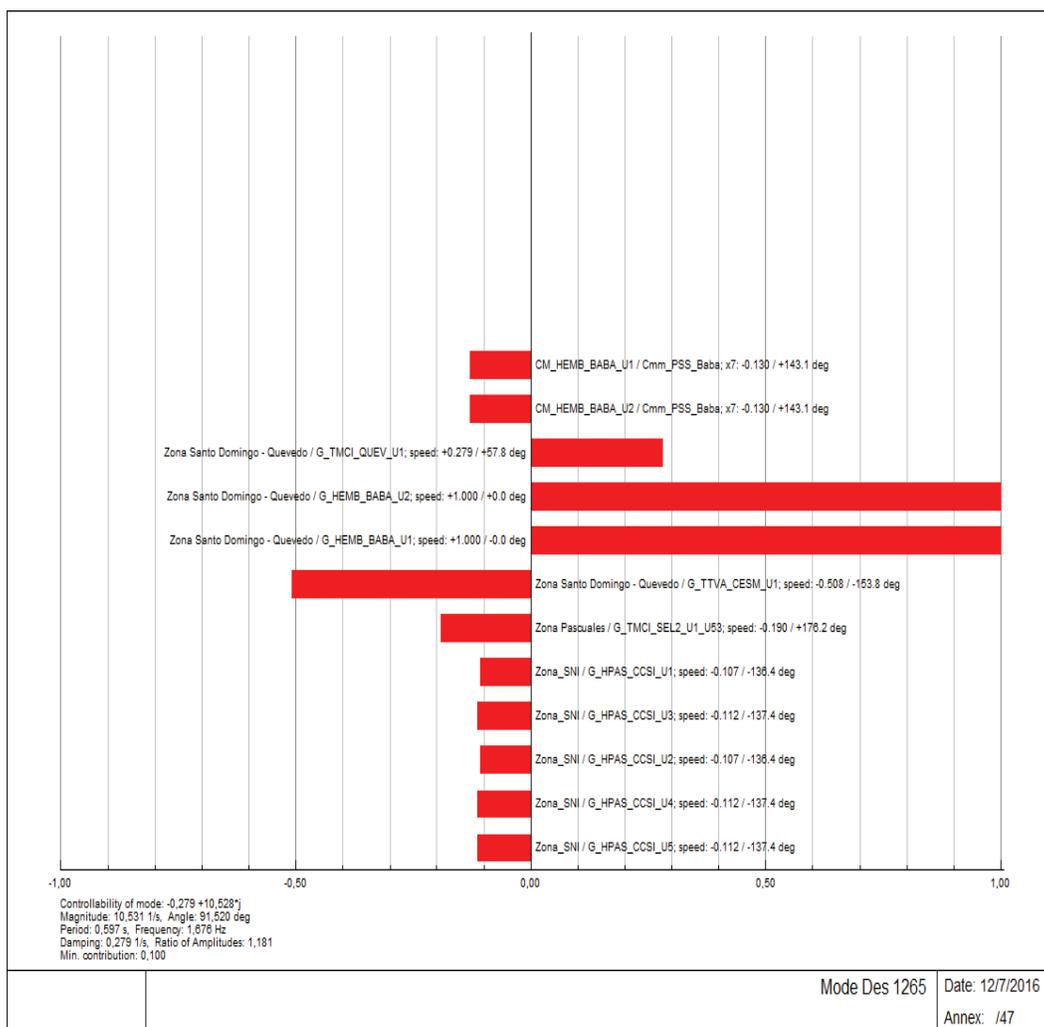


Figura 4.21 Factores de participación del modo de oscilación local – Máquinas participantes Baba y Coca Codo Sinclair

4.2.2.1.3 Modo de oscilación interárea – Máquinas participantes de Colombia y Ecuador

Tabla 4.9 Detalle del modo de oscilación interárea – Máquinas participantes de Colombia y Ecuador

MODO DE OSCILACIÓN INTERÁREA - MÁQUINAS PARTICIPANTES DE COLOMBIA Y ECUADOR				
Método Sintonización	Modo	Damped Frequency	Damping Ratio	Damping Ratio
		[Hz]	[-]	[%]
Sin Sintonizar	Mode 01467	1,0299	0,0414	4,1412
	Mode 01468	1,0299	0,0414	4,1412

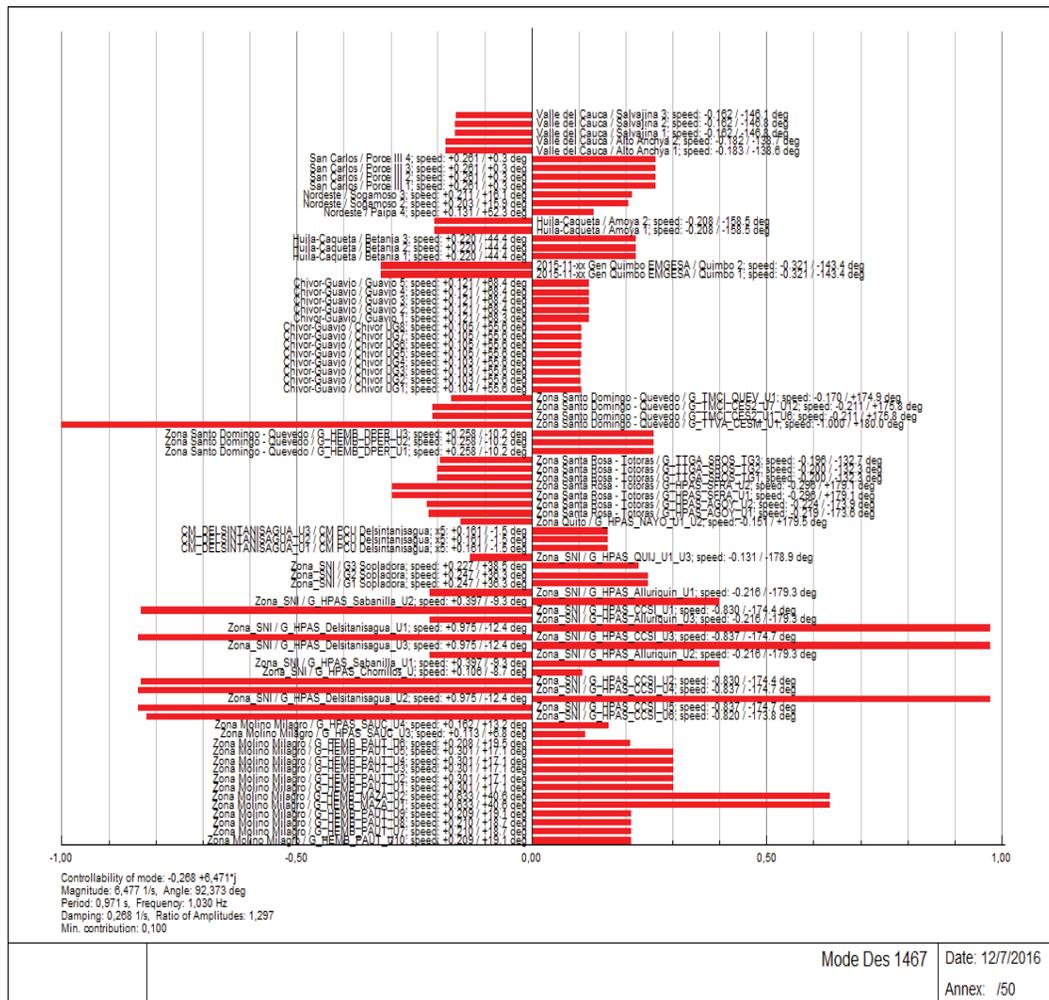


Figura 4.22 Factores de participación del modo de oscilación interárea – Máquinas participantes de Colombia y Ecuador

4.2.2.1.4 Modo de oscilación local – Máquinas participantes Daule Peripa y Coca Codo Sinclair

Tabla 4.10 Detalle del modo de oscilación local – Máquinas participantes Daule Peripa y Coca Codo Sinclair

MODO DE OSCILACIÓN LOCAL - MÁQUINAS PARTICIPANTES DAULE PERIPA Y COCA CODO SINCLAIR				
Método Sintonización	Modo	Damped Frequency	Damping Ratio	Damping Ratio
		[Hz]	[-]	[%]
Sin Sintonizar	Mode 01699	0,5990	0,0295	2,9508
	Mode 01700	0,5990	0,0295	2,9508

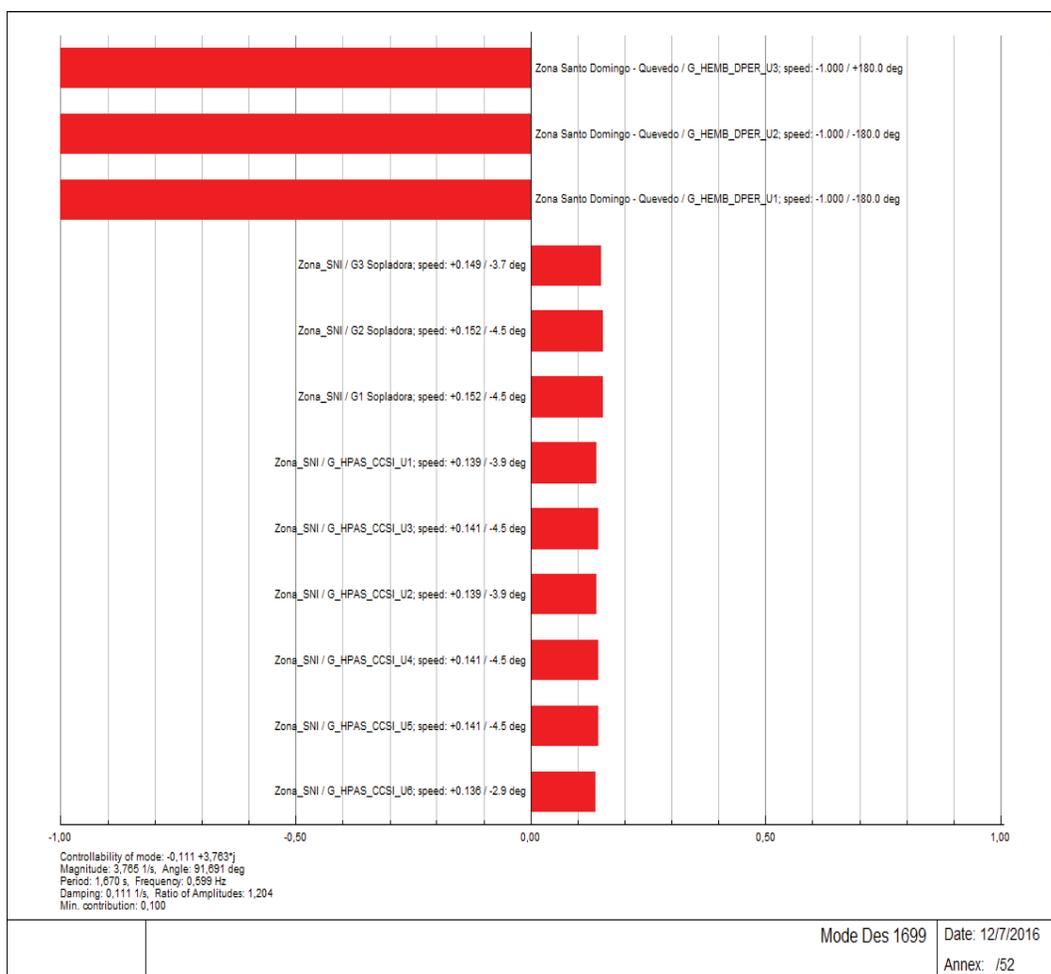
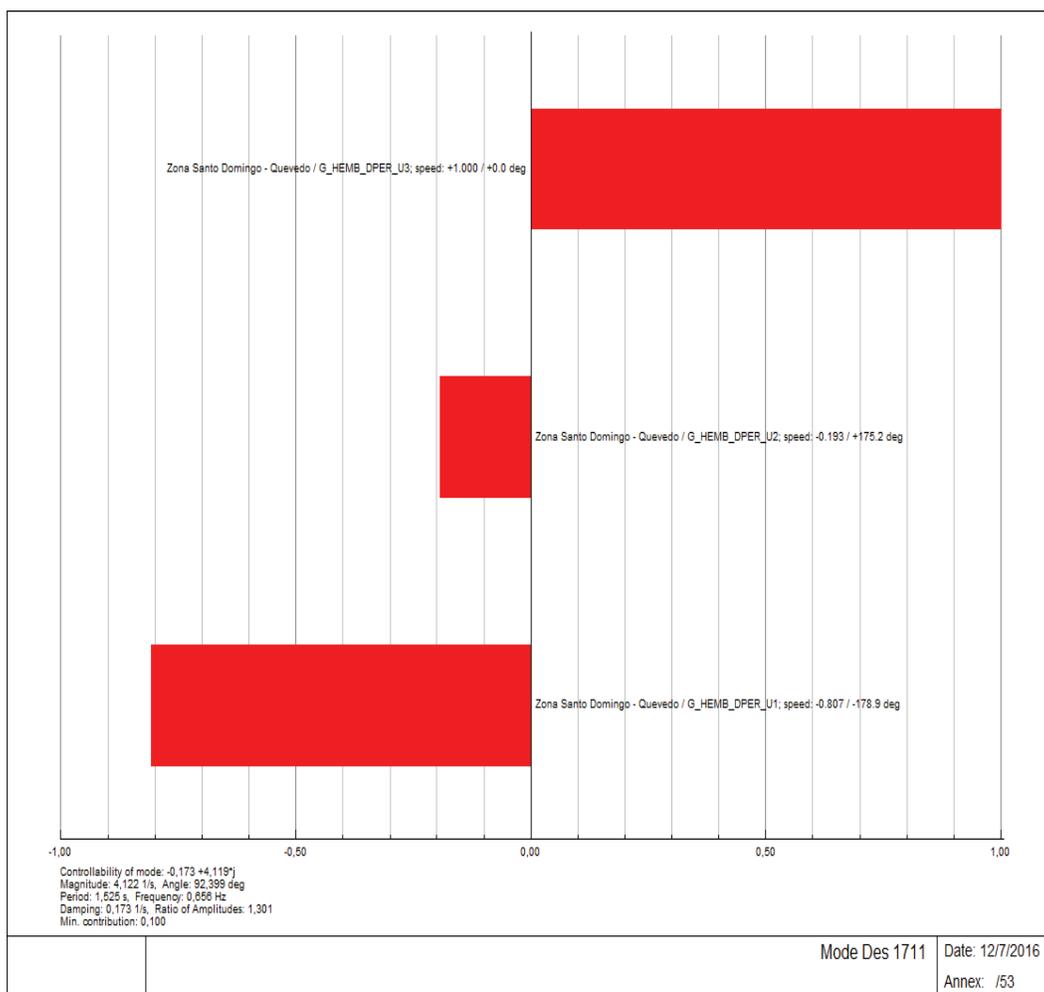


Figura 4.23 Factores de participación del modo de oscilación local – Máquinas participantes Daule Peripa y Coca Codo Sinclair

4.2.2.1.5 *Modo de oscilación local – Máquina participante Daule Peripa***Tabla 4.11** Detalle del modo de oscilación local – Máquina participante Daule Peripa

MODO DE OSCILACIÓN LOCAL - MÁQUINA PARTICIPANTE DAULE PERIPA				
Método Sintonización	Modo	Damped Frequency	Damping Ratio	Damping Ratio
		[Hz]	[-]	[%]
Sin Sintonizar	Mode 01711	0,6555	0,0419	4,1857
	Mode 01712	0,6555	0,0419	4,1857

**Figura 4.24** Factores de participación del modo de oscilación local – Máquina participante Daule Peripa

4.2.2.1.6 Modo de oscilación local – Máquina participante Daule Peripa

Tabla 4.12 Detalle del modo de oscilación local – Máquina participante Daule Peripa

MODO DE OSCILACIÓN LOCAL - MÁQUINA PARTICIPANTE DAULE PERIPA				
Método Sintonización	Modo	Damped Frequency	Damping Ratio	Damping Ratio
		[Hz]	[-]	[%]
Sin Sintonizar	Mode 01713	0,6555	0,0419	4,1857
	Mode 01714	0,6555	0,0419	4,1857

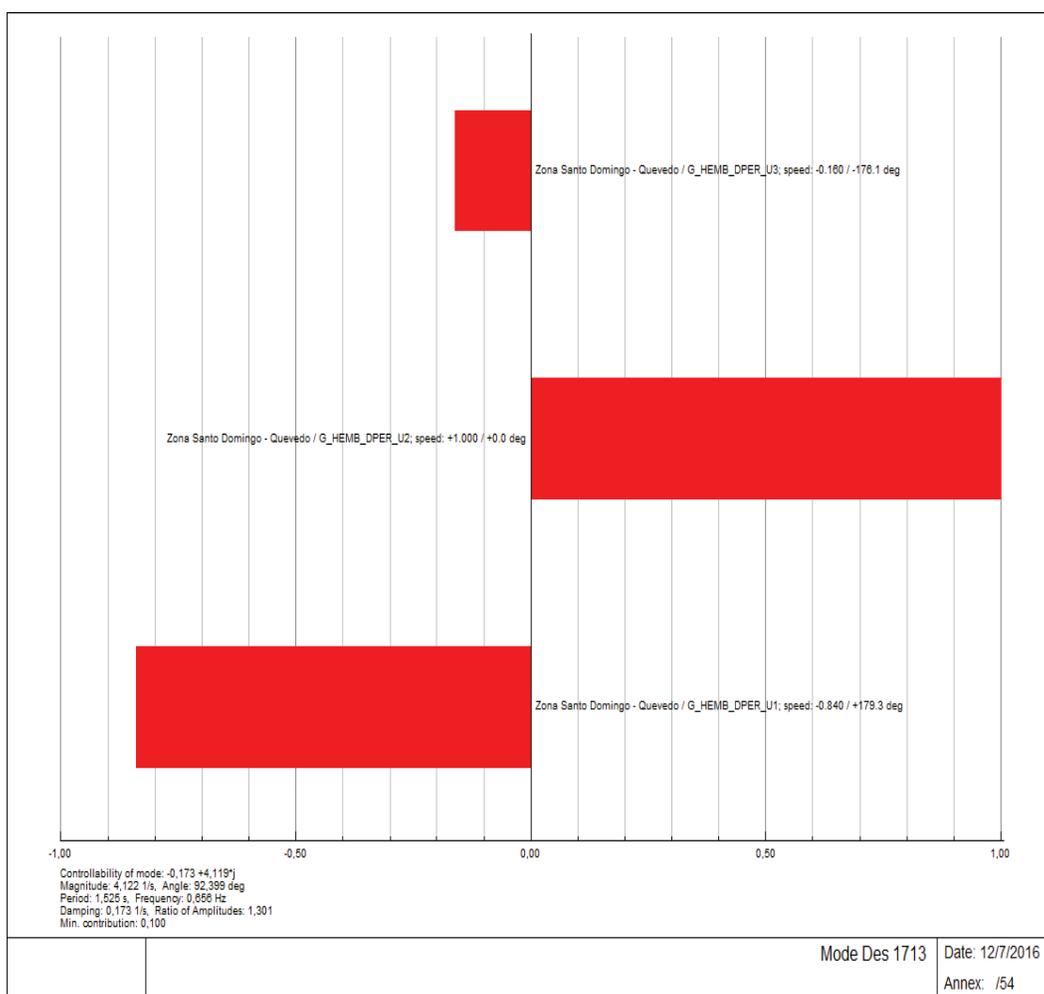


Figura 4.25 Factores de participación del modo de oscilación local – Máquina participante Daule Peripa

4.2.2.1.7 Unidades participantes en la sintonización de PSS

Con la información obtenida de los factores de participación se determinan las unidades sobre las cuales se debe enfocar la sintonización de los estabilizadores de potencia, puesto que éstas son las que mayor contribución presentan a los diferentes modos oscilatorios, las máquinas a sintonizar en el sistema son las siguientes.

Tabla 4.13 Unidades a sintonizar sus PSS

UNIDADES A SINTONIZAR	
CENTRAL	NÚMERO DE UNIDADES
Coca Codo Sinclair	8
Baba	2
Daule Peripa	3
Delsintanisagua	3
TOTAL UNIDADES	16

4.2.3 APICACIÓN DEL ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN POR MAPEO DE MEDIA VARIANZA (MVMO)

Para la aplicación del algoritmo de optimización se utiliza la metodología explicada anteriormente en el sistema de pruebas 9 barras de la IEEE, con la salvedad que se tiene un mayor número de unidades, en este caso las unidades son del mismo tipo en cada central, para Coca Codo Sinclair se tienen 8 generadores, en el caso de Baba se cuenta con 2 generadores y para Daule Peripa y Delsintanisagua se cuenta con 3 máquinas cada una. El algoritmo aplicado pertenece a la referencia [9], que ha sido adaptado para la ejecución en el presente sistema.

4.2.3.1 Función objetivo

El objetivo que se pretende alcanzar mediante la aplicación del algoritmo de optimización MVMO es el de maximizar la razón de amortiguamiento de los diferentes modos de oscilación considerando un límite inferior de 5% ($\zeta \geq 5\%$). Como se había analizado en el capítulo anterior los parámetros sobre los cuales se debe actuar en el estabilizador de potencia son los siguientes:

Tabla 4.14 Parámetros de los PSS a sintonizar

Parámetro	Descripción	Unidad
Kw	Ganancia del PSS	[p.u.]
T1	1era Constante de tiempo derivativa adelanto - atraso	[s]
T2	1era Constante de tiempo de retardo adelanto - atraso	[s]
T3	2da Constante de tiempo derivativa adelanto - atraso	[s]
T4	2da Constante de tiempo de retardo adelanto - atraso	[s]

Cabe destacar que cada central posee su propio modelo de PSS en donde se han identificado estos parámetros a optimizar. Estos parámetros se encuentran detallados en el capítulo 2 del presente documento.

Bajo estas consideraciones se determina que la metodología apropiada para proceder con la sintonización es la de unidades equivalentes [19], puesto que de esta manera se tendrían únicamente 4 unidades que intervienen dentro del proceso de optimización lo que permite la reducción de tiempos de ejecución del algoritmo.

4.2.3.2 Método de unidades equivalentes

El método consiste en ubicar una sola máquina que represente el total de los generadores en operación de cada central, esto se fundamenta en que todas las máquinas son iguales y tienen los mismos parámetros eléctricos, por lo que el equivalente que se obtiene refleja buenos resultados. El equivalente se lo realiza mediante las herramientas de PowerFactory usando la opción de máquinas en paralelo, los resultados de utilizar este método fueron corroborados en la referencia [19] por lo que en esta sección únicamente se hace mención al mismo.

Al tener un número reducido de unidades la sintonización de los estabilizadores de potencia se da en un menor tiempo de ejecución, una vez obtenidos los parámetros sintonizados se vuelven a incluir el total de las unidades y se procede al análisis del sistema en su totalidad.

4.2.3.3 Resultados obtenidos

De los resultados obtenidos de la ejecución del algoritmo de optimización MVMO sobre el SNI se destacan los parámetros obtenidos para los estabilizadores de potencia y el correspondiente análisis del sistema calibrado con este método de optimización.

4.2.3.3.1 Parámetros obtenidos

En la presente sección se indican únicamente los parámetros obtenidos para las unidades de Coca Codo Sinclair, el resto de parámetros se presentan en el anexo 2.

Tabla 4.15 Parámetros obtenidos para los PSS de las unidades de Coca Codo Sinclair con el método MVMO

MÉTODO DE OPTIMIZACION MVMO			
PSS DE UNIDADES DE COCA CODO SINCLAIR			
Parámetro	Valor	Unidad	Descripción
Tw1	2	[s]	1st Washout 1th Time Constant
Tw2	2	[s]	1st Washout 2th Time Constant
T6	0,01	[s]	1st Signal Transducer Time Constant
Tw3	2	[s]	2nd Washout 1th Time Constant
Tw4	0	[s]	2nd Washout 2th Time Constant
Ks2	0,99	[pu]	2nd Signal Transducer Factor
T7	10	[s]	2nd Signal Transducer Time Constant
Ks3	1	[pu]	Washouts Coupling Factor
Ks1	77,76328	[pu]	PSS Gain
T1	0,08667	[s]	1st Lead-Lag Derivative Time Constant
T2	0,009402	[s]	1st Lead-Lag Delay Time Constant
T3	0,178867	[s]	2nd Lead-Lag Derivative Time Constant
T4	0,016739	[s]	2nd Lead-Lag Delay Time Constant
T8	0,5	[s]	Ramp Tracking Filter Deriv. Time Constant
T9	0,1	[s]	Ramp Tracking Filter Delay Time Constant
N	1	[-]	Ramp Tracking Filter
M	5	[-]	Ramp Tracking Filter
T10	0	[s]	3rd Lead-Lag Derivative Time Constant
T11	0,033	[s]	3rd Lead-Lag Delay Time Constant
Vstmin	-0,1	[pu]	Controller Minimum Output
VS1min	0,5	[pu]	Input Signal 1 Minimum Limit
VS2min	0,3	[pu]	Input Signal 2 Minimum Limit
Vstmax	0,1	[pu]	Controller Maximum Output
VS1max	1,5	[pu]	Input Signal 1 Maximum Limit
VS2max	1,8	[pu]	Input Signal 2 Maximum Limit

4.2.3.3.2 Análisis de pequeña señal

Este análisis permite verificar la condición de los modos de oscilación que se habían presentado como modos problema por no cumplir con un amortiguamiento superior al 5%. Se presenta a continuación los resultados de varios modos, en tanto que la tabla completa del análisis modal del sistema calibrado mediante el algoritmo MVMO se presenta en el anexo digital (3.2).

Tabla 4.16 Detalle del modo de oscilación local – Máquina participante Baba optimizado con MVMO

MODO DE OSCILACIÓN LOCAL - MÁQUINA PARTICIPANTE BABA				
Método Sintonización	Modo	Damped Frequency	Damping Ratio	Damping Ratio
		[Hz]	[-]	[%]
MVMO	Mode 01284	1,72662	0,05264	5,2639
	Mode 01285	1,72662	0,05264	5,2639

Tabla 4.17 Detalle del modo de oscilación local – Máquinas participantes Baba y Coca Codo Sinclair optimizado con MVMO

MODO DE OSCILACIÓN LOCAL - MÁQUINAS PARTICIPANTES BABA Y COCA CODO SINCLAIR				
Método Sintonización	Modo	Damped Frequency	Damping Ratio	Damping Ratio
		[Hz]	[-]	[%]
MVMO	Mode 01314	1,7284	0,0779	7,7938
	Mode 01315	1,7284	0,0779	7,7938

Tabla 4.18 Detalle del modo de oscilación interárea – Máquinas participantes de Colombia y Ecuador optimizado con MVMO

MODO DE OSCILACIÓN INTERÁREA - MÁQUINAS PARTICIPANTES DE COLOMBIA Y ECUADOR				
Método Sintonización	Modo	Damped Frequency	Damping Ratio	Damping Ratio
		[Hz]	[-]	[%]
MVMO	Mode 01614	1,0283	0,0428	4,2845
	Mode 01615	1,0283	0,0428	4,2845

Tabla 4.19 Detalle del modo de oscilación local – Máquinas participantes Daule Peripa y Coca Codo Sinclair optimizado con MVMO

MODO DE OSCILACIÓN LOCAL - MÁQUINAS PARTICIPANTES DAULE PERIPA Y COCA CODO SINCLAIR				
Método Sintonización	Modo	Damped Frequency	Damping Ratio	Damping Ratio
		[Hz]	[-]	[%]
MVMO	Mode 01750	0,6223	0,1971	19,7088
	Mode 01751	0,6223	0,1971	19,7088

Tabla 4.20 Detalle del modo de oscilación local – Máquina participantes Daule Peripa optimizado con MVMO

MODO DE OSCILACIÓN LOCAL - MÁQUINA PARTICIPANTE DAULE PERIPA				
Método Sintonización	Modo	Damped Frequency	Damping Ratio	Damping Ratio
		[Hz]	[-]	[%]
MVMO	Mode 01752	0,7000	0,2233	22,3265
	Mode 01753	0,7000	0,2233	22,3265
	Mode 01754	0,7000	0,2233	22,3265
	Mode 01755	0,7000	0,2233	22,3265

Se observa en las tablas que todos los modos oscilatorios del sistema calibrado mediante MVMO son superiores al 5% con excepción del modo inter-área que se encuentra en un valor de 4,28%, si bien este modo no logra superar el límite establecido se tiene un pequeño incremento con relación a la base sin sintonizar, esto ocurre puesto que la contribución de máquinas colombianas también aporta al modo y sobre dichos generadores no se aplica el método de optimización de los estabilizadores de potencia.

De forma general los incrementos de amortiguamiento se dan notablemente en cada modo de oscilación, por lo que se verifica que el resultado obtenido mediante este método de optimización aporta a un mejoramiento en la estabilidad del sistema.

4.2.3.3.3 *Análisis dinámico del sistema*

Con el fin de corroborar el efecto producido sobre la estabilidad del sistema al haber sintonizado los estabilizadores de potencia mediante el método MVMO, se procede a realizar un análisis del comportamiento del sistema ante la presencia de transitorios electromecánicos. En este caso se simulará una falla trifásica en la línea de transmisión Molino – Pascuales a 230 kV. Como se había especificado anteriormente el escenario de estudio corresponde al de demanda máxima.

En las figuras (4.26 y 4.27) se presenta la respuesta de voltaje y frecuencia en la barra de Molino para el evento transitorio simulado.

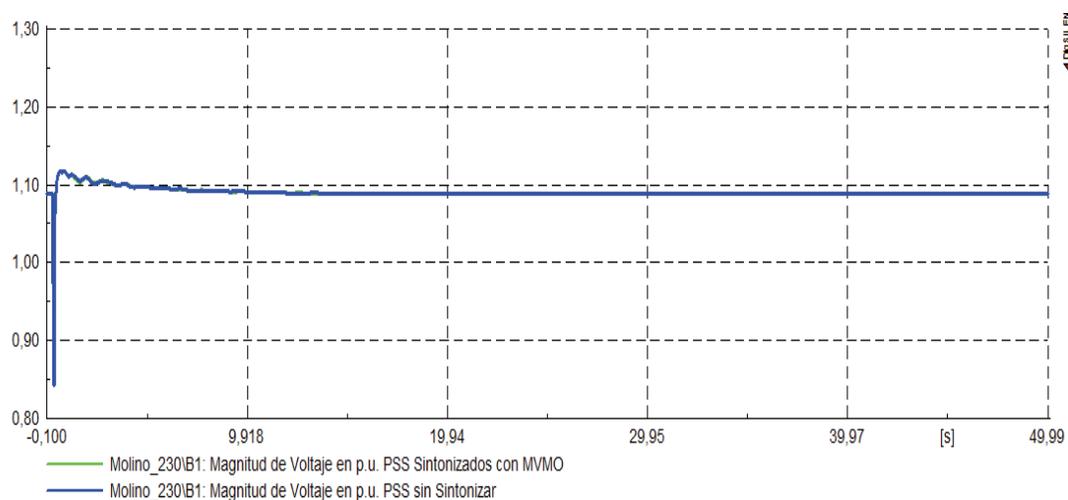


Figura 4.26 Respuesta de voltaje en la barra Molino 230 kV ante una falla en la línea Molino - Pacuales

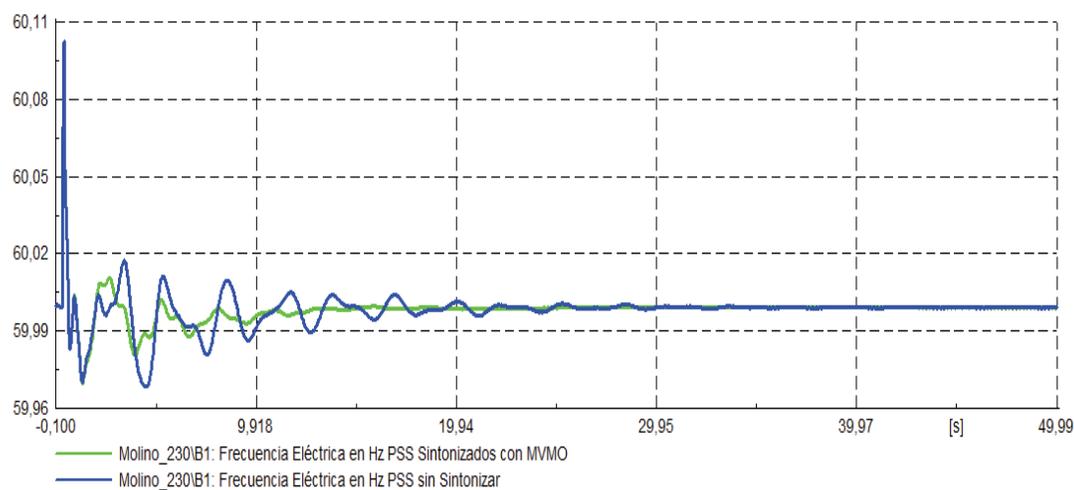


Figura 4.27 Respuesta de frecuencia en la barra Molino 230 kV ante una falla en la línea Molino - Pacuales

Como se observa la calibración de los PSS de las máquinas detalladas presenta una mejor respuesta al evento transitorio, para el voltaje la mejoría no es tan notoria como en el caso de la frecuencia en donde se aprecia claramente que el sistema responde de mejor manera.

En las figuras (4.28 y 4.29) se tiene la respuesta de voltaje y frecuencia en los terminales de la unidad 1 de Coca Codo Sinclair.

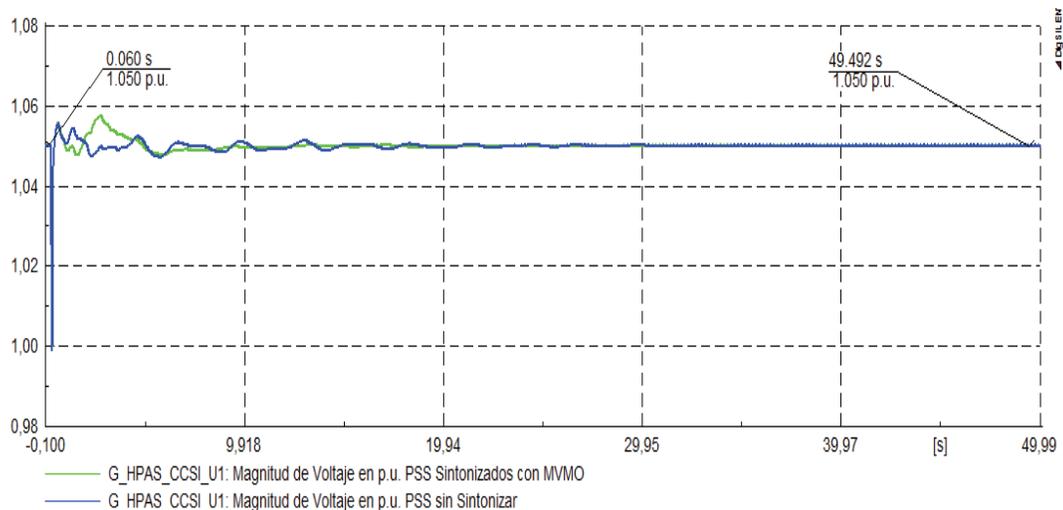


Figura 4.28 Respuesta de voltaje en la unidad 1 de Coca Codo Sinclair ante una falla en la línea Molino - Pascuales

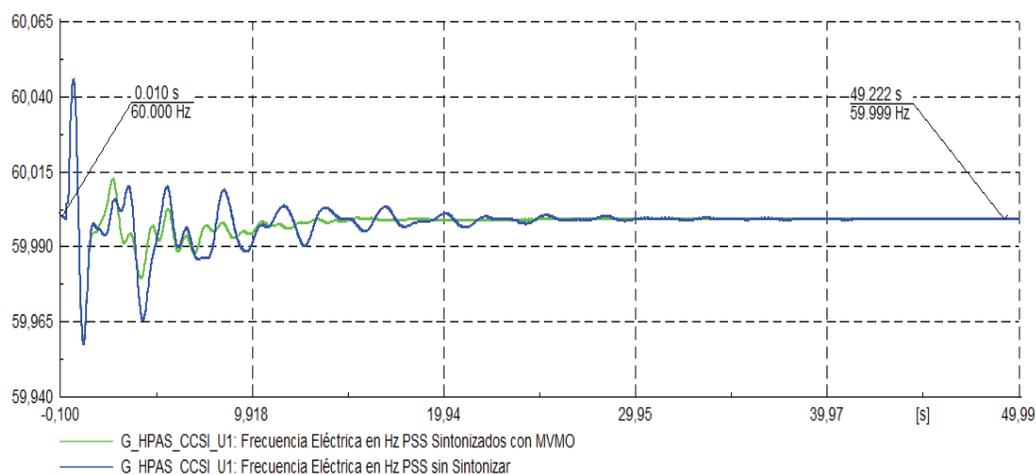


Figura 4.29 Respuesta de frecuencia en la unidad 1 de Coca Codo Sinclair ante una falla en la línea Molino - Pascuales

Se aprecia que la respuesta tanto de voltaje como de frecuencia en la unidad mejora al calibrar los PSS, en el caso del voltaje si bien se presenta un pico posteriormente la respuesta se estabiliza de forma más rápida, en cuanto a la frecuencia se observa una clara mejoría en su respuesta al evento transitorio.

En las gráficas (4.30 y 4.31) se presentan las respuestas de potencia activa y reactiva de la unidad ante la presencia del evento transitorio.

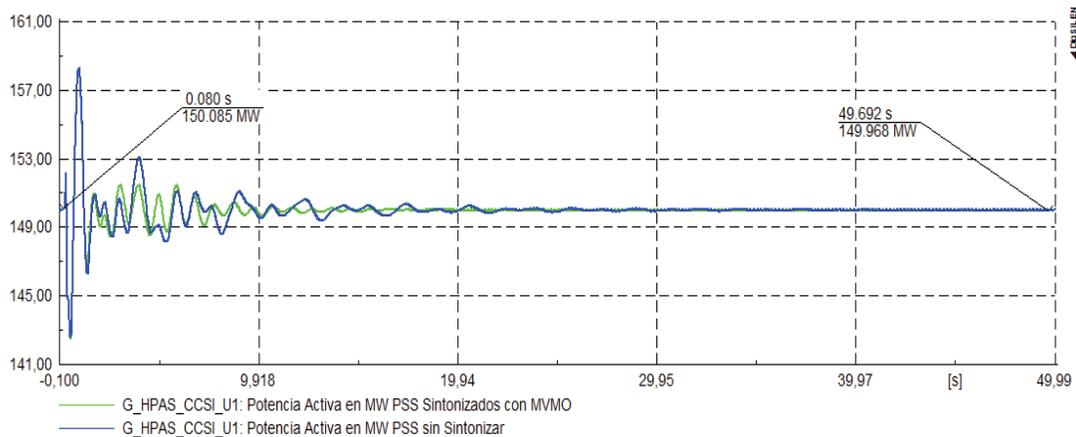


Figura 4.30 Respuesta de potencia activa en la unidad 1 de Coca Codo Sinclair ante una falla en la línea Molino - Pascuales

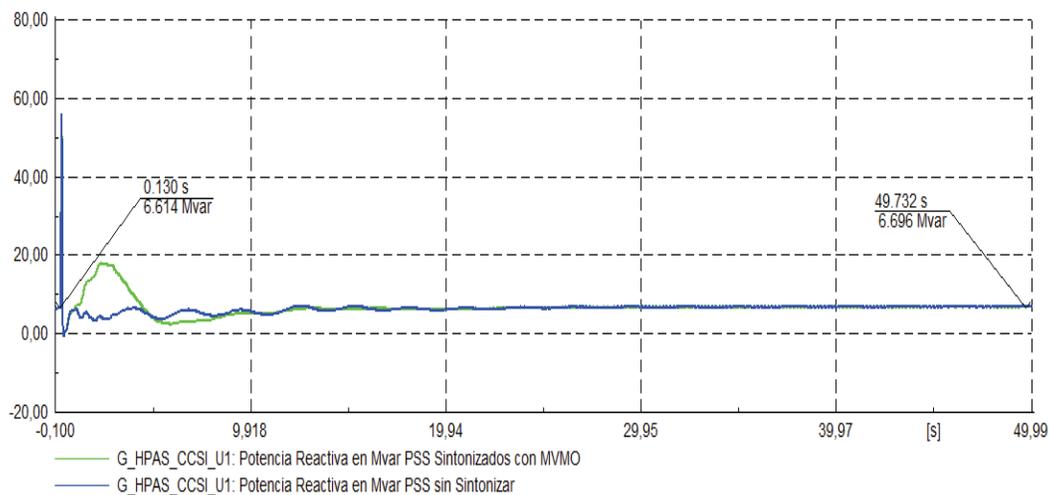


Figura 4.31 Respuesta de potencia reactiva en la unidad 1 de Coca Codo Sinclair ante una falla en la línea Molino - Pascuales

Se aprecia que la respuesta de potencia activa tiene una clara mejoría puesto que se estabiliza en menor tiempo, en cuanto a la potencia reactiva se observa que si bien la respuesta se estabiliza más rápido se presenta un pico de potencia al inicio del evento transitorio.

En la figura (4.32) se presenta al ángulo del rotor de la unidad de Coca Codo Sinclair.

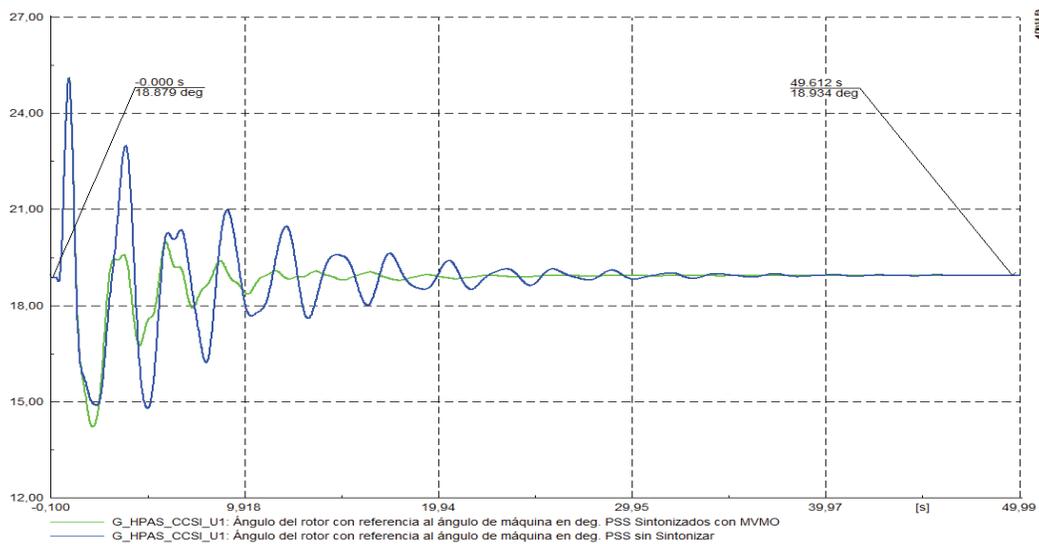


Figura 4.32 Respuesta del ángulo del rotor en la unidad 1 de Coca Codo Sinclair ante una falla en la línea Molino - Pascuales

Se observa que el comportamiento del ángulo del rotor de la máquina mejora considerablemente al sintonizar los parámetros de los estabilizadores de potencia del sistema.

Se puede concluir que los resultados que entrega el algoritmo MVMO son buenos puesto que se refleja una clara mejoría a comparación del sistema inicial ante la ocurrencia de un evento transitorio electromecánico.

4.2.4 APICACIÓN DEL ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN POR ENJAMBRE DE PARTÍCULAS (PSO)

4.2.4.1 Función objetivo

El objetivo que se plantea es el de llegar a tener amortiguamientos superiores al 5% tal como se detalló en la anterior aplicación.

4.2.4.2 Resultados obtenidos

4.2.4.2.1 Parámetros obtenidos

Se presentan los parámetros obtenidos para las unidades de Coca Codo Sinclair al igual que en el caso anterior, el resto de parámetros se encuentran en el anexo 2.

Tabla 4.21 Parámetros obtenidos para los PSS de las unidades de Coca Codo Sinclair con el método PSO

MÉTODO DE OPTIMIZACION PSO			
PSS DE UNIDADES DE COCA CODO SINCLAIR			
Parámetro	Valor	Unidad	Descripción
Tw1	2	[s]	1st Washout 1th Time Constant
Tw2	2	[s]	1st Washout 2th Time Constant
T6	0,01	[s]	1st Signal Transducer Time Constant
Tw3	2	[s]	2nd Washout 1th Time Constant
Tw4	0	[s]	2nd Washout 2th Time Constant
Ks2	0,99	[pu]	2nd Signal Transducer Factor
T7	10	[s]	2nd Signal Transducer Time Constant
Ks3	1	[pu]	Washouts Coupling Factor
Ks1	83,58041	[pu]	PSS Gain
T1	0,713445	[s]	1st Lead-Lag Derivative Time Constant
T2	1,583671	[s]	1st Lead-Lag Delay Time Constant
T3	1,313043	[s]	2nd Lead-Lag Derivative Time Constant
T4	2,987284	[s]	2nd Lead-Lag Delay Time Constant
T8	0,5	[s]	Ramp Tracking Filter Deriv. Time Constant
T9	0,1	[s]	Ramp Tracking Filter Delay Time Constant
N	1	[-]	Ramp Tracking Filter
M	5	[-]	Ramp Tracking Filter
T10	0	[s]	3rd Lead-Lag Derivative Time Constant
T11	0,033	[s]	3rd Lead-Lag Delay Time Constant
Vstmin	-0,1	[pu]	Controller Minimum Output
VS1min	0,5	[pu]	Input Signal 1 Minimum Limit
VS2min	0,3	[pu]	Input Signal 2 Minimum Limit
Vstmax	0,1	[pu]	Controller Maximum Output
VS1max	1,5	[pu]	Input Signal 1 Maximum Limit
VS2max	1,8	[pu]	Input Signal 2 Maximum Limit

4.2.4.2.2 Análisis de pequeña señal

El análisis de pequeña señal permite verificar la evolución de los modos oscilatorios definidos como modos problema ante la sintonización de los parámetros de los estabilizadores de potencia mediante el algoritmo PSO. Se presentan los modos sobre los cuales se enfocó la optimización, la tabla completa de los modos oscilatorios se ubica en el anexo digital (3.3).

Tabla 4.22 Detalle del modo de oscilación local – Máquina participante Baba optimizado con PSO

MODO DE OSCILACIÓN LOCAL - MÁQUINA PARTICIPANTE BABA				
Método Sintonización	Modo	Damped Frequency	Damping Ratio	Damping Ratio
		[Hz]	[-]	[%]
PSO	Mode 01295	1,66727	0,03895	3,8947
	Mode 01296	1,66727	0,03895	3,8947

Tabla 4.23 Detalle del modo de oscilación local – Máquinas participantes Baba y Coca Codo Sinclair optimizado con PSO

MODO DE OSCILACIÓN LOCAL - MÁQUINAS PARTICIPANTES BABA Y COCA CODO SINCALIR				
Método Sintonización	Modo	Damped Frequency	Damping Ratio	Damping Ratio
		[Hz]	[-]	[%]
PSO	Mode 01337	1,6338	0,0433	4,3328
	Mode 01338	1,6338	0,0433	4,3328

Tabla 4.24 Detalle del modo de oscilación interárea – Máquinas participantes de Colombia y Ecuador optimizado con PSO

MODO DE OSCILACIÓN INTERÁREA - MÁQUINAS PARTICIPANTES DE COLOMBIA Y ECUADOR				
Método Sintonización	Modo	Damped Frequency	Damping Ratio	Damping Ratio
		[Hz]	[-]	[%]
PSO	Mode 01619	1,0316	0,0432	4,3178
	Mode 01620	1,0316	0,0432	4,3178

Tabla 4.25 Detalle del modo de oscilación local – Máquinas participantes Daule Peripa y Coca Codo Sinclair optimizado con PSO

MODO DE OSCILACIÓN LOCAL - MÁQUINAS PARTICIPANTES DAULE PERIPA Y COCA CODO SINCLAIR				
Método Sintonización	Modo	Damped Frequency	Damping Ratio	Damping Ratio
		[Hz]	[-]	[%]
PSO	Mode 01741	0,7791	0,0901	9,0103
	Mode 01742	0,7791	0,0901	9,0103

Tabla 4.26 Detalle del modo de oscilación local – Máquina participantes Daule Peripa optimizado con PSO

MODO DE OSCILACIÓN LOCAL - MÁQUINA PARTICIPANTE DAULE PERIPA				
Método Sintonización	Modo	Damped Frequency	Damping Ratio	Damping Ratio
		[Hz]	[-]	[%]
PSO	Mode 01747	0,8612	0,1216	12,1614
	Mode 01748	0,8612	0,1216	12,1614
	Mode 01749	0,8612	0,1216	12,1614
	Mode 01750	0,8612	0,1216	12,1614

Los resultados del análisis de pequeña señal muestran que al momento de calibrar los PSS del sistema con el algoritmo PSO no se logra alcanzar el objetivo de superar el límite del 5% para la razón de amortiguamiento en la mayoría de modos, en el primer modo local se observa que si bien hay un incremento sobre el valor inicial, el amortiguamiento se encuentra en 3,89%, en el caso del segundo modo local de igual manera se alcanza un valor de 4,33%. Es destacable el caso del modo inter-área puesto que en este caso si bien no se llega al objetivo el valor es mayor que en el caso del MVMO. Finalmente para los dos últimos modos se tiene que, si se llega a obtener valores superiores al 5%.

4.2.4.2.3 Análisis dinámico del sistema

Se procederá a verificar la respuesta del sistema ante la ocurrencia del evento transitorio que se analizó para el algoritmo anterior, de esta manera se podrá comparar qué respuesta ofrece mejores resultados entre los algoritmos planteados.

En las figuras (4.33 y 4.34) se presenta la respuesta de voltaje y frecuencia de la barra de Molino ante la ocurrencia del evento transitorio.

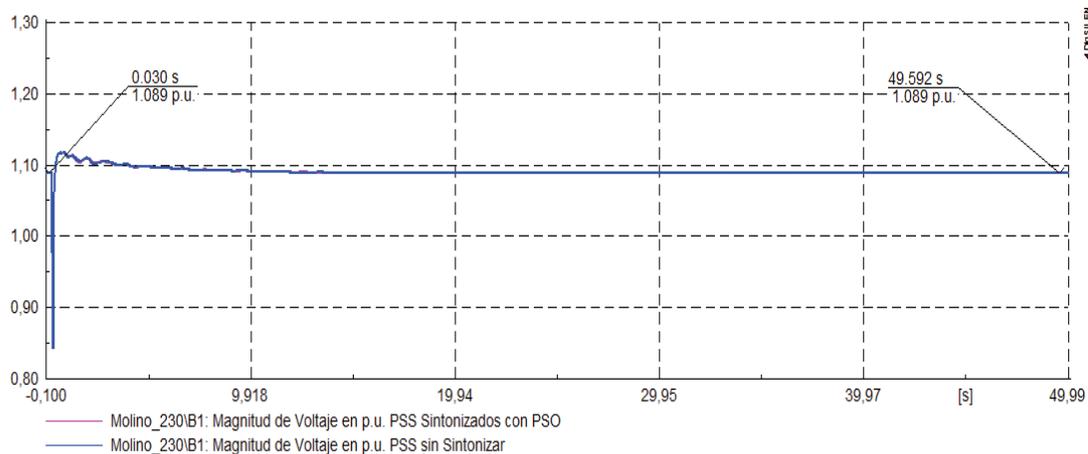


Figura 4.33 Respuesta de voltaje en la barra Molino 230 kV ante una falla en la línea Molino - Pascuales

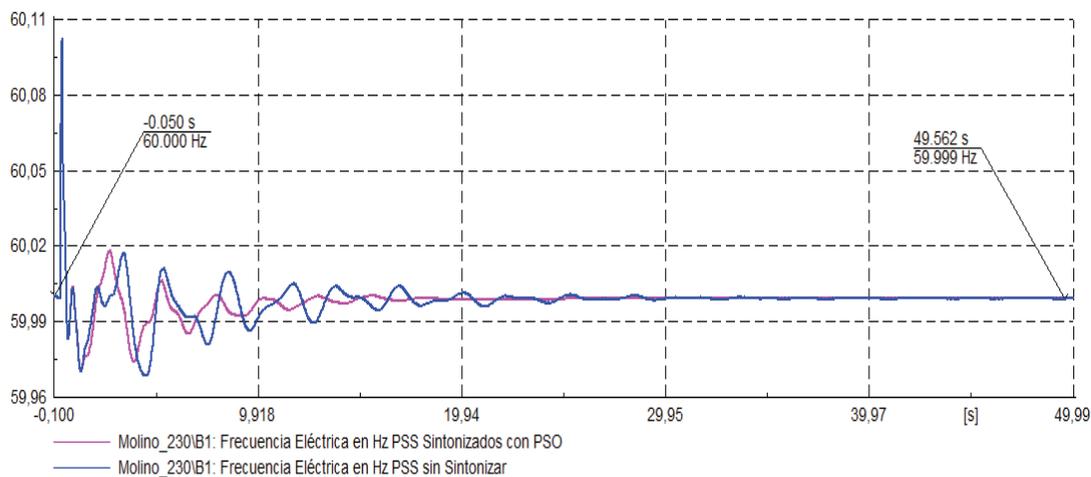


Figura 4.34 Respuesta de frecuencia en la barra Molino 230 kV ante una falla en la línea Molino - Pascuales

Se observa que la respuesta de voltaje no presenta una mayor variación en comparación al sistema inicial, por otra parte, se tiene que la respuesta de frecuencia tiene una notable mejoría al momento de haber sintonizado los PSS con el algoritmo.

En las figuras (4.35 y 4.36) se presenta la respuesta de voltaje y frecuencia de la unidad 1 de Coca Codo Sinclair.

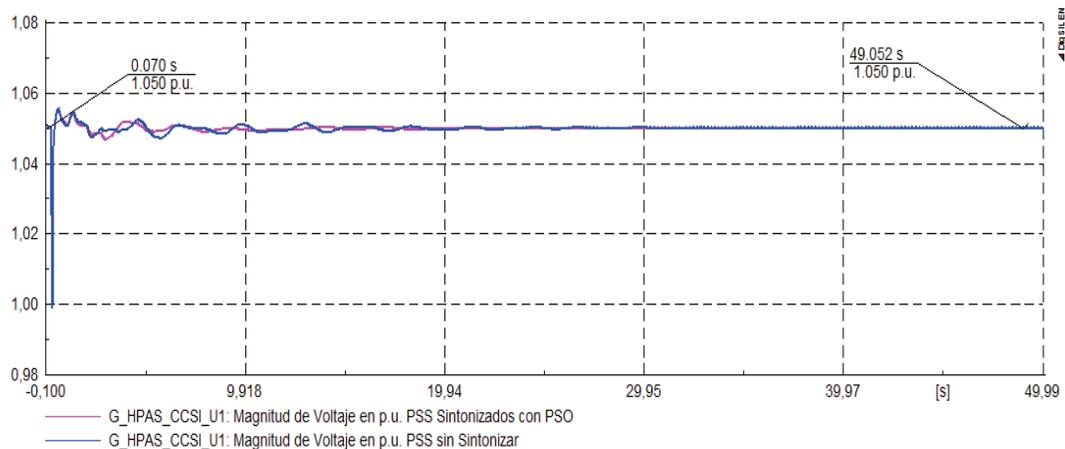


Figura 4.35 Respuesta de voltaje en la unidad 1 de Coca Codo Sinclair ante una falla en la línea Molino - Pascuales

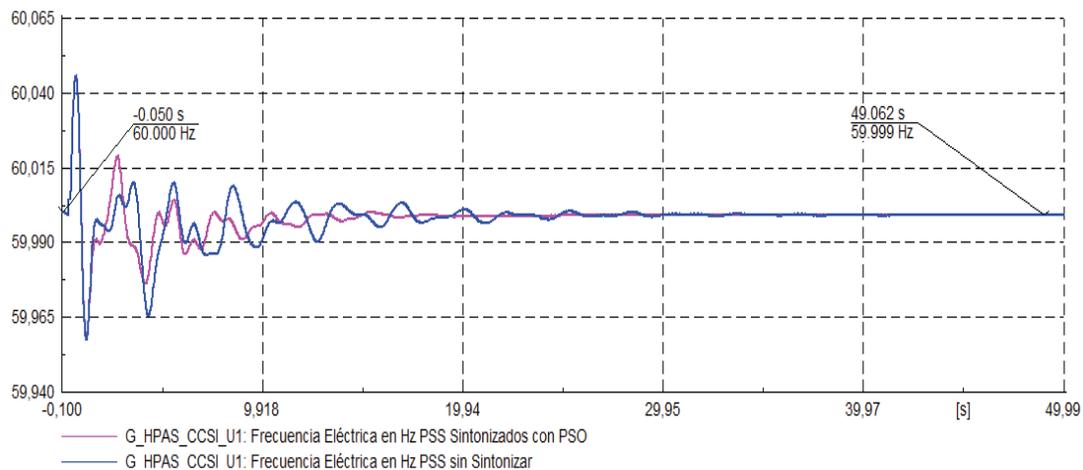


Figura 4.36 Respuesta de frecuencia en la unidad 1 de Coca Codo Sinclair ante una falla en la línea Molino - Pascuales

Al momento de calibrar los estabilizadores de potencia con el algoritmo PSO se observa que la respuesta de voltaje, así como de frecuencia mejoran, puesto que se estabilizan en un menor tiempo y se reducen las oscilaciones producidas por el transitorio.

En las figuras (4.37 y 4.38) se detallan las respuestas de potencia activa y reactiva de la unidad 1 de Coca Codo Sinclair.

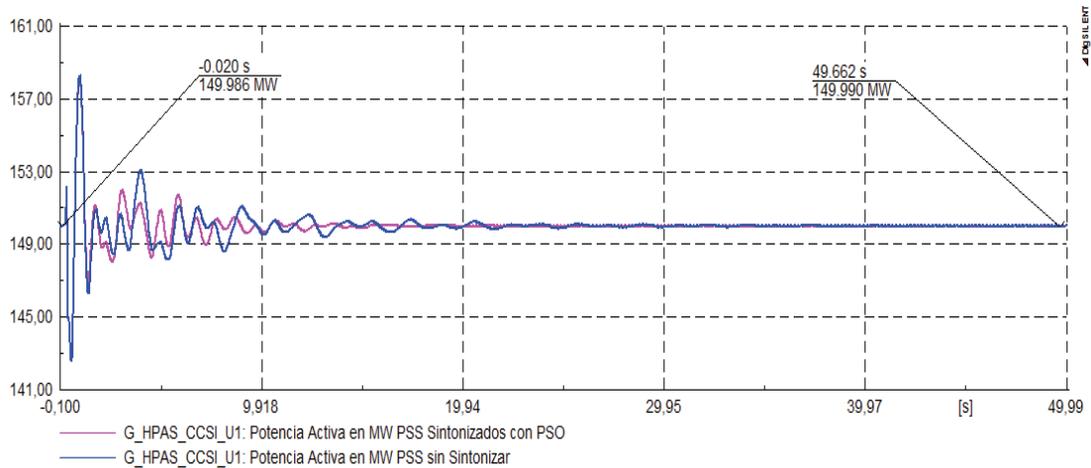


Figura 4.37 Respuesta de potencia activa en la unidad 1 de Coca Codo Sinclair ante una falla en la línea Molino - Pascuales

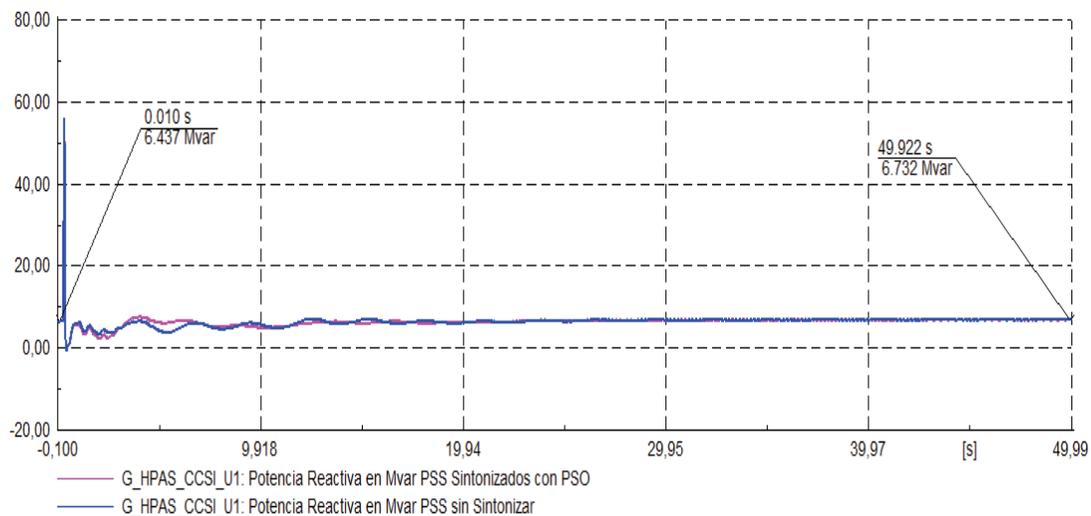


Figura 4.38 Respuesta de potencia reactiva en la unidad 1 de Coca Codo Sinclair ante una falla en la línea Molino - Pascuales

Como se observa, la respuesta de potencia activa tiene una clara mejoría puesto que se estabiliza en menor tiempo y se reducen las oscilaciones en tanto que para la potencia reactiva no se tiene una mejoría apreciable en comparación a la respuesta del sistema sin sintonización.

En la figura (4.39) se presenta la respuesta de ángulo del rotor de la unidad.

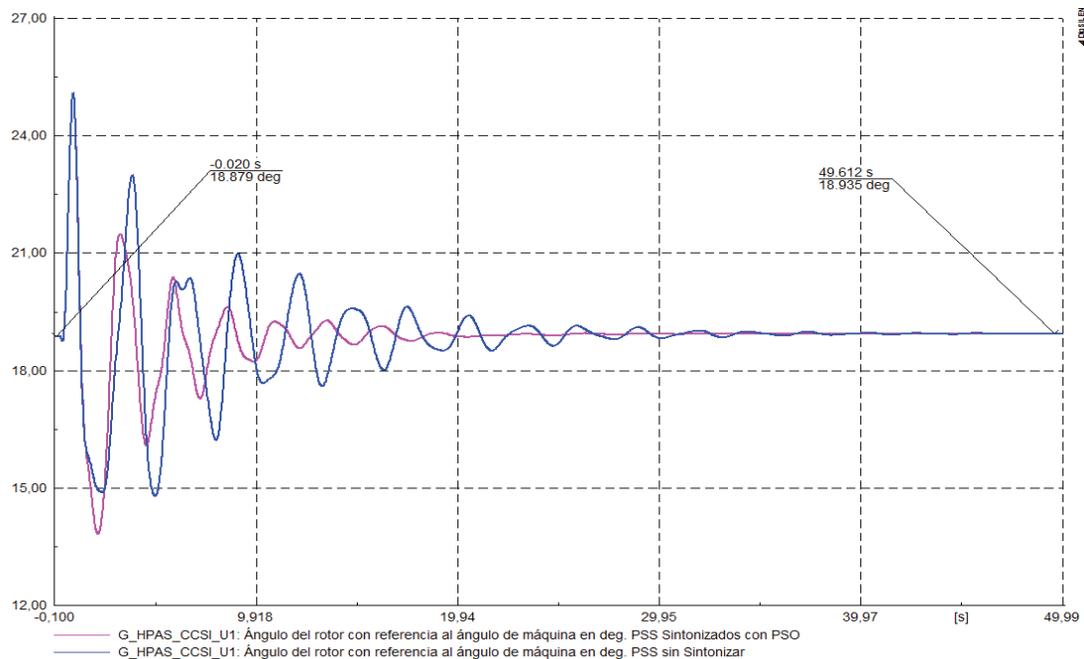


Figura 4.39 Respuesta del ángulo del rotor en la unidad 1 de Coca Codo Sinclair ante una falla en la línea Molino - Pascuales

Se verifica que la respuesta del ángulo del rotor mejora ostensiblemente con la calibración de los parámetros de los estabilizadores de potencia con el método PSO, los resultados obtenidos en la respuesta dinámica del sistema permiten corroborar que existe una mejoría en cuanto a la respuesta ante transitorios electromecánicos.

4.2.5 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LOS MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN MVMO Y PSO

Con la información obtenida de cada uno de los algoritmos aplicados para la sintonización de los PSS del sistema se puede realizar una comparación para establecer conclusiones de cuál algoritmo brinda mayores beneficios.

4.2.5.1 Detalles de la comparación entre métodos

Es conveniente establecer lineamientos para la comparación de los métodos MVMO y PSO, puesto que de esto depende los resultados que se obtengan. Se tienen las siguientes consideraciones:

- El número de iteraciones aplicado para cada algoritmo fue determinado en base a varias pruebas iniciales de donde se obtuvo un número de iteraciones para cada uno de los algoritmos al haber analizado los tiempos de ejecución y rapidez de convergencia de cada uno de los algoritmos.
- Se parte de una condición inicial en donde los PSS del sistema se encuentran activos y calibrados con los valores obtenidos del fabricante y diferentes referencias bibliográficas, como se detalló al inicio de este capítulo el propósito de la aplicación de estos algoritmos es optimizar la respuesta del sistema y verificar qué método ofrece mejores resultados.
- Los algoritmos fueron ejecutados en un mismo ordenador para que los tiempos de ejecución y velocidad de convergencia puedan ser comparables.

4.2.5.2 Análisis de pequeña señal

En esta sección se procede a realizar la comparación de los resultados obtenidos con los dos algoritmos para cada uno de los modos de oscilación sobre los cuales se enfocó su aplicación.

4.2.5.2.1 Modo de oscilación local – Máquina participante Baba

Este modo en inicio, como se muestra en la siguiente tabla, tenía un amortiguamiento de 2,71% y al aplicar los métodos de optimización sobre los estabilizadores de potencia se observa un incremento en su amortiguamiento.

Tabla 4.27 Comparación de resultados por método para el modo de oscilación local – Máquina participante Baba

MODO DE OSCILACIÓN LOCAL - MÁQUINA PARTICIPANTE BABA				
Método Sintonización	Modo	Damped Frequency	Damping Ratio	Damping Ratio
		[Hz]	[-]	[%]
Sin Sintonizar	Mode 01259	1,70749	0,02180	2,1795
	Mode 01260	1,70749	0,02180	2,1795
MVMO	Mode 01284	1,72662	0,05264	5,2639
	Mode 01285	1,72662	0,05264	5,2639
PSO	Mode 01295	1,66727	0,03895	3,8947
	Mode 01296	1,66727	0,03895	3,8947

En la figura (4.40) se presenta el detalle del amortiguamiento final del modo de oscilación

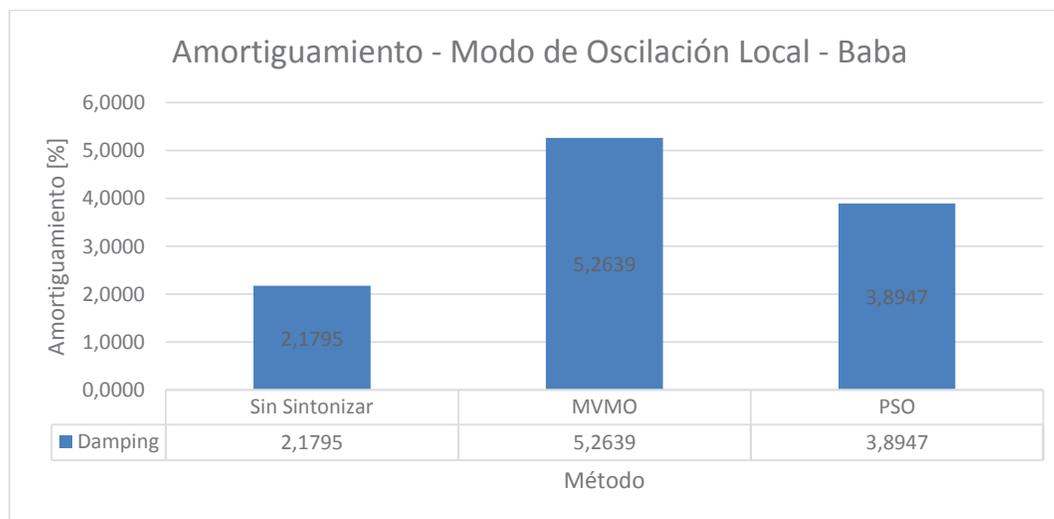


Figura 4.40 Comparación del amortiguamiento final obtenido para el método de oscilación por método de optimización.

La tabla (4.28) y la figura (4.41) presentan la comparativa de incremento de amortiguamiento para cada método de optimización.

Tabla 4.28 Incremento del amortiguamiento por método para el modo de oscilación local – Máquina participante Baba

MODO DE OSCILACIÓN LOCAL - MÁQUINA PARTICIPANTE BABA				
Método Sintonización	Modo	Damping Ratio	Damping Ratio	Incremento Amortiguamiento
		[-]	[%]	[%]
MVMO	Mode 01284	0,05264	5,2639	3,0844
	Mode 01285	0,05264	5,2639	3,0844
PSO	Mode 01295	0,03895	3,8947	1,7151
	Mode 01296	0,03895	3,8947	1,7151

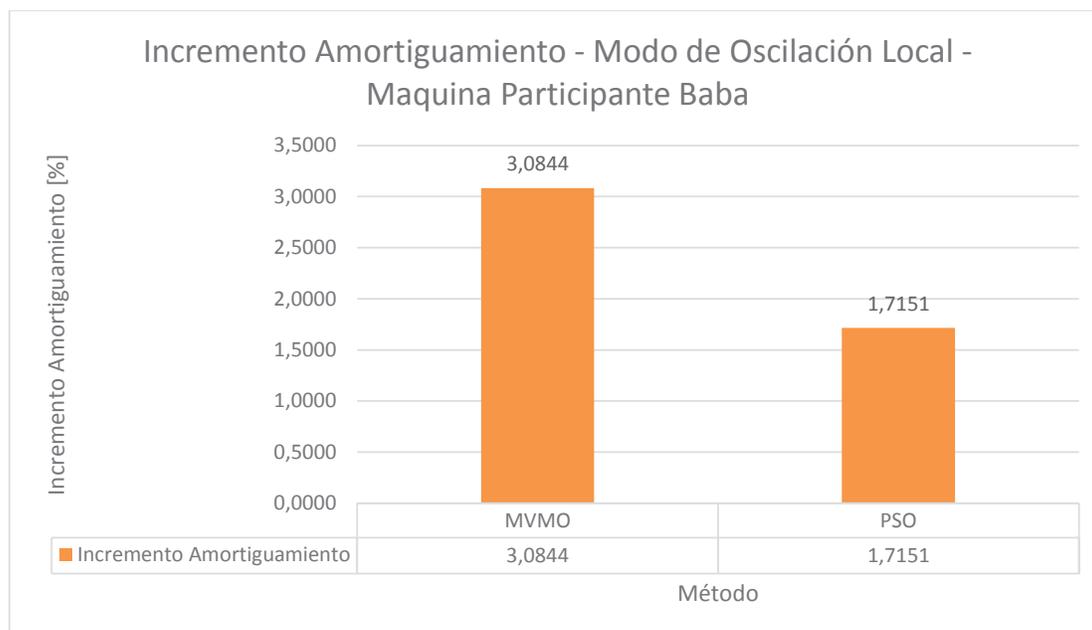


Figura 4.41 Comparación del incremento de amortiguamiento obtenido para el método de oscilación por método de optimización.

4.2.5.2.2 *Modo de oscilación local – Máquinas participantes Baba y Coca Codo Sinclair*

Este modo oscilatorio en inicio presentaba un amortiguamiento por debajo del límite con un valor de 2,65%, posterior a la aplicación de los algoritmos de optimización alcanzó los siguientes resultados.

Tabla 4.29 Comparación de resultados por método para el modo de oscilación local – Máquinas participantes Baba y Coca Codo Sinclair

MODO DE OSCILACIÓN LOCAL - MÁQUINAS PARTICIPANTES BABA Y COCA CODO SINCLAIR				
Método Sintonización	Modo	Damped Frequency	Damping Ratio	Damping Ratio
		[Hz]	[-]	[%]
Sin Sintonizar	Mode 01265	1,6755	0,0265	2,6529
	Mode 01266	1,6755	0,0265	2,6529
MVMO	Mode 01314	1,7284	0,0779	7,7938
	Mode 01315	1,7284	0,0779	7,7938
PSO	Mode 01337	1,6338	0,0433	4,3328
	Mode 01338	1,6338	0,0433	4,3328

En la figura (4.42) se presenta el detalle del amortiguamiento final del modo de oscilación.

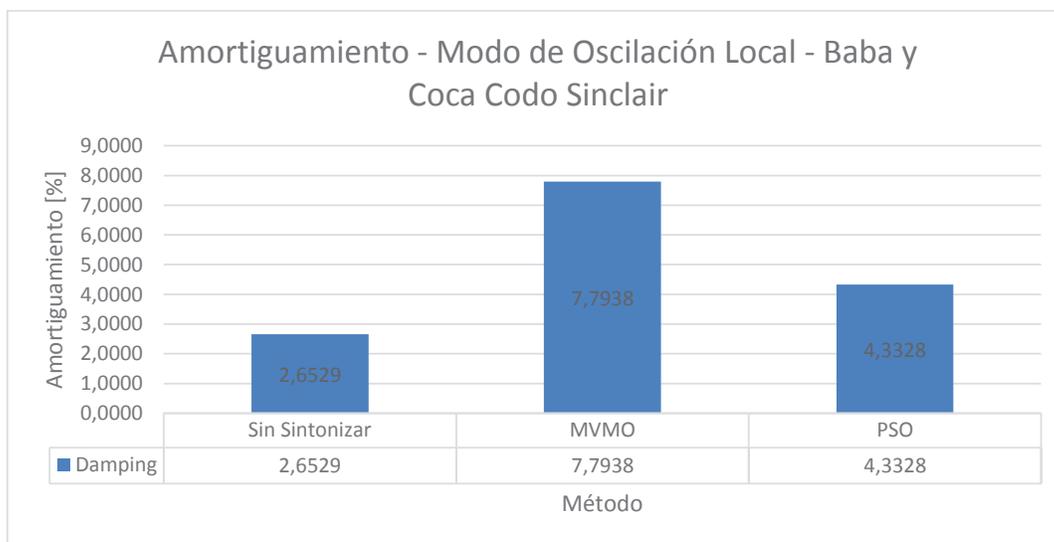


Figura 4.42 Comparación del amortiguamiento final obtenido para el método de oscilación por método de optimización.

La tabla (4.30) y la figura (4.43) presentan la comparativa de incremento de amortiguamiento

Tabla 4.30 Incremento del amortiguamiento por método para el modo de oscilación local – Máquinas participantes Baba y Coca Codo Sinclair

MODO DE OSCILACIÓN LOCAL - MAQUINAS PARICIPANTES BABA Y COCA CODO SINCALIR				
Método Sintonización	Modo	Damping Ratio	Damping Ratio	Incremento Amortiguamiento
		[-]	[%]	[%]
MVMO	Mode 01314	0,0779	7,7938	5,1409
	Mode 01315	0,0779	7,7938	5,1409
PSO	Mode 01337	0,0433	4,3328	1,6799
	Mode 01338	0,0433	4,3328	1,6799

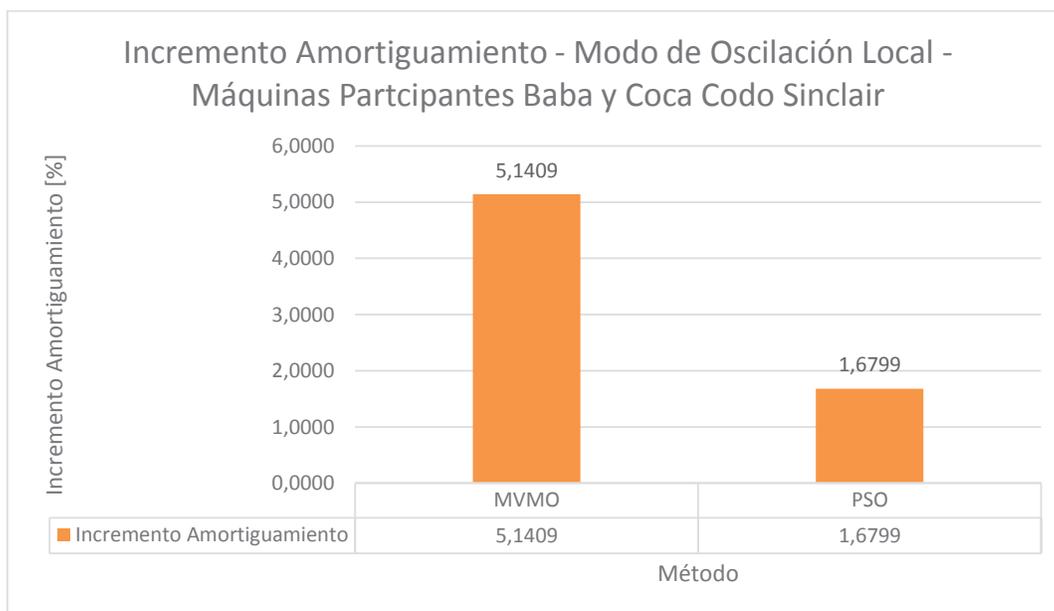


Figura 4.43 Comparación del incremento de amortiguamiento obtenido para el método de oscilación por método de optimización.

4.2.5.2.3 *Modo de oscilación interárea – Máquinas participantes de Colombia y Ecuador*

Este modo de oscilación se presenta entre máquinas de Colombia y Ecuador, en un inicio el modo presentaba un valor de amortiguamiento del 4,14% y posterior a la optimización con MVMO y PSO se alcanzan los siguientes resultados.

Tabla 4.31 Comparación de resultados por método para el modo de oscilación interárea – Máquinas participantes de Colombia y Ecuador

MODO DE OSCILACIÓN INTERÁREA - MÁQUINAS PARTICIPANTES DE COLOMBIA Y ECUADOR				
Método Sintonización	Modo	Damped Frequency	Damping Ratio	Damping Ratio
		[Hz]	[-]	[%]
Sin Sintonizar	Mode 01467	1,0299	0,0414	4,1412
	Mode 01468	1,0299	0,0414	4,1412
MVMO	Mode 01614	1,0283	0,0428	4,2845
	Mode 01615	1,0283	0,0428	4,2845
PSO	Mode 01619	1,0316	0,0432	4,3178
	Mode 01620	1,0316	0,0432	4,3178

En la figura (4.44) se detalla los valores alcanzados de amortiguamiento para cada método.

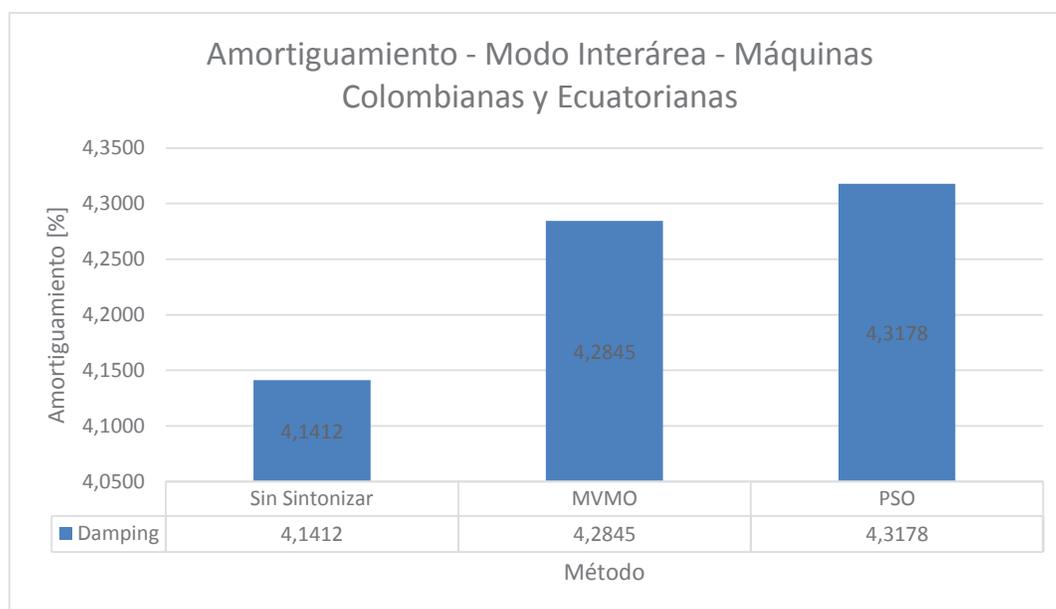


Figura 4.44 Comparación del amortiguamiento final obtenido para el método de oscilación por método de optimización.

En la tabla (4.32) y la gráfica (4.45) se presenta la comparación de incremento de amortiguamiento para cada método de optimización.

Tabla 4.32 Incremento del amortiguamiento por método para el modo de oscilación interárea – Máquinas participantes de Colombia y Ecuador

MODO DE OSCILACIÓN INTERÁREA - MAQUINAS PARTICIPANTES DE COLOMBIA Y ECUADOR				
Método Sintonización	Modo	Damping Ratio	Damping Ratio	Incremento Amortiguamiento
		[-]	[%]	[%]
MVMO	Mode 01614	0,0428	4,2845	0,1433
	Mode 01615	0,0428	4,2845	0,1433
PSO	Mode 01619	0,0432	4,3178	0,1766
	Mode 01620	0,0432	4,3178	0,1766

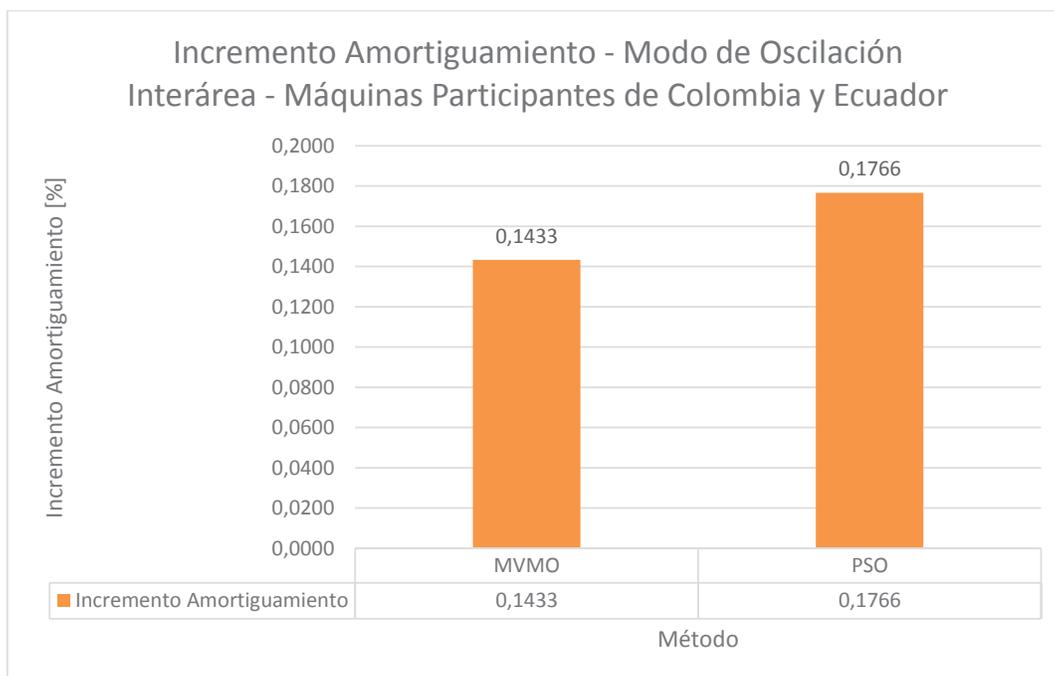


Figura 4.45 Comparación del incremento de amortiguamiento obtenido para el método de oscilación por método de optimización.

4.2.5.2.4 *Modo de oscilación local – Máquinas participantes Daule Peripa y Coca Codo Sinclair*

Inicialmente el modo oscilatorio presentaba una razón de amortiguamiento muy por debajo del límite establecido del 5%, teniendo un valor de 2,95%, posteriormente con la aplicación de los algoritmos de optimización se tienen los siguientes resultados.

Tabla 4.33 Comparación de resultados por método para el modo de oscilación local – Máquinas participantes Daule Peripa y Coca Codo Sinclair

MODO DE OSCILACIÓN LOCAL - MÁQUINAS PARTICIPANTES DAULE PERIPA Y COCA CODO SINCLAIR				
Método Sintonización	Modo	Damped Frequency	Damping Ratio	Damping Ratio
		[Hz]	[-]	[%]
Sin Sintonizar	Mode 01699	0,5990	0,0295	2,9508
	Mode 01700	0,5990	0,0295	2,9508
MVMO	Mode 01750	0,6223	0,1971	19,7088
	Mode 01751	0,6223	0,1971	19,7088
PSO	Mode 01741	0,7791	0,0901	9,0103
	Mode 01742	0,7791	0,0901	9,0103

Se tiene en la figura (4.46) los valores finales de amortiguamiento del modo de oscilación.

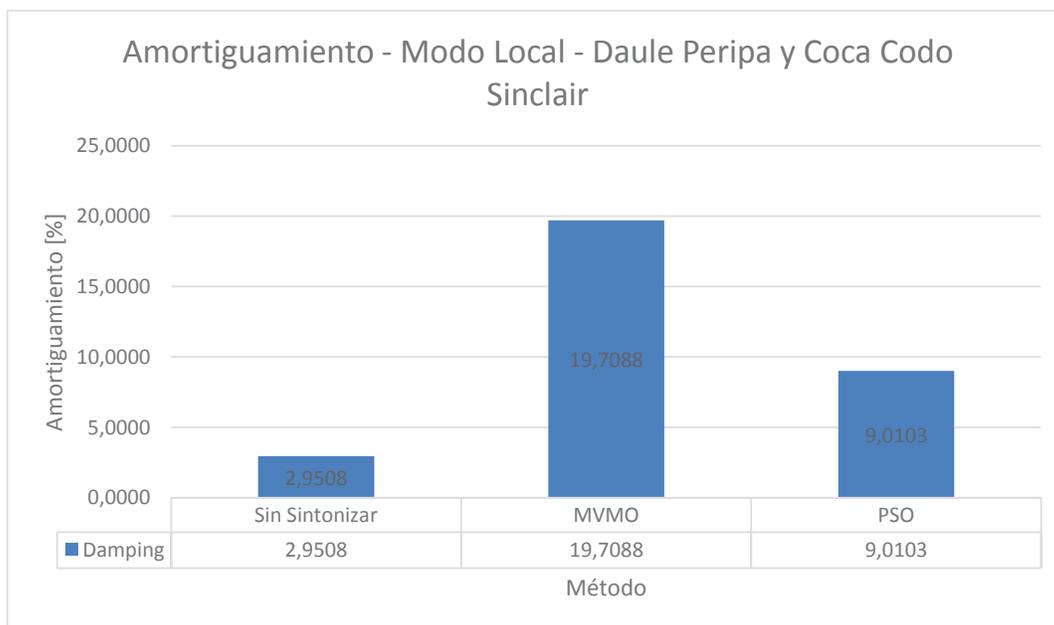


Figura 4.46 Comparación del amortiguamiento final obtenido para el método de oscilación por método de optimización.

Se presenta en la tabla (4.34) y la figura (4.47) respectivamente la comparación de valores de amortiguamiento del modo.

Tabla 4.34 Incremento del amortiguamiento por método para el modo de oscilación local – Máquinas participantes Daule Peripa y Coca Codo Sinclair

MODO DE OSCILACIÓN LOCAL - MAQUINAS PARICIPANTES DAULE PERIPA Y COCA CODO SINCLAIR				
Método Sintonización	Modo	Damping Ratio	Damping Ratio	Incremento Amortiguamiento
		[-]	[%]	[%]
MVMO	Mode 01750	0,1971	19,7088	16,7580
	Mode 01751	0,1971	19,7088	16,7580
PSO	Mode 01741	0,0901	9,0103	6,0595
	Mode 01742	0,0901	9,0103	6,0595

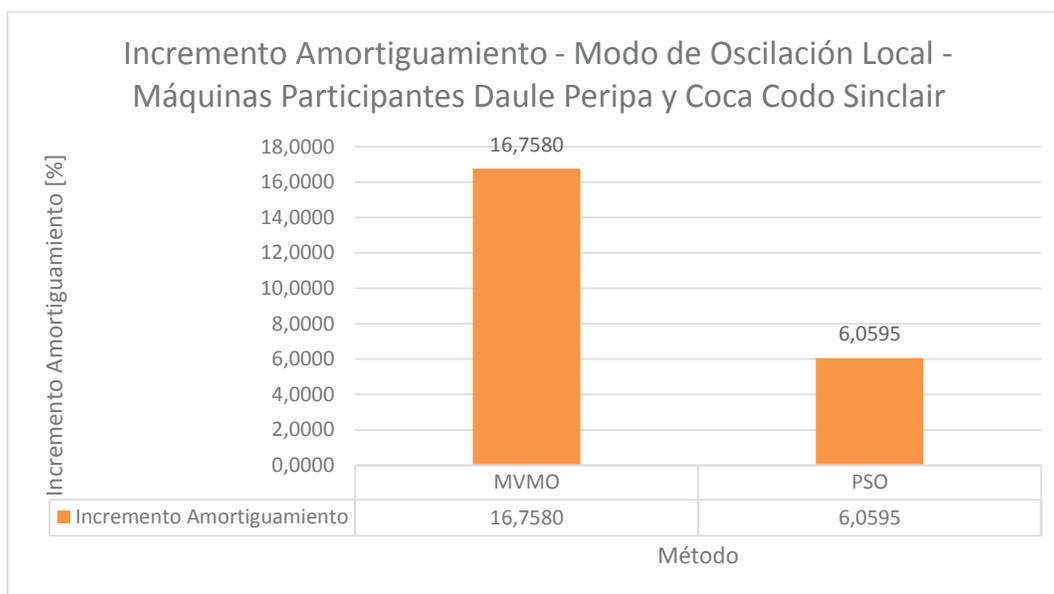


Figura 4.47 Comparación del incremento de amortiguamiento obtenido para el método de oscilación por método de optimización.

4.2.5.2.5 Modo de oscilación local – Máquina participante Daule Peripa

En este caso se presentaron dos modos oscilatorios de igual valor y características por lo que se los presenta en una misma tabla, en inicio el modo poseía un valor de amortiguamiento del 4,18% y posteriormente a la aplicación de los algoritmos de optimización se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 4.35 Comparación de resultados por método para el modo de oscilación local – Máquina participante Daule Peripa

MODO DE OSCILACIÓN LOCAL - MÁQUINA PARTICIPANTE DAULE PERIPA				
Método Sintonización	Modo	Damped Frequency	Damping Ratio	Damping Ratio
		[Hz]	[-]	[%]
Sin Sintonizar	Mode 01711	0,6555	0,0419	4,1857
	Mode 01712	0,6555	0,0419	4,1857
	Mode 01713	0,6555	0,0419	4,1857
	Mode 01714	0,6555	0,0419	4,1857
MVMO	Mode 01752	0,7000	0,2233	22,3265
	Mode 01753	0,7000	0,2233	22,3265
	Mode 01754	0,7000	0,2233	22,3265
	Mode 01755	0,7000	0,2233	22,3265
PSO	Mode 01747	0,8612	0,1216	12,1614
	Mode 01748	0,8612	0,1216	12,1614
	Mode 01749	0,8612	0,1216	12,1614
	Mode 01750	0,8612	0,1216	12,1614

En la figura (4.48) se detallan los valores de amortiguamiento alcanzados para el modo de oscilación.

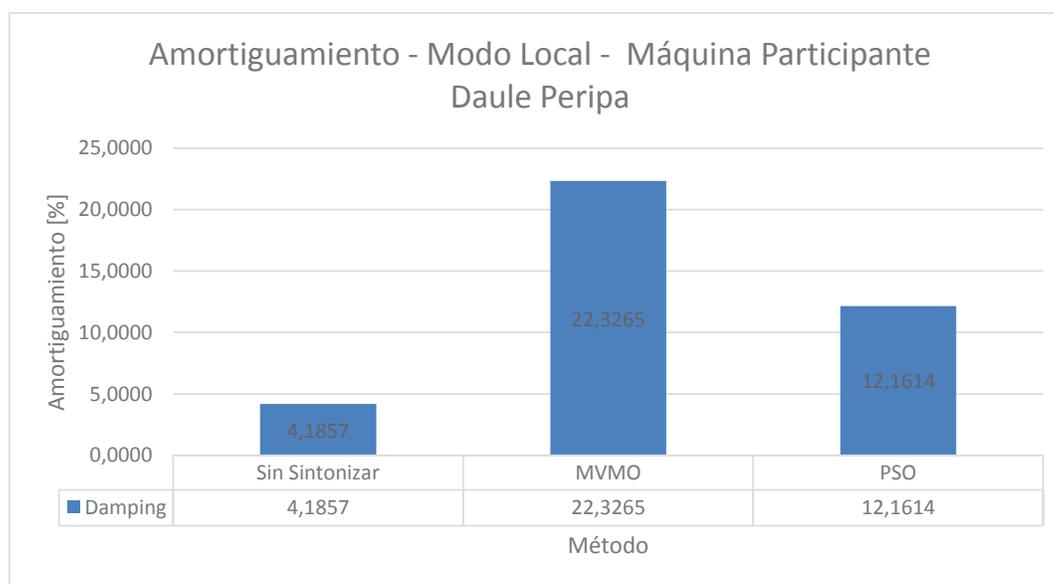


Figura 4.48 Comparación del amortiguamiento final obtenido para el método de oscilación por método de optimización.

En la tabla (4.36) y la figura (4.49) se presenta la comparativa del incremento de los valores de amortiguamiento obtenidos para cada uno de los métodos de optimización aplicados.

Tabla 4.36 Incremento del amortiguamiento por método para el modo de oscilación local – Máquina participante Daule Peripa

MODO DE OSCILACIÓN LOCAL - MAQUINAS PARTICIPANTE DAULE PERIPA				
Método Sintonización	Modo	Damping Ratio	Damping Ratio	Incremento Amortiguamiento
		[-]	[%]	[%]
MVMO	Mode 01752	0,2233	22,3265	18,1408
	Mode 01753	0,2233	22,3265	18,1408
	Mode 01754	0,2233	22,3265	18,1408
	Mode 01755	0,2233	22,3265	18,1408
PSO	Mode 01747	0,1216	12,1614	7,9756
	Mode 01748	0,1216	12,1614	7,9756
	Mode 01749	0,1216	12,1614	7,9756
	Mode 01750	0,1216	12,1614	7,9756

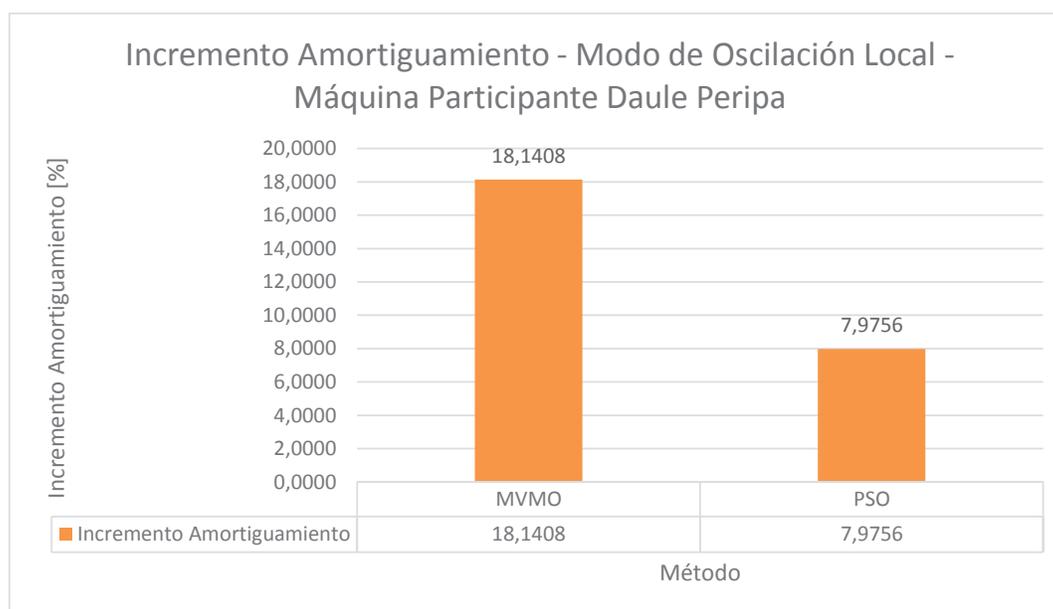


Figura 4.49 Comparación del incremento de amortiguamiento obtenido para el método de oscilación por método de optimización.

Una vez realizada la comparación de los resultados obtenidos para cada método de optimización en los respectivos modos oscilatorios, se puede establecer que el algoritmo MVMO genera un mayor incremento en el valor de amortiguamiento para cada modo de oscilación. En las gráficas comparativas se observó claramente que los valores alcanzados por dicho algoritmo son superiores a los obtenidos con el algoritmo PSO, en este punto es importante destacar que en la

mayoría de modos el algoritmo MVMO logra superar la barrera establecida como límite de razón de amortiguamiento con excepción del modo inter-área. Por el contrario con la aplicación del algoritmo PSO no logra obtener valores superiores al 5%. En el modo en el que participan máquinas de Colombia y Ecuador se tiene la particularidad que si bien ninguno de los métodos logra valores sobre el límite en este caso el PSO tiene una relativa mejor respuesta que en el MVMO. Con este análisis de estabilidad de pequeña señal se puede deducir que la aplicación del algoritmo MVMO sobre el sistema implica que la estabilidad del mismo mejore en mayor medida que con la aplicación del algoritmo de optimización PSO.

4.2.5.3 Análisis dinámico del sistema

Es importante realizar una comparación de la respuesta dinámica del sistema ante la ocurrencia de un transitorio electromecánico, como se había detallado anteriormente se simula una falla trifásica en la línea de transmisión Molino – Pascuales para verificar el comportamiento del sistema ante este evento.

En esta sección se procede a analizar la respuesta de la barra de Molino a 230 kV y de la unidad 1 de Coca Codo Sinclair, la respuesta de las otras máquinas que intervinieron en la optimización se presentan en el anexo digital 4.

4.2.5.3.1 Barra Molino 230 kV

En las figuras (4.50 a 4.53) se presenta la respuesta de voltaje y de frecuencia de la barra de Molino respectivamente, se presentan gráficas para la comparación con el sistema inicial analizado y para la comparación entre los métodos de optimización.

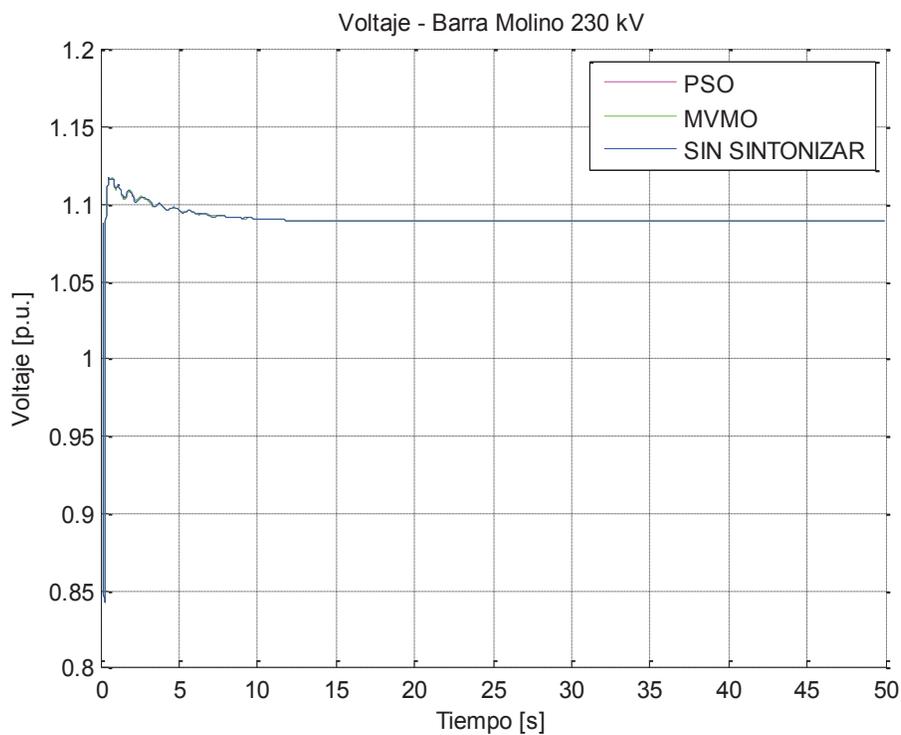


Figura 4.50 Comparación de la respuesta de voltaje para el sistema sin sintonizar, sintonizado con MVMO y PSO ante la ocurrencia de una falla en la línea Molino – Pascuales 230kV.

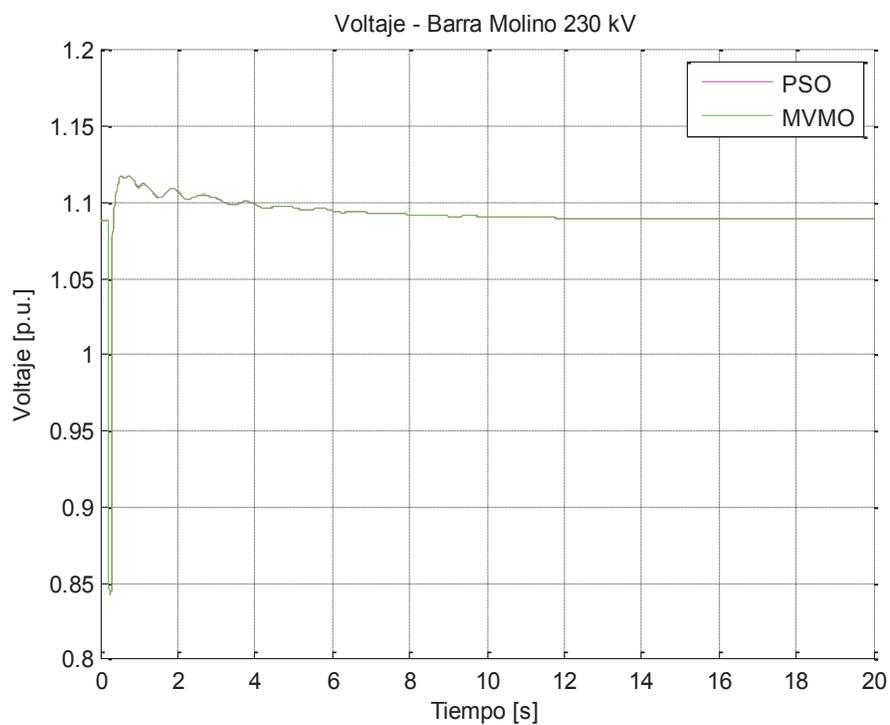


Figura 4.51 Comparación de la respuesta de voltaje para el sistema sintonizado con MVMO y PSO ante la ocurrencia de una falla en la línea Molino – Pascuales 230kV.

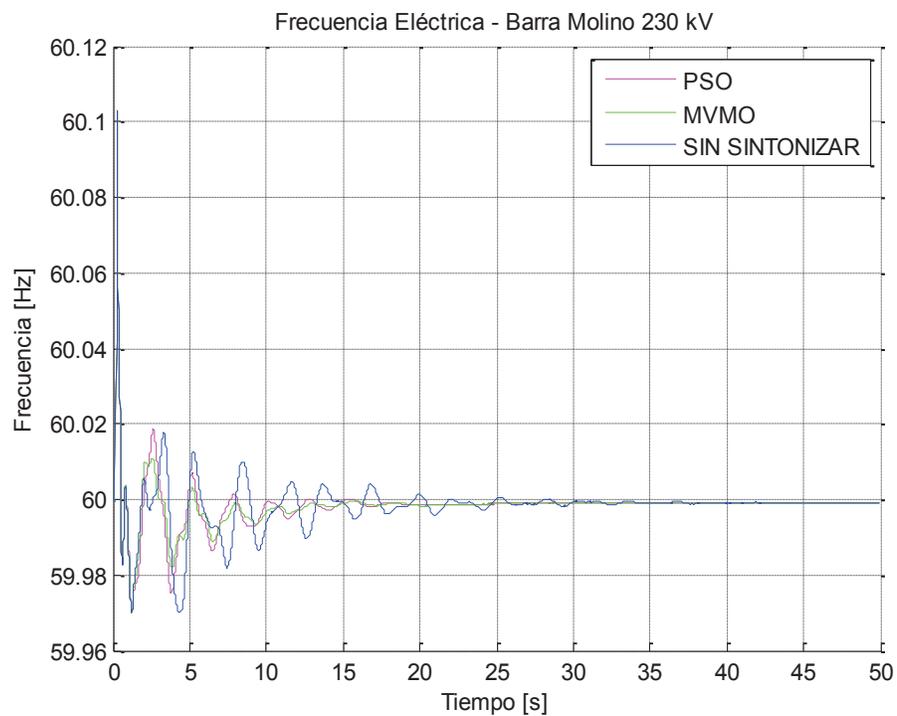


Figura 4.52 Comparación de la respuesta de frecuencia para el sistema sin sintonizar, sintonizado con MVMO y PSO ante la ocurrencia de una falla en la línea Molino – Pascuales 230kV.

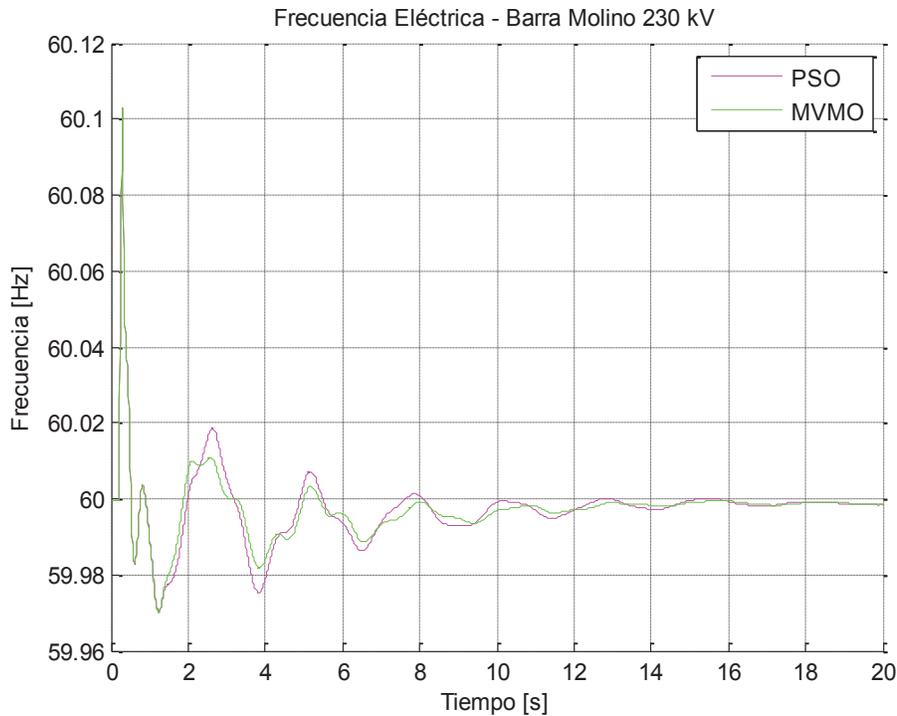


Figura 4.53 Comparación de la respuesta de frecuencia para el sistema sintonizado con MVMO y PSO ante la ocurrencia de una falla en la línea Molino – Pascuales 230kV.

La respuesta de voltaje ante la ocurrencia del evento transitorio no tiene mayor variación con respecto a la respuesta inicial del sistema, en cuanto a la respuesta de frecuencia que se presenta en la barra de molino se observa que existe una clara mejoría tanto para el PSO, así como para el MVMO, desde el punto de vista comparativo se observa que la respuesta del algoritmo MVMO es mejor que la del PSO dados los tiempos de estabilización y los picos de las oscilaciones que se presentan.

4.2.5.3.2 Unidad 1 de Coca Codo Sinclair

En las figuras (4.54 a 4.57) se presentan las respuestas de voltaje y frecuencia de la unidad de generación en estudio.

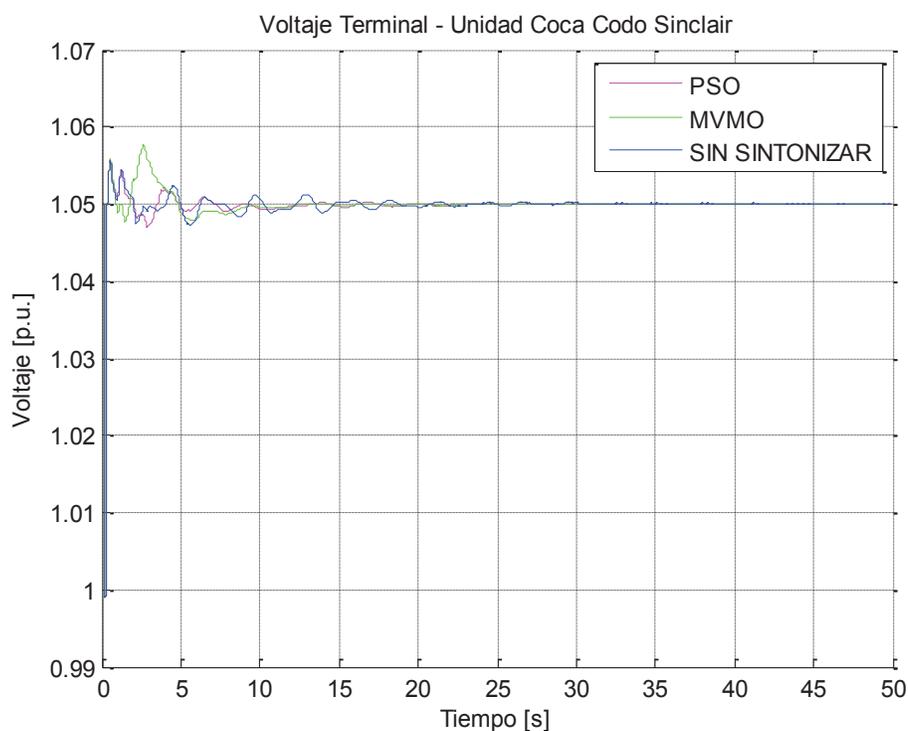


Figura 4.54 Comparación de la respuesta de voltaje de la unidad 1 de Coca Codo Sinclair para el sistema sin sintonizar, sintonizado con MVMO y PSO ante la ocurrencia de una falla en la línea Molino – Pascuales 230kV.

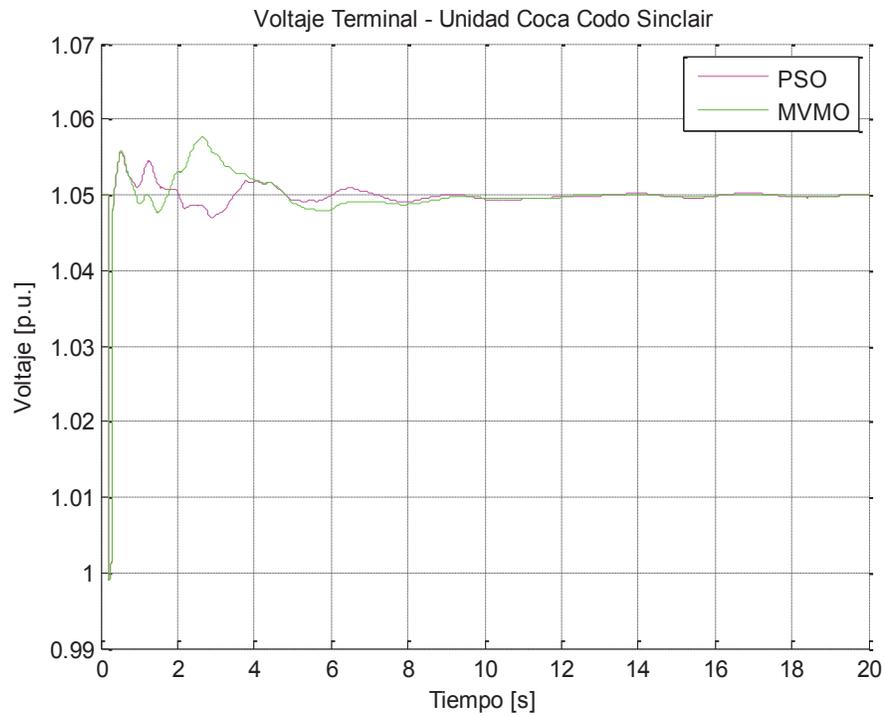


Figura 4.55 Comparación de la respuesta de voltaje de la unidad 1 de Coca Codo Sinclair para el sistema sintonizado con MVMO y PSO ante la ocurrencia de una falla en la línea Molino – Pascuales 230kV.

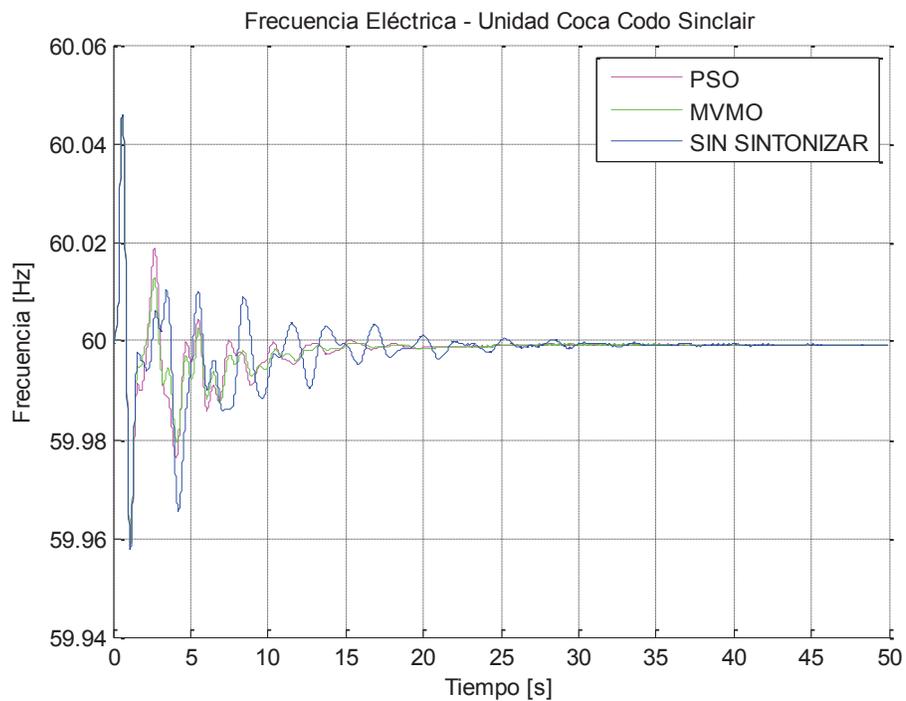


Figura 4.56 Comparación de la respuesta de frecuencia de la unidad 1 de Coca Codo Sinclair para el sistema sin sintonizar, sintonizado con MVMO y PSO ante la ocurrencia de una falla en la línea Molino – Pascuales 230kV.

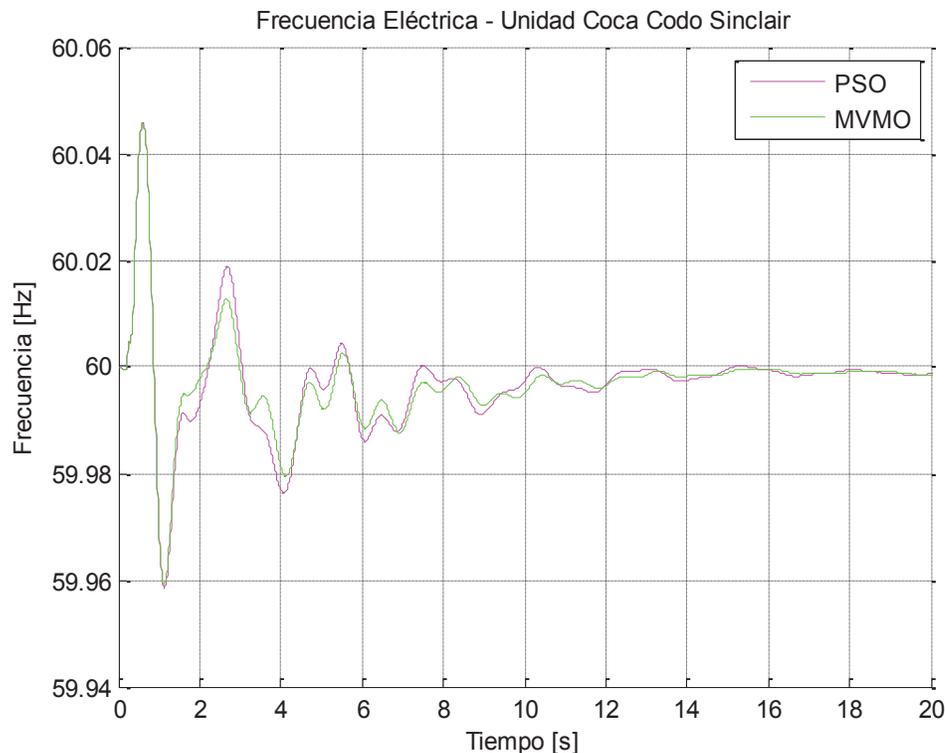


Figura 4.57 Comparación de la respuesta de frecuencia de la unidad 1 de Coca Codo Sinclair para el sistema sintonizado con MVMO y PSO ante la ocurrencia de una falla en la línea Molino – Pascuales 230kV.

Se observa que la respuesta de voltaje de la unidad de Coca Codo mejora al momento de aplicar los algoritmos de optimización, a nivel de comparación se tiene que la respuesta del MVMO se estabiliza en menor tiempo que la del PSO con la salvedad de que se presenta un pico inicial y que no supera los límites establecidos, en cuanto a la respuesta de frecuencia se tiene que la respuesta de la unidad al haber calibrado los estabilizadores de potencia con el método MVMO mejora en relación al sistema inicial y comparativamente hablando se tiene que es mejor que la respuesta obtenida con el algoritmo PSO.

En las figuras (4.58 a 4.61) se presentan las respuestas de potencia activa y reactiva de la unidad de Coca Codo Sinclair durante la ocurrencia del evento transitorio.

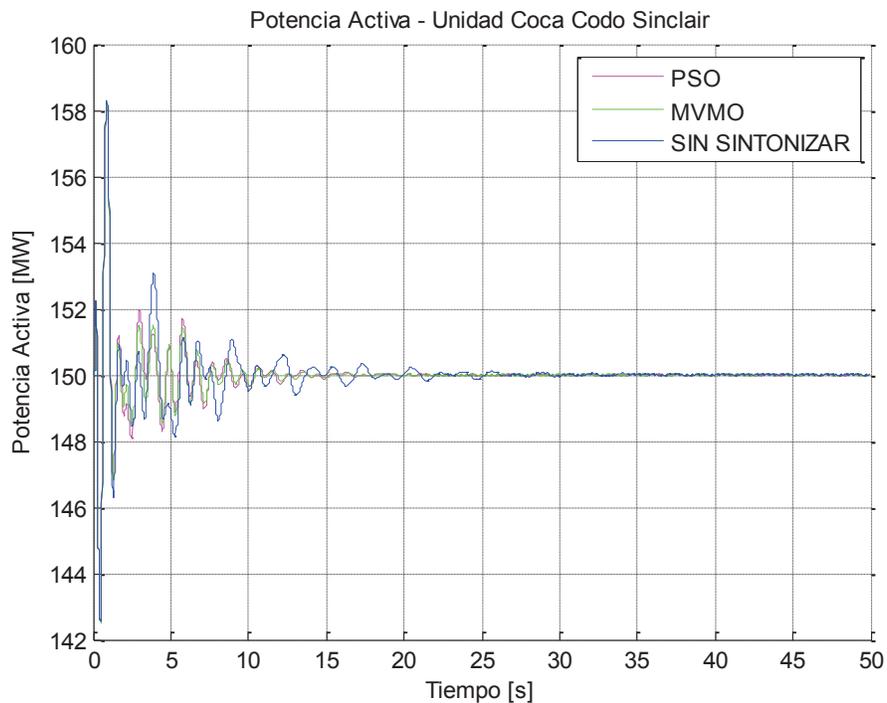


Figura 4.58 Comparación de la respuesta de potencia activa de la unidad 1 de Coca Codo Sinclair para el sistema sin sintonizar, sintonizado con MVMO y PSO ante la ocurrencia de una falla en la línea Molino – Pascuales 230kV.

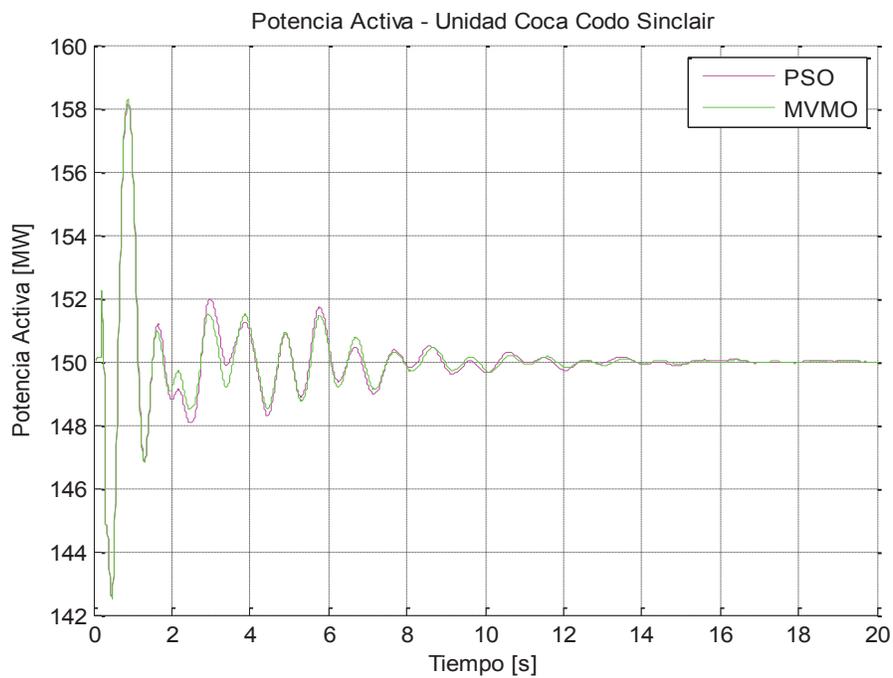


Figura 4.59 Comparación de la respuesta de potencia activa de la unidad 1 de Coca Codo Sinclair para el sistema sintonizado con MVMO y PSO ante la ocurrencia de una falla en la línea Molino – Pascuales 230kV.

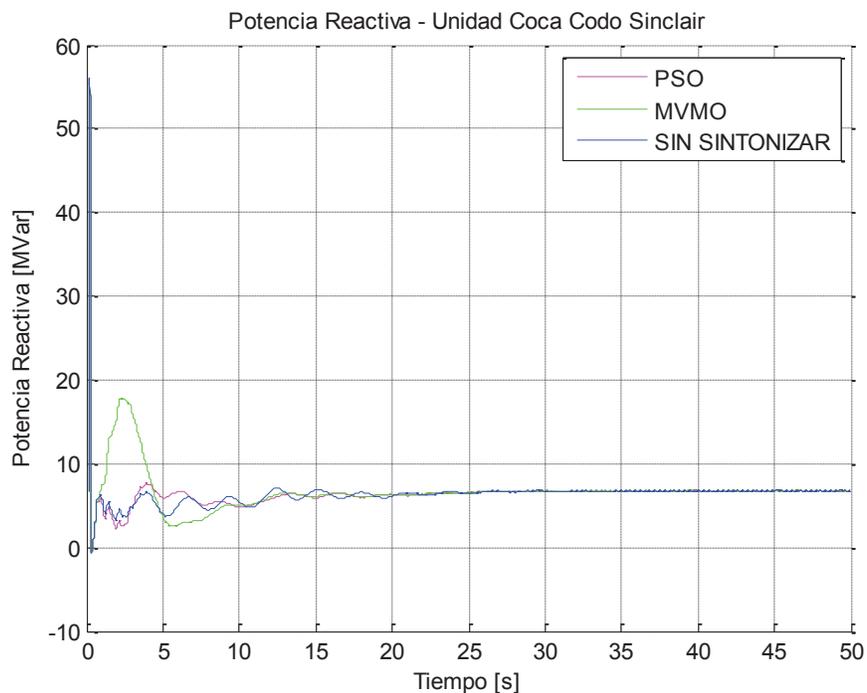


Figura 4.60 Comparación de la respuesta de potencia reactiva de la unidad 1 de Coca Codo Sinclair para el sistema sin sintonizar, sintonizado con MVMO y PSO ante la ocurrencia de una falla en la línea Molino – Pascuales 230kV.

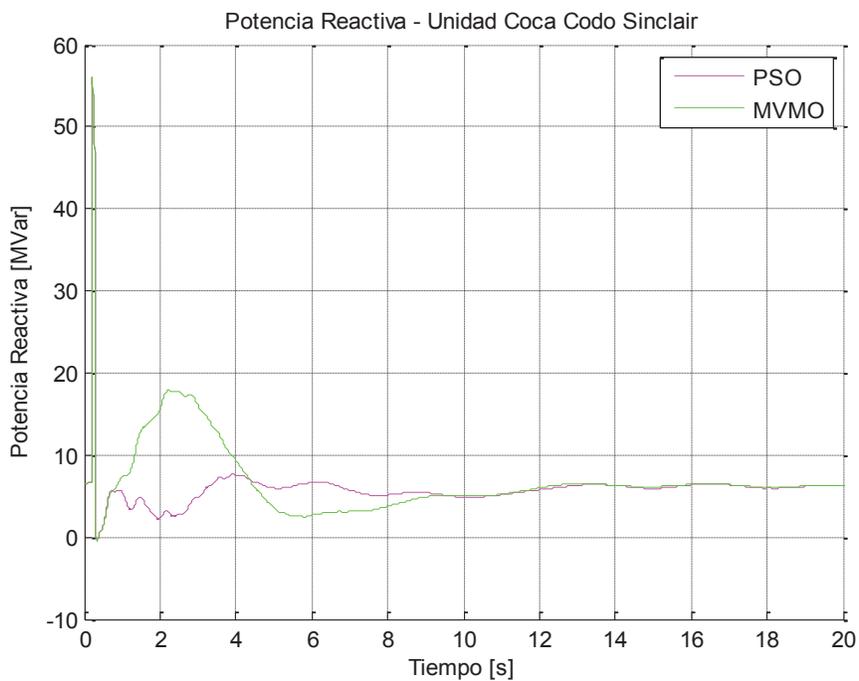


Figura 4.61 Comparación de la respuesta de potencia reactiva de la unidad 1 de Coca Codo Sinclair para el sistema sintonizado con MVMO y PSO ante la ocurrencia de una falla en la línea Molino – Pacuales 230kV.

Se observa que la respuesta de potencia activa de la unidad en estudio mejora notablemente al haber sintonizado los parámetros de los PSS con los métodos de optimización aplicados, de forma comparativa se tiene que los resultados que se tienen con el método MVMO ofrece mejores resultados que los obtenidos con el método PSO, ya que los tiempos de estabilización y las oscilaciones se reducen en un mayor porcentaje con el MVMO. En cuanto a la potencia reactiva si bien la respuesta mejora se debe hacer un hincapié en cuanto a la comparación puesto que el MVMO logra una estabilización de la respuesta, el PSO lo consigue de mejor manera, ya que en el primer método en cuestión genera un pico de potencia reactiva que no supera los límites de la máquina y que posteriormente se logra la estabilidad.

Habiendo analizado estos resultados se puede afirmar que, en cuanto a la respuesta del sistema ante eventos transitorios, el MVMO consigue mejores resultados que en el caso del PSO.

La respuesta del sistema para condición de demanda mínima se presenta en el anexo 3.

4.2.5.4 Análisis de convergencia y tiempos de ejecución

En esta sección se comparan los resultados desde el punto de vista de convergencia y tiempos de iteración de cada uno de los algoritmos, como se detalló al inicio de este capítulo la asignación del número de iteraciones fue determinado mediante la ejecución de los programas en los procesos de prueba previos a la corrida final, para esto se determinó un número de iteraciones tanto para MVMO como para el PSO.

En las figuras (4.62 y 4.63) se presentan los procesos de convergencia para cada algoritmo. En el caso de la figura (4.64) se realiza un acercamiento de las convergencias para que se puedan mostrar en una sola imagen para que de esta manera el lector tenga una noción del proceso en el que convergen los algoritmos, se limita el eje de iteraciones a 50 para poder establecer una comparativa.

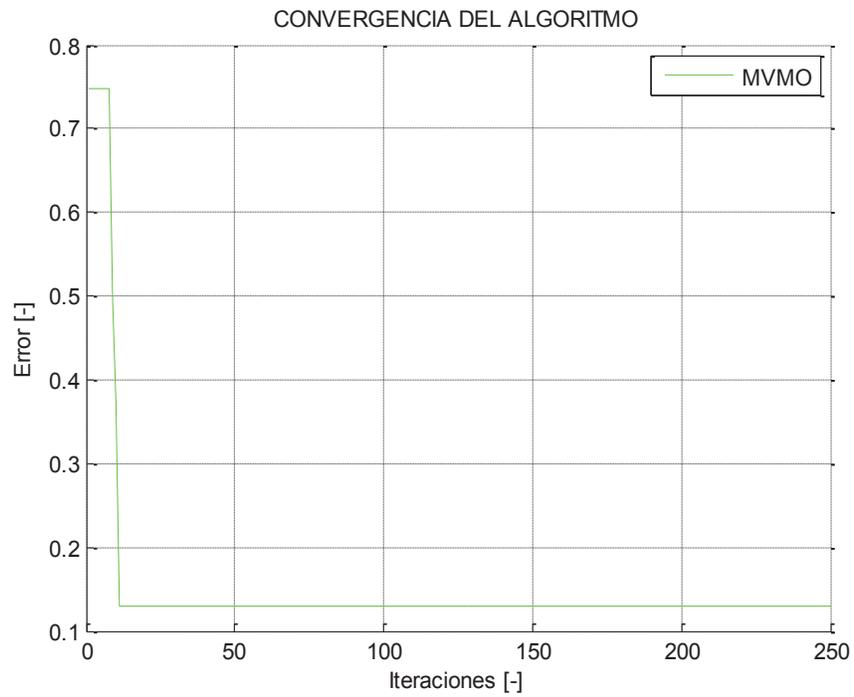


Figura 4.62 Convergencia de la función objetivo del algoritmo MVMO.

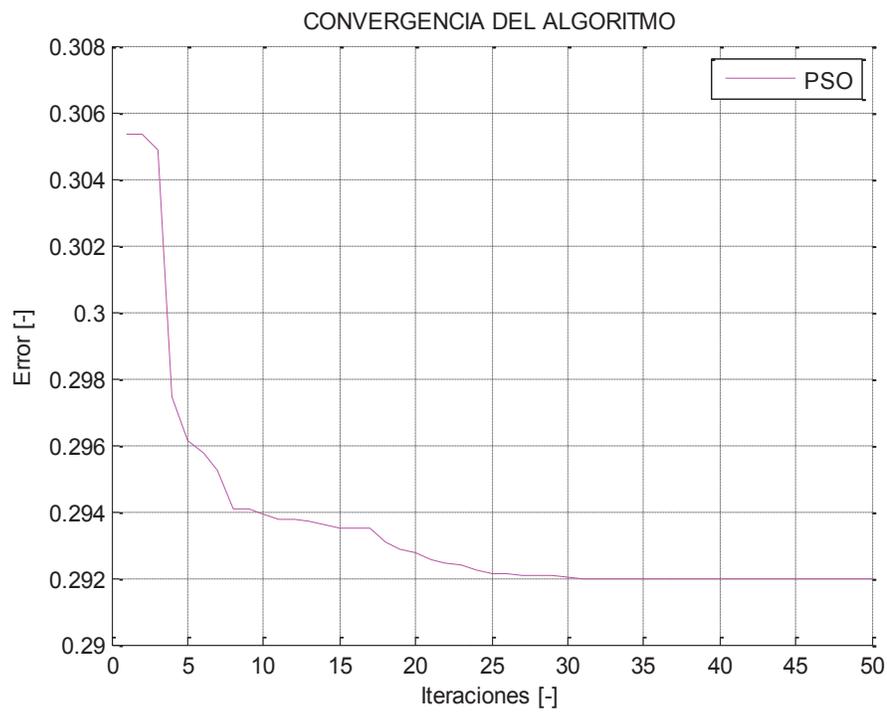


Figura 4.63 Convergencia de la función objetivo del algoritmo PSO.

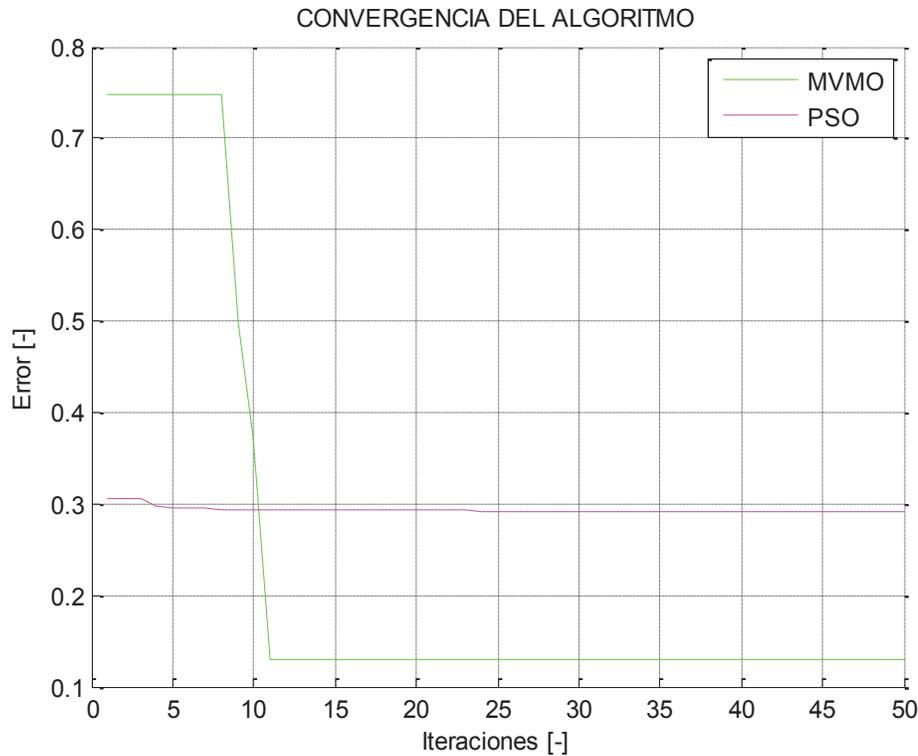


Figura 4.64 Comparación de la convergencia del algoritmo MVMO y PSO ajustados a 50 iteraciones

En el caso de la ejecución de los algoritmos en un sistema tan extenso como el Sistema Nacional Interconectado, produce que los tiempos de ejecución y los procesos de convergencia del sistema se vean afectados en relación a la aplicación ejecutada en el sistema de pruebas de nueve barras, esto afecta directamente al cumplimiento de la función objetivo, como se observa en las gráficas se aprecia que los algoritmos se acercan al mínimo error posible, esto se justifica puesto que el sistema seleccionado para la aplicación cuenta con la totalidad del sistema Colombiano con sus sistemas de control en funcionamiento.

Con esta premisa se analiza que la convergencia del MVMO se produce en un mayor número de iteraciones logrando alcanzar una mayor cercanía a la función objetivo, mientras que el PSO utiliza un menor número de iteraciones, pero en este caso la función objetivo no se encuentra tan próxima del mínimo error que se busca. En la tabla (4.37) se presenta los tiempos de ejecución para cada algoritmo respectivamente.

Tabla 4.37 Comparación tiempos de ejecución de los algoritmos

TIEMPO DE EJECUCIÓN DE LOS ALGORITMOS			
Método Sintonización	Tiempo	Iteraciones establecidas para la ejecución	Mínimo Error Alcanzado
	[h]		
MVMO	36,64	250	0,1298
PSO	37,60	50	0,2919

De acuerdo a los tiempos de iteración y la convergencia alcanzada para la función objetivo en cada uno de los programas, se tiene que el algoritmo MVMO refleja mejores resultados en cuanto a su ejecución en comparación con el algoritmo PSO, los tiempos de ejecución son similares con la gran diferencia de que el MVMO corre un número mayor de iteraciones y alcanza un mejor resultado en cuanto al objetivo de optimización, a contrario del PSO, que en un tiempo similar ejecuta un menor número de iteraciones, los valores objetivo al que llega distan mucho con respecto al otro algoritmo.

Con la información obtenida en el apartado de comparación de los métodos de optimización se puede aseverar que el algoritmo MVMO ofrece mejores resultados que los que presenta el PSO.

CAPÍTULO V

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Se corroboró que la inclusión de estabilizadores de potencia (PSS) adecuadamente sintonizados en los controles de las unidades de generación contribuyen al mejoramiento de la estabilidad del sistema dado que aumentan la razón de amortiguamiento de los modos oscilatorios.
- La aplicación de algoritmos de optimización heurísticos mostró ser una herramienta válida para calibrar parámetros de los estabilizadores de potencia, puesto que tienen la ventaja de que el proceso de optimización puede llevarse a cabo en sistemas multimáquina de gran complejidad matemática a diferencia de los métodos clásicos de optimización.
- Se logró validar una base de datos del Sistema Nacional Interconectado al año 2018, siguiendo la metodología adecuada para la inclusión de modelos de control de las nuevas centrales de generación, comprobando su adecuado funcionamiento en diferentes condiciones de operación y obteniendo respuestas satisfactorias.
- Al incorporar los modelos desarrollados en isla de las nuevas centrales de generación a la base de datos del SNI se consiguió que estos controles no perjudiquen a la respuesta estable del sistema, sino más bien que contribuyan al mejoramiento de la estabilidad ante la presencia de perturbaciones.
- La sintonización de PSS mediante los algoritmos de optimización MVMO y PSO para el sistema de pruebas produjo notables mejorías en el amortiguamiento de los modos oscilatorios cuyos valores se encontraban por debajo del límite establecido como valor crítico de razón

de amortiguamiento, en el caso del SNI el algoritmo MVMO logró un incremento del amortiguamiento en los modos problema, no así el PSO cuyos valores si bien se incrementaron no en todos los casos los modos de oscilación superaron el valor límite requerido.

- Se determinó que la aplicación de los algoritmos MVMO y PSO en el sistema de pruebas IEEE 9 barras permitió aumentar la razón de amortiguamiento de los modos de oscilación cuyos valores eran inferiores al 15%, constatándose una mejoría en el comportamiento del sistema ante la ocurrencia de transitorios electromecánicos, teniendo que el algoritmo PSO consiguió una respuesta más satisfactoria que el MVMO.
- La metodología propuesta para determinar las unidades de generación que intervienen dentro del proceso de optimización mostró ser más efectiva, puesto que al trabajar únicamente con aquellas máquinas con mayor participación en los modos oscilatorios se obtienen mejores resultados en cuanto a estabilidad de pequeña señal y análisis dinámico del sistema, que cuando se busca que todas las máquinas del sistema intervengan dentro de la optimización.
- El algoritmo MVMO presentó una mejor respuesta al ser aplicado en la base de datos del SNI 2018 incrementando en mayor porcentaje el amortiguamiento de los modos oscilatorios que se encontraban por debajo del 5%, en este caso se logra mejorar todos los modos con excepción del Interárea que su amortiguamiento no llegó al límite establecido. El algoritmo PSO presentó igualmente mejorías, pero en menor rango puesto que solo dos modos lograron incrementar su razón de amortiguamiento por sobre el 5%, concluyendo que el MVMO permite encontrar mejores soluciones.
- El modo Interárea no superó el límite establecido de amortiguamiento posterior a la optimización con los algoritmos MVMO y PSO, puesto que en este modo tienen una gran participación las máquinas del sistema colombiano que se encuentra integrado en su totalidad a la base de datos del SNI 2018, estas máquinas no forman parte del proceso de optimización, cabe destacar que en este modo el algoritmo PSO logró un mayor incremento que el MVMO.

- Se concluye que, para la aplicación de estos algoritmos en un sistema robusto, con gran cantidad de elementos y cuya complejidad matemática es muy elevada, el algoritmo MVMO obtiene mejores resultados ya que su proceso de búsqueda de soluciones es más efectivo en tiempos de ejecución, convergencia y resultados en comparación con el PSO.

5.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda la aplicación de ambos algoritmos de optimización en sistemas de pequeña escala ya que ambos brindan buenos resultados, a su vez para una aplicación en un sistema extenso es recomendable la aplicación del algoritmo MVMO.
- Para mejorar el proceso de ejecución de los algoritmos MVMO y PSO se debe trabajar únicamente con las máquinas que tienen mayor participación en los modos de oscilación problema, ya que esto reduce el número de variables y agiliza los tiempos de convergencia de los algoritmos.
- Es necesario contar con una base de datos cuyos modelos de control hayan sido previamente validados para que los resultados que se obtengan sean positivos, y que los algoritmos puedan aplicarse sin inconvenientes de convergencia del software DIgSilent POWERFACTORY.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] K. Prabha, Power System Stability and Control, McGraw- Hill, 1994.
- [2] G. Enriquez, Análisis Moderno de Sistemas Eléctricos de Potencia,
- [3] B. Kalyan Kumar, Power System Stability and Control, Indian Institute of Technology Madras.
- [4] M.J. Gibbard, P. Pourbeik, D.J. Vowles, Small-Signal Stability, Control and Dynamic Performance of Power Systems.
- [5] H. Flores, Desarrollo De Una Metodología Multimáquina Para La Ubicación Y Sintonización De Estabilizadores De Sistemas De Potencia De Forma Automática, Tesis Previa A La Obtención Del Grado En Master (Msc) En Ciencias De Ingeniería Eléctrica, 2016
- [6] Manfred Gilli, An Introduction to Optimization Heuristics, University of Cyprus, 2004.
- [7] James A. Momoh, Adaptive Stochastic Optimization Techniques with Applications.
- [8] Pappala , Application Of Pso For Optimization For Power System Under Uncertainty.
- [9] Cepeda, J.; Rueda, J. L.; Erlich, I.; Korai, A.; F. Gonzalez-Longatt, “ Mean-Variance Mapping Optimization Algorithm for Power System Applications in DigSILENT PowerFactory” PowerFactory Applications for Power System Analysis Book, Chapter 12, Springer International Publishing, 2014.
- [10] Rueda, J. L.; Cepeda, J.; Erlich, I. “Estimation of Location and Coordinated Tuning of PSS based on Mean-Variance Mapping Optimization”.
- [11] Rosanna Loor, “Reconfiguración de redes de distribución eléctrica basada en optimización Mapeo de Media-Varianza”, Tesis Previa a la obtención del grado en Magister en eficiencia energética, 2014.
- [12] S. Nagalakshmi, Computational intelligent techniques for loadability enhancement of deregulated power system using facts devices, Tesis previa a la obtención del grado de doctor en sistemas eléctricos de potencia.
- [13] D. Maringer, Portfolio Management with Heuristic Optimization, Chapter 2, Springer International Publishing, 2005.
- [14] K. Lee and M. El-Sharkawi, Modern heuristic optimization techniques, Chapter 4, IEEE Press Series, 2008.

- [15] A. Stativa and V. Stahie, Optimal Tuning and Placement of Power System Stabilizer using Particle Swarm Optimizatio Algorithm, October 2012.
- [16] S. Sunkara, R. Narne and P. Panda, Co-ordinated Tuning of PSS with TCSC Damping Controller through Advanced Adaptive PSO for a Multi-machine Power System, India.
- [17] N. Castrillón, M. Sánchez and J. Pérez, A Tool for Optimal PSS Tuning for the Colombian Power System.
- [18] M. Ullauri, Estructuración de una base de datos del S.N.I. Ecuatoriano en DIgSILENT POWERFACTORY para análisis de estabilidad con modelos validados de sus unidades de generación, Tesis previa a la obtención del Título de Ingeniero Eléctrico, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Quito, 2015.
- [19] J. Lozada, Sintonización de estabilizadores de potencia (PSS) en sistemas multi máquina, Tesis previa a la obtención del Título de Ingeniero Eléctrico, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Quito, 2015.

7 ANEXOS

ANEXO 1: Análisis de resultados para el Generador 2 y 3 Sistema IEEE 9 Barras

GENERADOR 2

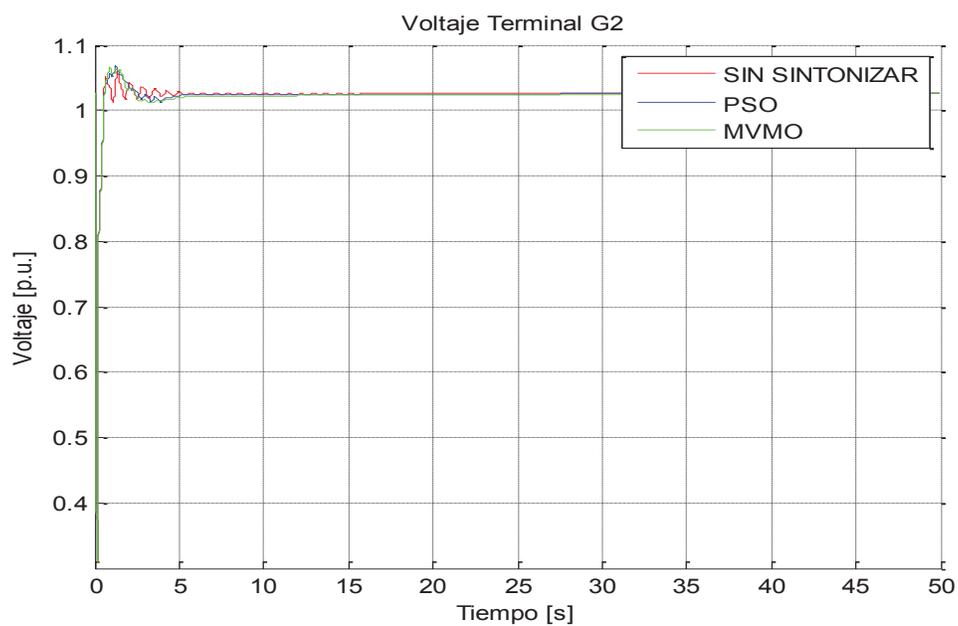


Figura A1.1 Comparación resultados voltaje terminal G2.

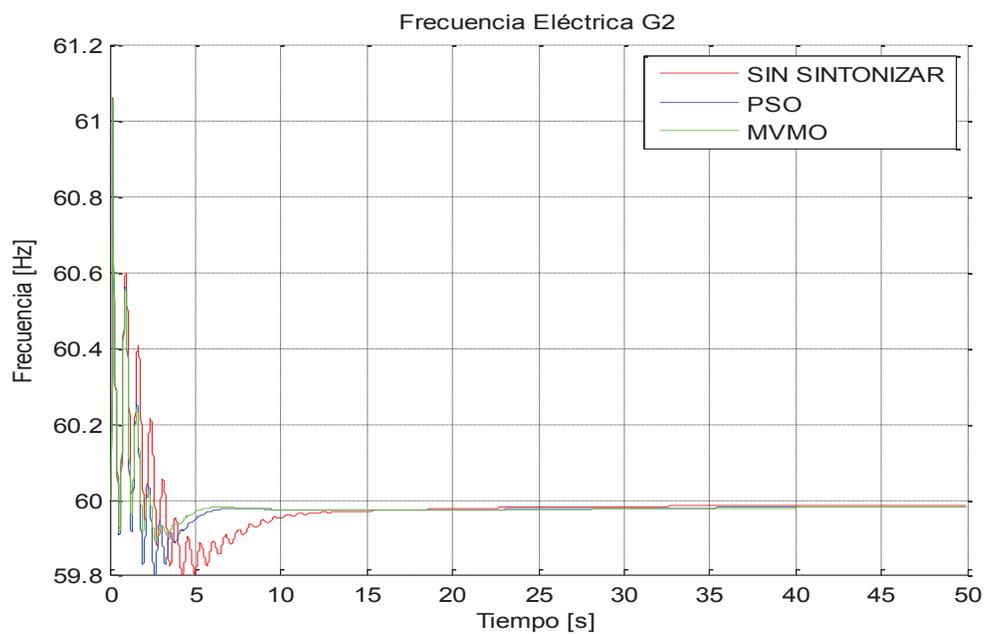


Figura A1.2 Comparación resultados frecuencia eléctrica G2.

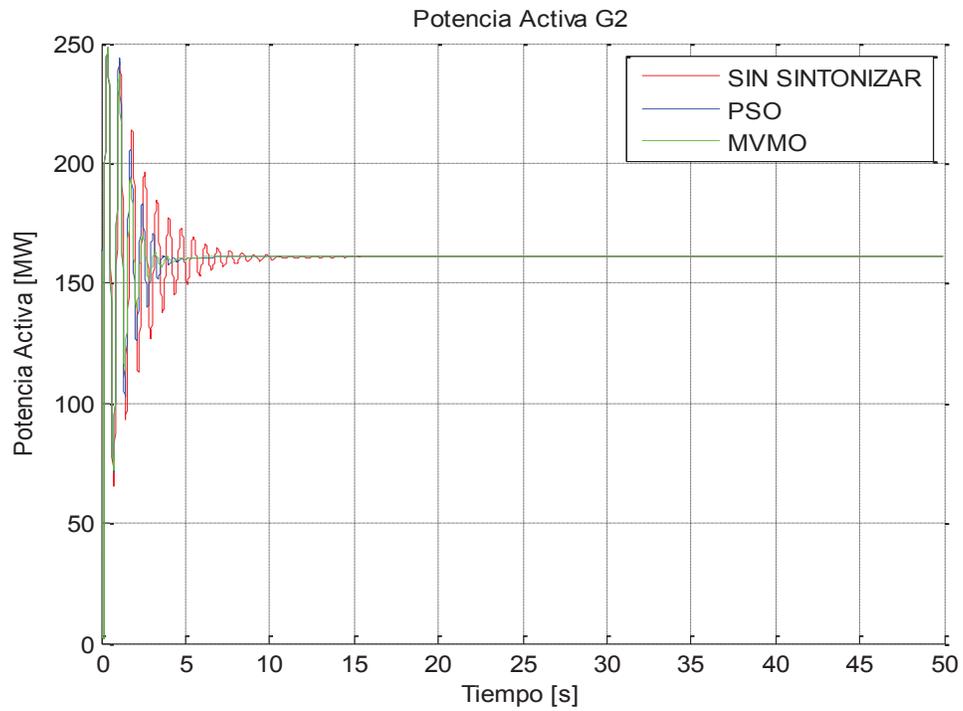


Figura A1.3 Comparación resultados potencia activa G2.

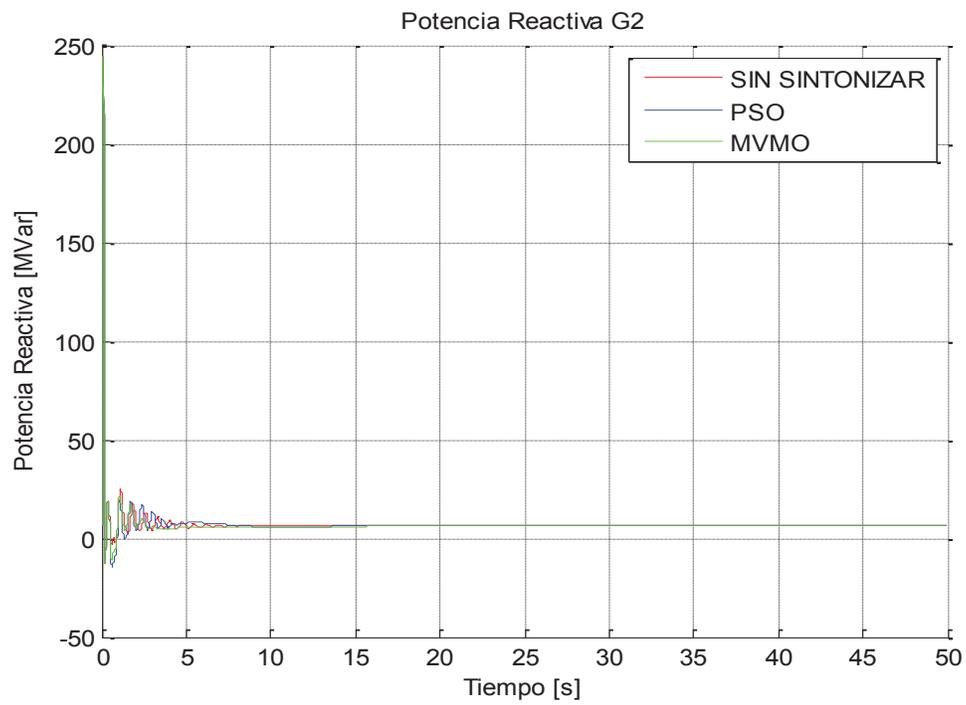


Figura A1.4 Comparación resultados potencia reactiva G2.

GENERADOR 3

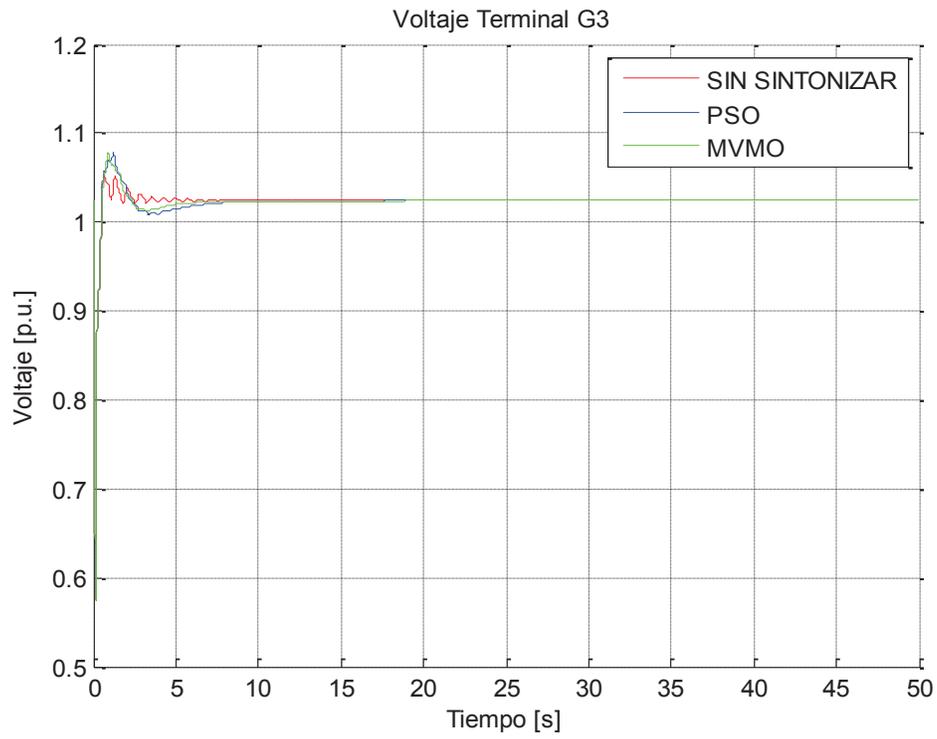


Figura A1.5 Comparación resultados voltaje terminal G3.

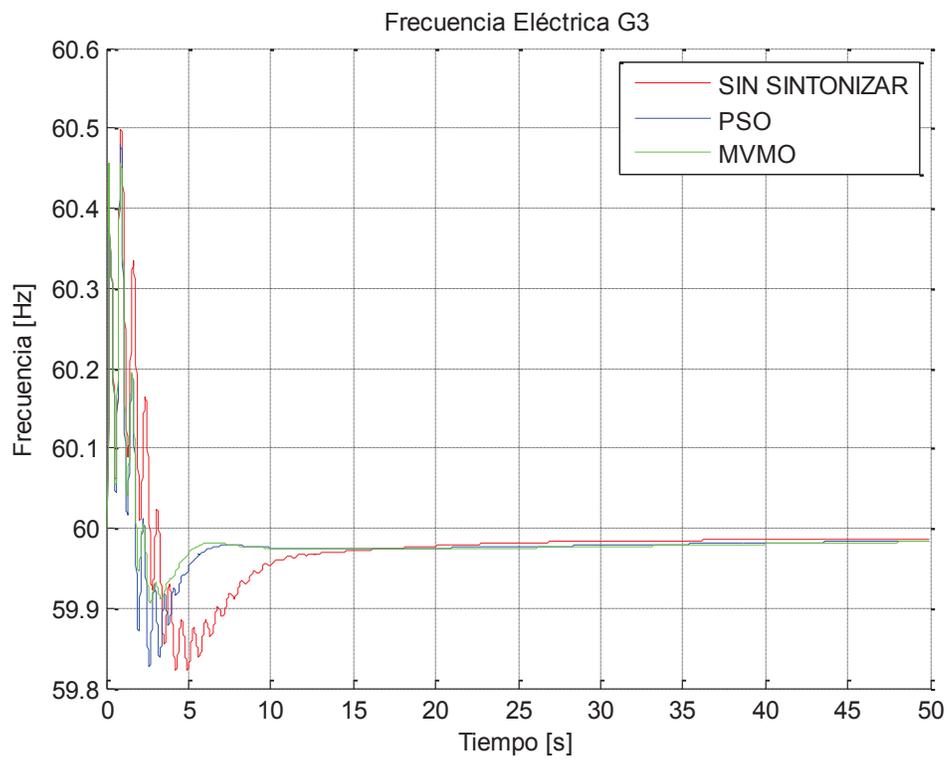


Figura A1.6 Comparación resultados frecuencia eléctrica G3.

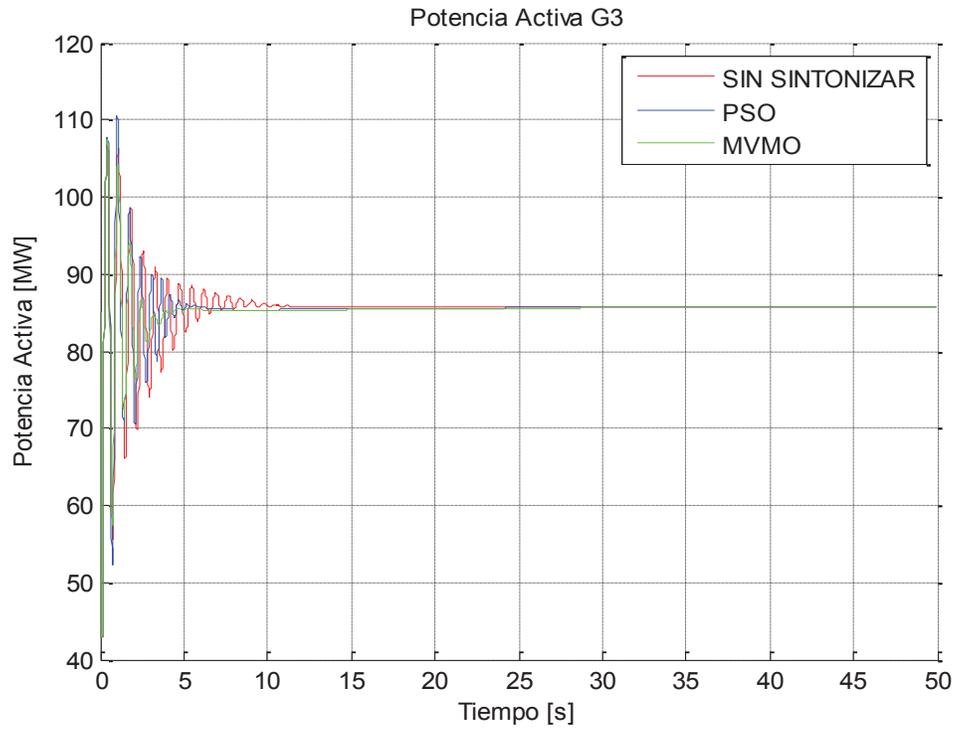


Figura A1.7 Comparación resultados potencia activa G3.

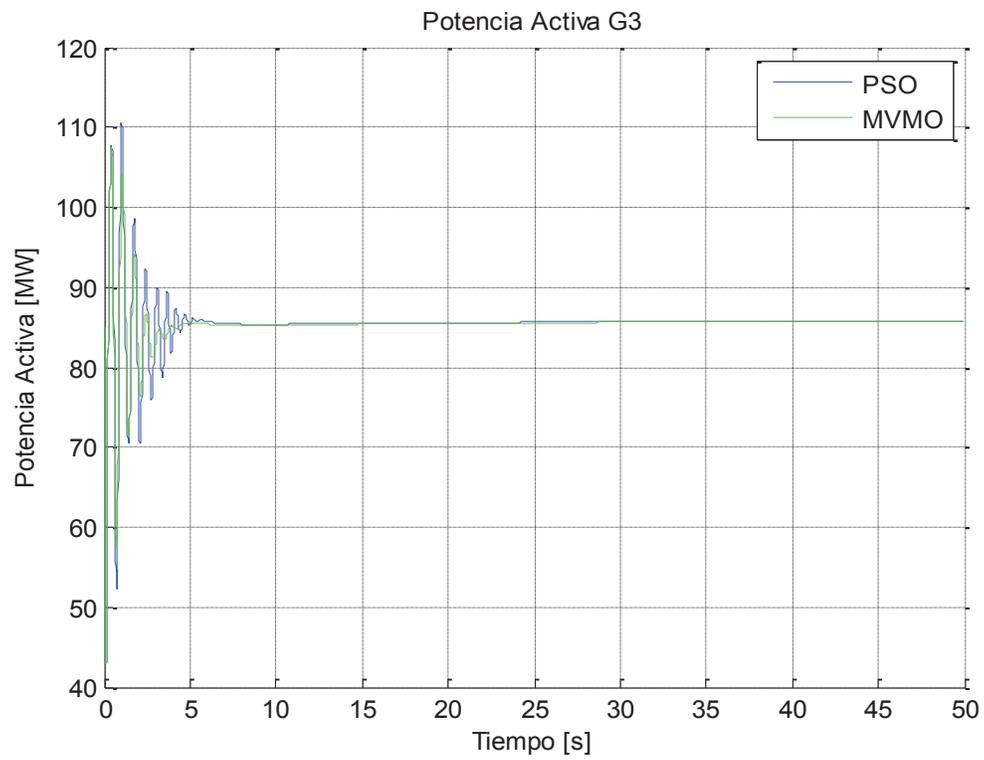


Figura A1.8 Comparación resultados potencia activa G3.

ANEXO 2: Parámetros sintonizados por método de los estabilizadores de sistemas de potencia (PSS) de las máquinas del SNI 2018.

Parámetros obtenidos con el método MVMO

Tabla A2.1 Parámetros del PSS de la unidad de Baba con MVMO.

MÉTODO DE OPTIMIZACION MVMO			
PSS DE UNIDADES DE BABA			
Parámetro	Valor	Unidad	Descripción
Tf	0,02	[s]	Frecuency Transducer Time Constant
Tw1	3	[s]	1st Washout 1th Time Constant
Tw2	3	[s]	1st Washout 2th Time Constant
T6	0	[s]	1st Signal Transducer Time Constant
Tp	0,02	[s]	Power Transducer Time Constant
Tw3	3	[s]	2nd Washout 1th Time Constant
Tw4	3	[s]	2nd Washout 2th Time Constant
Ks2	0,3	[pu]	2nd Signal Transducer Factor
T7	3	[s]	2nd Signal Transducer Time Constant
Ks3	1	[s]	Washouts Coupling Factor
T8	0,4	[s]	Ramp Track. Filter Derivative Time Constant
T9	0,1	[s]	Ramp Track. Filter Delay Time Constant
N	1	[-]	Ramp Tracking Filter
M	4	[-]	Ramp Tracking Filter
Ks1	23,88056	[pu]	PSS Gain
T1	0,086383	[s]	1st Lead-Lag Deriv. Time Constant
T2	0,006629	[s]	1st Lead-Lag Delay Time Constant
T3	0,116027	[s]	2nd Lead-Lag Derivative Time Constant
T4	0,016639	[s]	2nd Lead-Lag Delay Time Constant
T10	1	[s]	3rd Lead-Lag Derivative Time Constant
T11	1	[s]	3rd Lead-Lag Delay Time Constant
PSS_min	-0,05	[pu]	Controller Minimum Output
PSS_max	0,05	[pu]	Controller Maximum Output

Tabla A2.2 Parámetros del PSS de la unidad de Daule Peripa con MVMO.

MÉTODO DE OPTIMIZACION MVMO			
PSS DE UNIDADES DE DAULE PERIPA			
Parámetro	Valor	Unidad	Descripción
KF	1	[pu]	Ganancia lazo de frecuencia[0,100]
KP	0	[pu]	Ganancia lazo de potencia[0,5]
Tw	2	[s]	Constante tiempo filtro washout
Tw2	2	[s]	Constante tiempo filtro washout2
K	93,97915	[pu]	Ganancia del PSS
T1	0,132702	[s]	Constante tiempo adelanto1
T2	0,013553	[s]	Constante tiempo atraso1
T3	0,123177	[s]	Constante tiempo adelanto2
T4	0,013882	[s]	Constante tiempo atraso2
Lim_min	-0,1	[pu]	Límite mínimo salida PSS
Lim_max	0,1	[pu]	Límite máximo salida PSS

Tabla A2.3 Parámetros del PSS de la unidad de Delsintanisagua con MVMO.

MÉTODO DE OPTIMIZACION MVMO			
PSS DE UNIDADES DE DELSINTANISAGUA			
Parámetro	Valor	Unidad	Descripción
TW1	2	[s]	Constante de tiempo wash-out del canal de velocidad 1,10
TW2	2	[s]	Constante de tiempo wash-out del canal de potencia 1,30
T92	1	[s]	Constante de tiempo filtro de rampa 0.1,0.5
T93	1	[s]	Constante de tiempo filtro de rampa 0.1,0.5
T91	1	[s]	Constante de tiempo filtro de rampa 0.1,0.5
T8	0	[s]	Constante de tiempo filtro de rampa 0.2
T9	1	[s]	Constante de tiempo filtro de rampa 0.1,0.5
Ks1	43,43712	[p.u.]	Ganancia del PSS 0,150
TW3	2	[s]	Constante de tiempo wash-out del canal de potencia 1,30
TW4	2	[s]	Constante de tiempo wash-out del canal de potencia 1,10
Ks2	0,2	[p.u.]	Ganancia del PSS 0,1
T7	2	[s]	Constante de tiempo del canal de potencia 1,30
Ks3	0,1	[p.u.]	Ganancia del PSS 0 ó 1
T1	0,095623	[s]	Constante de tiempo (1) filtro de atraso/adelanto de fase 0.10
T2	0,037895	[s]	Constante de tiempo (1) filtro de atraso/adelanto de fase 0.015,3
T3	0,120691	[s]	Constante de tiempo (2) filtro de atraso/adelanto de fase 0.10
T4	0,023384	[s]	Constante de tiempo (2) filtro de atraso/adelanto de fase 0.015,3
T5	0,01	[s]	Constante de tiempo (3) filtro de atraso/adelanto de fase 0.10
T6	0,01	[s]	Constante de tiempo (3) filtro de atraso/adelanto de fase 0.015,3
USTmin	-0,1		
USTmax	0,1		

Parámetros obtenidos con el método PSO

Tabla A2.4 Parámetros del PSS de la unidad de Baba con PSO.

MÉTODO DE OPTIMIZACION PSO			
PSS DE UNIDADES DE BABA			
Parámetro	Valor	Unidad	Descripción
Tf	0,02	[s]	Frecuency Transducer Time Constant
Tw1	3	[s]	1st Washout 1th Time Constant
Tw2	3	[s]	1st Washout 2th Time Constant
T6	0	[s]	1st Signal Transducer Time Constant
Tp	0,02	[s]	Power Transducer Time Constant
Tw3	3	[s]	2nd Washout 1th Time Constant
Tw4	3	[s]	2nd Washout 2th Time Constant
Ks2	0,3	[pu]	2nd Signal Transducer Factor
T7	3	[s]	2nd Signal Transducer Time Constant
Ks3	1	[s]	Washouts Coupling Factor
T8	0,4	[s]	Ramp Track. Filter Derivative Time Constant
T9	0,1	[s]	Ramp Track. Filter Delay Time Constant
N	1	[-]	Ramp Tracking Filter
M	4	[-]	Ramp Tracking Filter
Ks1	12,35447	[pu]	PSS Gain
T1	0,01	[s]	1st Lead-Lag Deriv. Time Constant
T2	1,141419	[s]	1st Lead-Lag Delay Time Constant
T3	0,904536	[s]	2nd Lead-Lag Derivative Time Constant
T4	2,620072	[s]	2nd Lead-Lag Delay Time Constant
T10	1	[s]	3rd Lead-Lag Derivative Time Constant
T11	1	[s]	3rd Lead-Lag Delay Time Constant
PSS_min	-0,05	[pu]	Controller Minimum Output
PSS_max	0,05	[pu]	Controller Maximum Output

Tabla A2.5 Parámetros del PSS de la unidad de Daule Peripa con PSO.

MÉTODO DE OPTIMIZACION PSO			
PSS DE UNIDADES DE DAULE PERIPA			
Parámetro	Valor	Unidad	Descripción
KF	1	[pu]	Ganancia lazo de frecuencia[0,100]
KP	0	[pu]	Ganancia lazo de potencia[0,5]
Tw	2	[s]	Constante tiempo filtro washout
Tw2	2	[s]	Constante tiempo filtro washout2
K	58,39399	[pu]	Ganancia del PSS
T1	2,801568	[s]	Constante tiempo adelanto1
T2	3	[s]	Constante tiempo atraso1
T3	2,531963	[s]	Constante tiempo adelanto2
T4	0,713058	[s]	Constante tiempo atraso2
Lim_min	-0,1	[pu]	Límite mínimo salida PSS
Lim_max	0,1	[pu]	Límite máximo salida PSS

Tabla A2.6 Parámetros del PSS de la unidad de Delsintanisagua con PSO.

MÉTODO DE OPTIMIZACION PSO			
PSS DE UNIDADES DE DELSINTANISAGUA			
Parámetro	Valor	Unidad	Descripción
TW1	2	[s]	Constante de tiempo wash-out del canal de velocidad 1,10
TW2	2	[s]	Constante de tiempo wash-out del canal de potencia 1,30
T92	1	[s]	Constante de tiempo filtro de rampa 0.1,0.5
T93	1	[s]	Constante de tiempo filtro de rampa 0.1,0.5
T91	1	[s]	Constante de tiempo filtro de rampa 0.1,0.5
T8	0	[s]	Constante de tiempo filtro de rampa 0.2
T9	1	[s]	Constante de tiempo filtro de rampa 0.1,0.5
Ks1	37,9115	[p.u.]	Ganancia del PSS 0,150
TW3	2	[s]	Constante de tiempo wash-out del canal de potencia 1,30
TW4	2	[s]	Constante de tiempo wash-out del canal de potencia 1,10
Ks2	0,2	[p.u.]	Ganancia del PSS 0,1
T7	2	[s]	Constante de tiempo del canal de potencia 1,30
Ks3	0,1	[p.u.]	Ganancia del PSS 0 ó 1
T1	2,024525	[s]	Constante de tiempo (1) filtro de atraso/adelanto de fase 0.10
T2	1,129321	[s]	Constante de tiempo (1) filtro de atraso/adelanto de fase 0.015,3
T3	0,710608	[s]	Constante de tiempo (2) filtro de atraso/adelanto de fase 0.10
T4	3	[s]	Constante de tiempo (2) filtro de atraso/adelanto de fase 0.015,3
T5	0,01	[s]	Constante de tiempo (3) filtro de atraso/adelanto de fase 0.10
T6	0,01	[s]	Constante de tiempo (3) filtro de atraso/adelanto de fase 0.015,3
USTmin	-0,1		
USTmax	0,1		

ANEXO 3: ANÁLISIS DINÁMICO DE LA PERTURBACIÓN EN EL CIRCUITO UNO DE LA LÍNEA MOLINO-MILAGRO 230 kV EN CONDICIONES DE DEMANDA MÍNIMA.

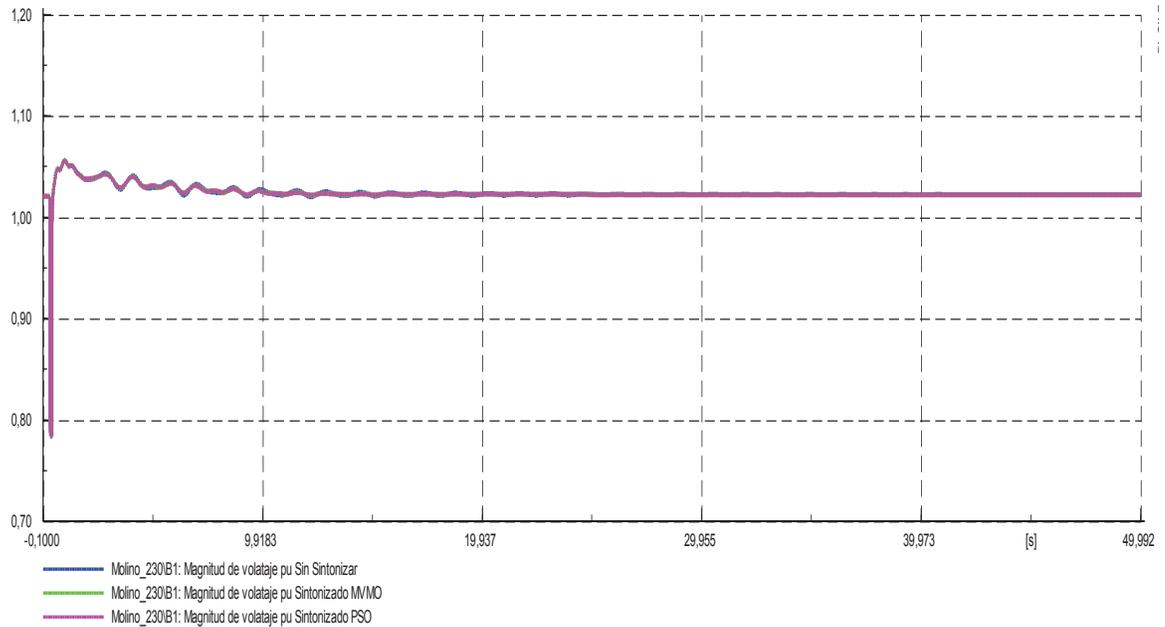


Figura A3.1 Respuesta Voltaje de la barra B1_MOLINO_230– Falla L/T Molino Milagro.

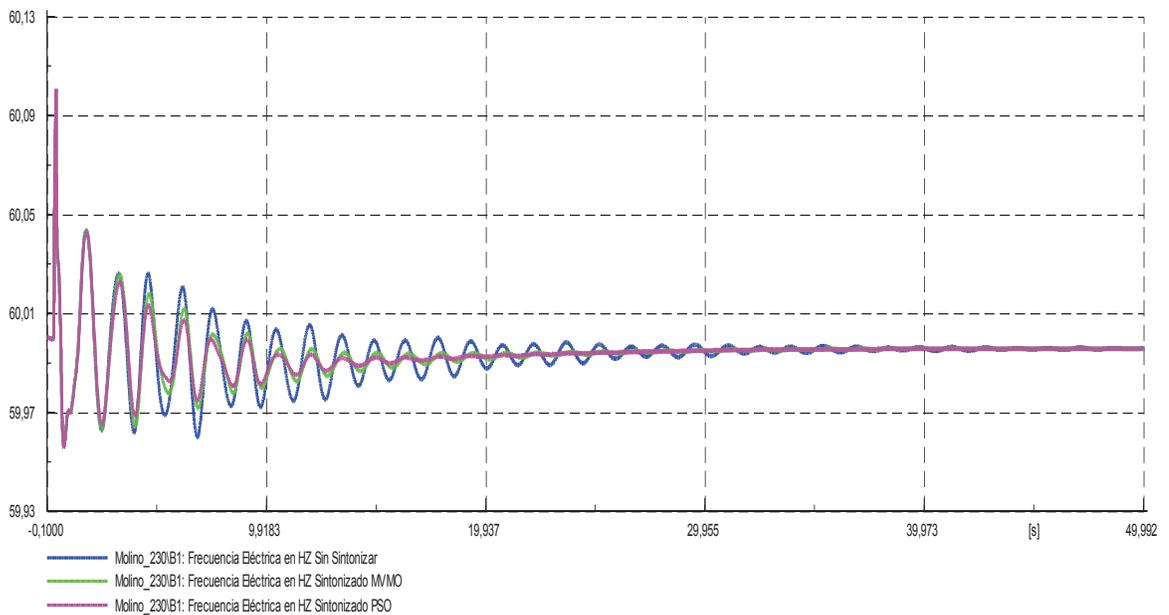


Figura A3.2 Respuesta de Frecuencia de la barra B1_MOLINO_230– Falla L/T Molino Milagro.

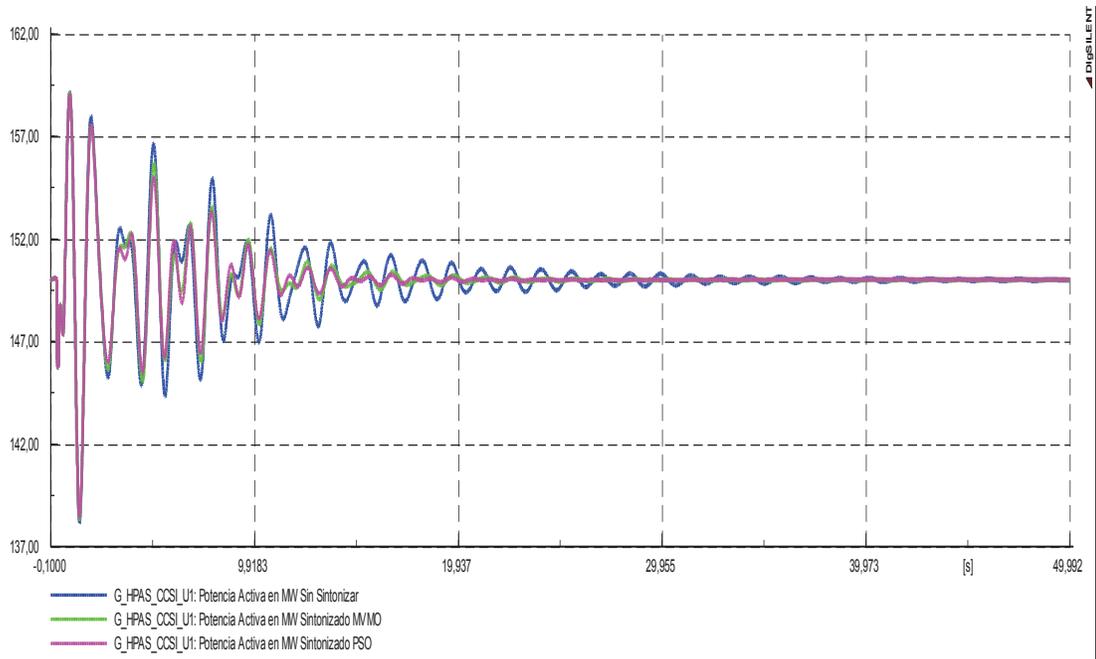


Figura A3.2 Respuesta de Potencia Activa de Coca Codo Sinclair U1– Falla L/T Molino Milagro.

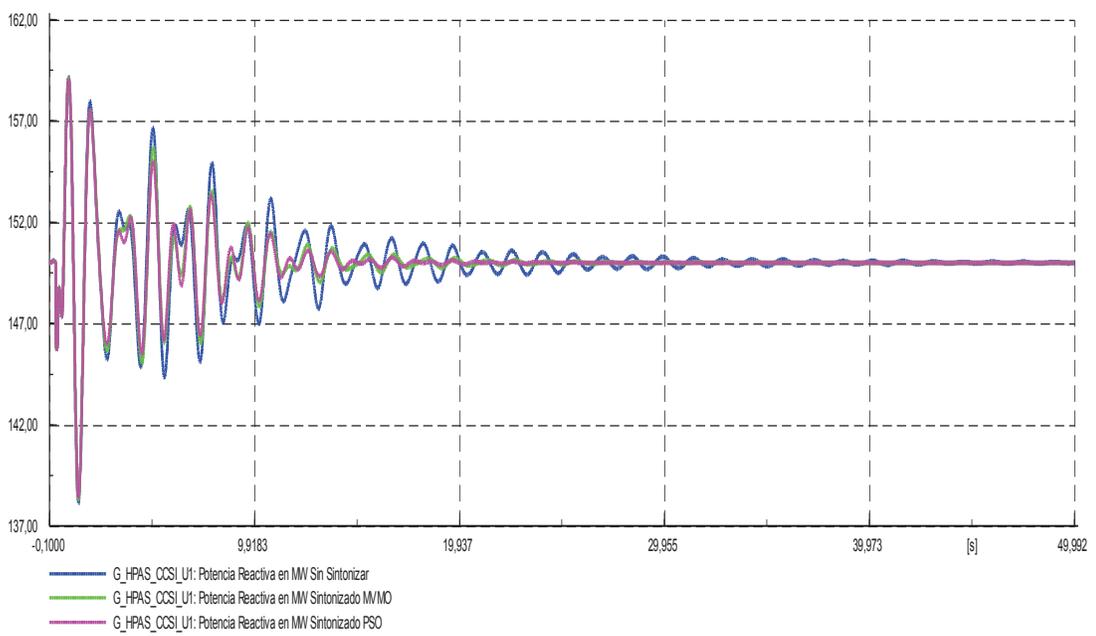


Figura A3.4 Respuesta de Potencia Activa de Coca Codo Sinclair U1– Falla L/T Molino Milagro.

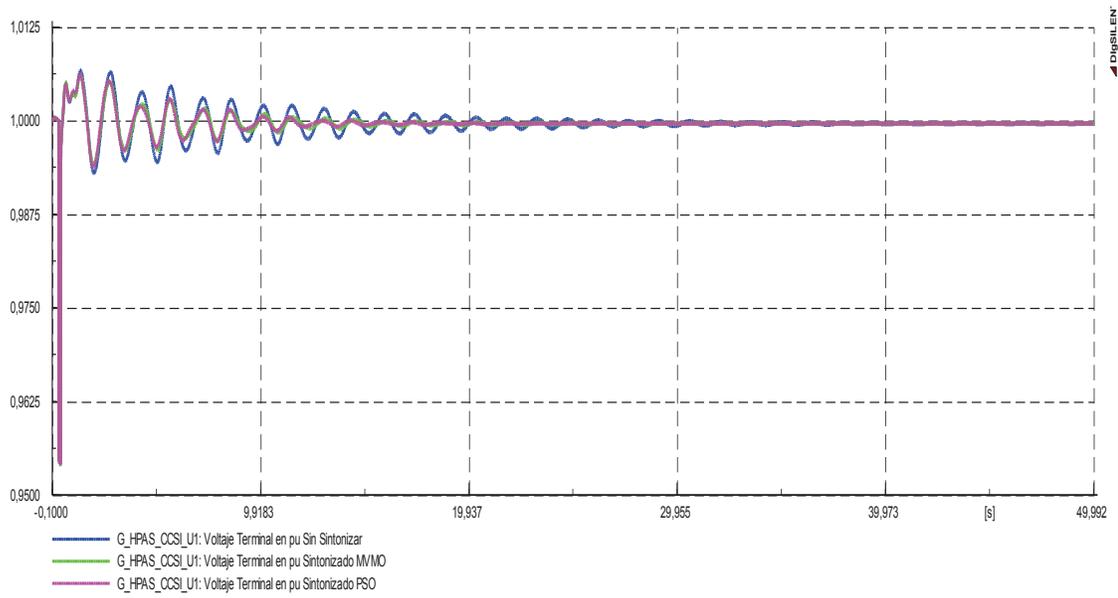


Figura A3.5 Respuesta de Voltaje de Coca Codo Sinclair U1– Falla L/T Molino Milagro.

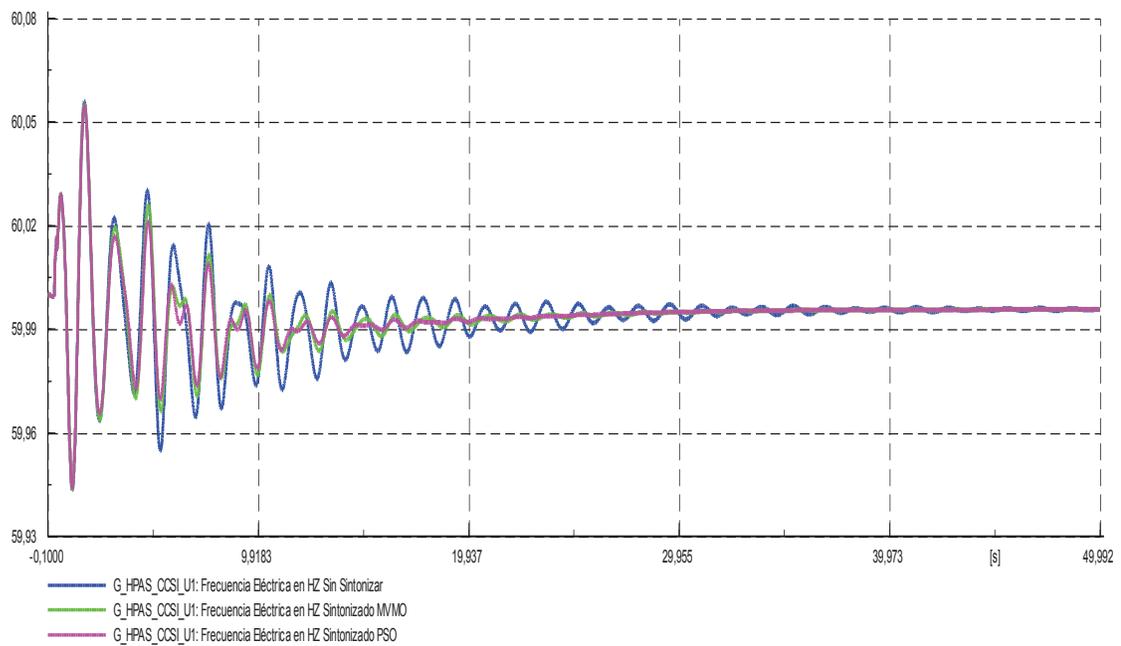


Figura A3.6 Respuesta de Frecuencia de Coca Codo Sinclair U1– Falla L/T Molino Milagro.

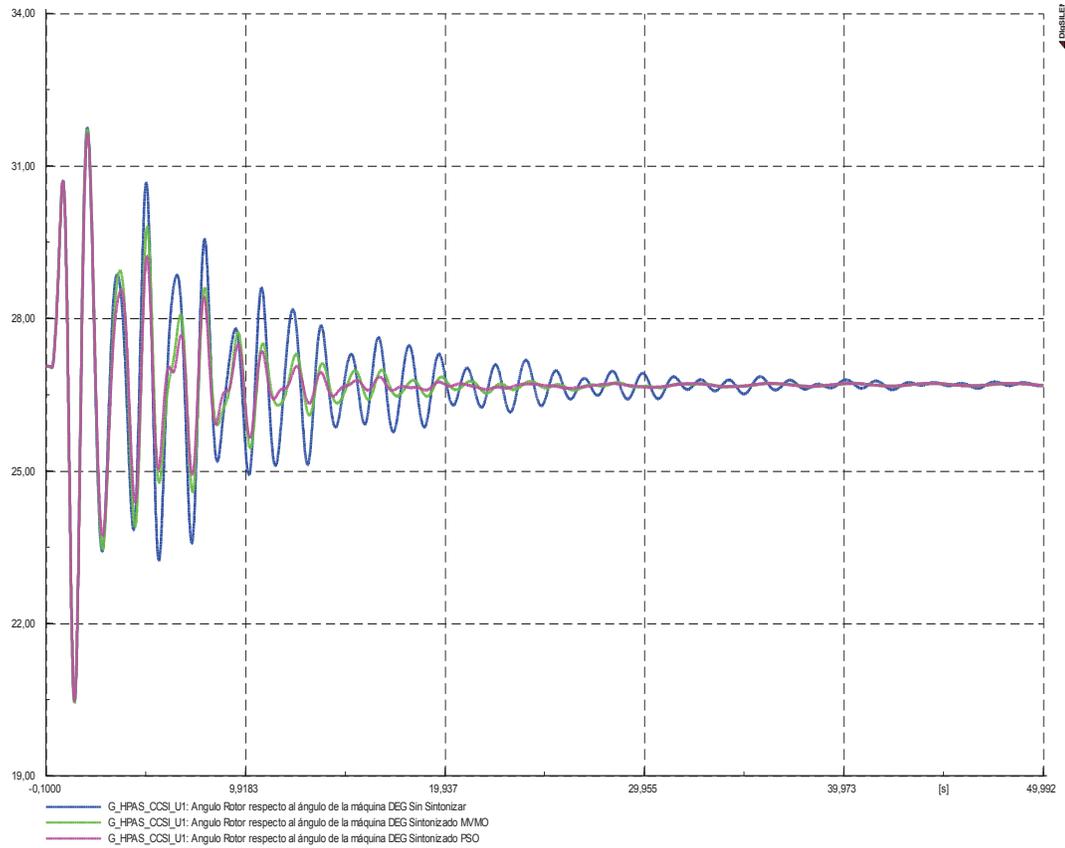


Figura A3.7 Respuesta de ángulo de la referencia (La Miel) respecto a si misma y de Coca Codo Sinclair U1 respecto a la referencia- Falla L/Molino-Milagro.