

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

METODOLOGÍA PARA LA SINTONIZACIÓN DE PARÁMETROS EN MODELOS DE SISTEMAS DE CONTROL DE CENTRALES ELÉCTRICAS.

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO ELÉCTRICO**

WASHINGTON STALYN ALVAREZ ORBE
washington.alvarez@epn.edu.ec

DIRECTOR: DR. HUGO NEPTALÍ ARCOS MARTÍNEZ
hugo.arcos@epn.edu.ec

CODIRECTOR: DR. NELSON VICTORIANO GRANDA GUTIERREZ
nelson.granda@epn.edu.ec

Quito, Enero 2020

AVAL

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Washington Stalyn Alvarez Orbe, bajo nuestra supervisión.

DR. HUGO N. ARCOS MARTÍNEZ
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DR. NELSON V. GRANDA GUTIERREZ
CODIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo Washington Stalyn Alvarez Orbe, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración dejo constancia de que la Escuela Politécnica Nacional podrá hacer uso del presente trabajo según los términos estipulados en la Ley, Reglamentos y Normas vigentes.

WASHINGTON STALYN ALVAREZ ORBE

DEDICATORIA

A mi Dios, que me ha colmado de bendiciones a lo largo de esta vida y quien siempre me ha dado seguridad en mis pasos iluminando mi camino sin importar las circunstancias y poniendo la fortaleza, paz y mansedumbre necesaria en mi corazón para cada momento difícil de mi vida.

A mi padre que siempre me ha apoyado con ímpetu para dar lo mejor de mí y me ha brindado el aliento de superación que necesitaba en todas las decisiones de mi vida; siendo mi amigo, mi soporte y mi ejemplo más admirado a seguir, por nunca abandonar la nave y ser el pilar que nos mantuvo con su amor incondicional.

A mi hermana Cynthia que en mi vida ha hecho las veces de hermana, amiga y madre, haciendo mucho más de lo que yo he podido por ella, velando muchas de las veces por mis necesidades antes que las suyas, empujándome siempre a no conformarme y buscar mis sueños inspirándome con su ejemplo de esfuerzo y dedicación.

A mi madre que ha sido el milagro en mi vida, mi ejemplo de lucha y la motivación para no darme por vencido nunca por más duras que sean las pruebas que la vida nos presente. La mujer que con su cariño y templanza supo encarrilarme siempre por el camino correcto y formo el hombre que hoy entrega todo por su familia y no se conforma para ser cada día mejor en todos los aspectos de su vida.

A todos ustedes, que han sido, son y serán el centro de mi mundo, este logro es más suyo que mío, porque me han inspirado y me han dado con amor todo lo necesario para lograrlo.

AGRADECIMIENTO

Profundamente agradecido con todas las personas que de una u otra forma hicieron posible este trabajo y todo lo que vino detrás.

Un especial agradecimiento al Dr. Hugo Arcos por brindarme todas las facilidades y la confianza para realizar este trabajo de titulación, así como permitirme desarrollar mi labor en el laboratorio de SEP bajo su tutela.

Al MSc. Juan Plazarte por la ayuda desinteresada brindada al inicio del desarrollo de este trabajo y por todos sus consejos y observaciones. Al Dr. Nelson Granda y Dr. Carlos Gallardo por la confianza y la apertura que supieron demostrar conmigo dejando en manifiesto su calidad académica y como personas.

A la EPN por permitirme cumplir mi meta y brindarme todas las herramientas necesarias para formarme como profesional en la mejor universidad a nivel nacional.

A las amistades que forme a lo largo de estos años en la Universidad, con quienes las experiencias y momentos vividos dentro y fuera de las aulas permitieron formar lazos que van más allá del compañerismo, que perdurarán en nuestra etapa profesional y quedarán grabadas en mi memoria.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN	VIII
ABSTRACT	IX
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVO GENERAL	1
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	1
1.3 ALCANCE	2
2. FUNDAMENTO TEÓRICO	3
2.1. ESTABILIDAD EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA.....	3
2.1.2. DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN DE ESTABILIDAD.....	4
2.1.3. ESTABILIDAD DE ÁNGULO DE ROTOR.....	5
2.2 TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS (EMT).....	10
2.2.1 CONCEPTO DE TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS [10]	10
2.2.2 IMPORTANCIA DEL ANÁLISIS DE TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS [11], [12]	11
2.2.3 SIMULACIONES EMT (DigSILENT Power Factory) [13]	11
2.3 RED EQUIVALENTE DE UN SEP [14], [15]	13
2.4 SISTEMAS DE CONTROL DE UNIDADES DE GENERACIÓN	14
2.4.1 COMPONENTES BÁSICOS DE MODELOS DE SISTEMA DE CONTROL [17], [18]	15
2.4.2 SISTEMAS DE EXCITACIÓN.....	17
2.4.3 ESTABILIZADOR DE SISTEMAS DE POTENCIA (PSS)	21
2.4.4 SISTEMAS DE CONTROL DE VELOCIDAD (PCU) [25], [26], [27]	22
3. MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN	27
3.1 MÉTODOS DETERMINISTAS	27
3.1.1 MÉTODOS DIRECTOS.....	27
3.1.2 MÉTODOS DE GRADIENTE.....	28
3.1.3 MÉTODOS DE PROGRAMACIÓN LINEAL.....	28
3.1.4 MÉTODOS DE PROGRAMACIÓN NO LINEAL.....	28

3.2	MÉTODOS HEURÍSTICOS.....	29
3.2.1	MÉTODOS DE DESCOMPOSICIÓN	29
3.2.2	MÉTODOS INDUCTIVOS.....	29
3.2.3	MÉTODOS DE REDUCCIÓN	29
3.2.4	MÉTODOS CONSTRUCTIVOS	30
3.2.5	MÉTODOS DE BUSQUEDA LOCAL.....	30
3.3	MÉTODOS META-HEURÍSTICOS.....	30
3.3.1	META-HEURÍSTICA INSPIRADA EN LA FÍSICA.....	30
3.3.2	META-HEURÍSTICA INSPIRADA EN LA EVOLUCIÓN	31
3.3.3	META-HEURÍSTICA INSPIRADA EN LA BIOLOGÍA.....	31
3.4	ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN POR ENJAMBRE DE PARTÍCULAS	31
3.4.1	CONCEPTO BÁSICOS DEL PSO [35]	32
3.4.2	FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL ALGORITMO [24]	33
3.4.3	CONFIGURACIONES DEL ALGORITMO [34], [35]	36
3.4.4	ALGORITMO PSO [36].....	38
3.5	APLICACIÓN DEL ALGORITMO PSO.....	39
3.5.1	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	39
3.5.2	RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA	40
3.5.3	PRIMERA ITERACIÓN	41
3.5.4	INICIO DE LA ITERACIÓN 2.....	46
3.5.5	INICIO DE LA ITERACIÓN 3.....	49
3.5.6	INICIO DE LA ITERACIÓN 4.....	51
3.5.7	INICIO DE LA ITERACIÓN 5.....	52
3.5.8	INICIO DE LA ITERACIÓN 6.....	53
4.	METODOLOGÍA PARA SINTONIZACIÓN DE PARÁMETROS DE SISTEMAS DE CONTROL.....	55
4.1	VALIDACIÓN DE MODELOS [37].....	56
4.2	MODELOS EMPLEADOS	57
4.2.1	MODELAMIENTO DE LA RED EQUIVALENTE	57
4.2.2	MODELAMIENTO DE LA CENTRAL TERMOELÉCTRICA ESMERALDAS II	59
4.3	TRATAMIENTO DE DATOS DE CAMPO	69
4.3.1	PROCEDENCIA Y FORMATO DE DATOS [40], [41].....	69
4.3.2	LECTURA Y EXPORTACIÓN DE ARCHIVOS COMTRADE	71
4.3.3	AJUSTE E INTERPOLACIÓN DE DATOS	74
4.4	APLICACIÓN DEL ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN	79

4.4.1	USOS DEL ENJAMPRE DE PARTÍCULAS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS.....	79
4.4.2	ALGORITMO PSO EN DIGSILENT POWERFACTORY.....	80
5.	RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA.....	86
5.1	RESPUESTAS DE LA RED EQUIVALENTE	86
5.2	RESPUESTAS DE LOS SISTEMAS DE CONTROL.....	89
5.2.1	PRUEBA DE ESTADO ESTABLE.....	89
5.2.2	PRUEBAS DE CONTROL DE VOLTAJE.....	91
5.2.3	PRUEBAS DE CONTROL DE VELOCIDAD.....	92
5.3	RESULTADOS DEL TRATAMIENTO DE DATOS	93
5.4	RESULTADOS DE APLICACIÓN DEL ALGORITMO PSO	95
5.4.1	TIEMPOS DE OCURRENCIA Y DESPEJE DE LA FALLA	95
5.4.2	PARÁMETROS DE LOS AVR	102
5.5	RESPUESTAS DEL SISTEMA DE CONTROL SINTONIZADO.....	109
5.5.1	PRUEBA DE CORTO-CIRCUITO	110
5.5.2	PRUEBA DE RECHAZO DE CARGA	114
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	117
6.1	CONCLUSIONES.....	117
6.2	RECOMENDACIONES	118
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	119
	ANEXOS	124

RESUMEN

Con la finalidad de contar con modelos debidamente ajustados y calibrados de los elementos del sistema eléctrico de potencia (SEP), que permitan realizar estudios eléctricos de cualquier índole sobre una base de datos confiable, el presente trabajo de titulación propone una alternativa metodológica para la sintonización de parámetros en los modelos matemáticos de sistemas de control de centrales de generación de energía eléctrica, mediante el uso del algoritmo de optimización meta-heurístico de enjambre de partículas (PSO – *Particle Swarm Optimization*).

A partir de la mejor información con la que se pudo contar sobre la Central Térmica Esmeraldas II, se procedió a estructurar una isla eléctrica con red equivalente del resto del Sistema Nacional Interconectado (SNI) en la barra de Santo Domingo 138 kV. Haciendo uso de la herramienta DIgSILENT Power Factory se modeló los sistemas de control de la mencionada central para luego validarlos mediante diferentes pruebas que verifican su correcto funcionamiento.

De archivos tipo COMTRADE (Common Format for Transient Data Exchange) se extrajo los valores de Voltajes y Corrientes de eventos suscitados en el área de influencia eléctrica de la central. Dichos eventos fueron simulados como transitorios electromagnéticos (EMT) en la red equivalente estructurada, recreando las condiciones en que sucedieron como: despacho de generación, cargas, ubicación, tipo de perturbación, etc.

Finalmente, luego de elaborar el algoritmo PSO en DIgSILENT Programming Language (DPL), este fue implementado y ejecutado en la red equivalente a fin de hallar los parámetros de los sistemas de control de la central Esmeraldas II, que permitan minimizar la diferencia entre los resultados de las simulaciones y los datos de archivos COMTRADE.

PALABRAS CLAVE: Red Equivalente, Sintonización, DPL, PSO, Sistemas de Control, COMTRADE, Esmeraldas II.

ABSTRACT

To have duly adjusted and calibrated models of the elements of the electric power system (SEP), which allow conducting electrical studies of any kind on a reliable database. The present work of titling proposes a methodological alternative for the tuning of parameters in the mathematical models of control systems of electric power generation plants, by using the algorithm of meta-heuristic optimization of particle swarm (PSO).

Based on the best information available on the Esmeraldas II Thermal Power Plant, an electrical island was structured with an equivalent network from the rest of the National Interconnected System (SNI) in the Santo Domingo 138 kV bar. Using the DlgSILENT Power Factory tool, the control systems of the aforementioned plant were modeled and then validated employing different tests that verified its correct operation.

Subsequently, from the COMTRADE (Common Format for Transient Data Exchange) files, the values of Voltages and Currents of events raised in the area of influence of the plant were extracted. These events were simulated as electromagnetic transients (EMT) in the equivalent network, recreating the conditions in which they happened as generation office, loads, location and type of fault, etc.

Finally, after developing the PSO algorithm in DlgSILENT Programming Language (DPL), it was implemented and executed in the equivalent network to find the parameters of the control systems of the Esmeraldas II plant, minimizing the difference between the results of the simulations and COMTRADE files.

KEYWORDS: Equivalent Network, tuning, DPL, PSO, Control Systems, COMTRADE, Esmeraldas II.

1. INTRODUCCIÓN

Debido al crecimiento del sector eléctrico ecuatoriano, y al importante papel que este desempeña en las actividades diarias de la sociedad actual, se considera fundamental y necesario que pueda garantizar calidad, seguridad y confiabilidad en el servicio de energía eléctrica que brinda.

Contar con una base de datos de la cual se pueda tener la certeza que todos sus elementos fueron debidamente elaborados, ajustados y validados, permite asegurar que los resultados que se obtendrían de sus sistemas y modelos serían lo más parecidos posible a lo que se esperaría obtener en la realidad, esto principalmente al momento de realizar planificaciones, estudios eléctricos, análisis del sistema y expansión o reducción de elementos del SEP. Estas acciones o resultados serán en base a la información con la que se cuente del sistema, la misma que resulta complicado recopilar a detalle debido al tamaño y estructura del SNI.

Bajo estas premisas el presente estudio se enfoca en la aplicación de metodologías de tipo heurístico debido al gran número de parámetros que deberán ser considerados, el tamaño del sistema y que estos métodos brindan la posibilidad de alcanzar soluciones óptimas globales en un espacio de búsqueda que puede ser muy grande, empleando formulaciones matemáticas relativamente no tan complejas.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Se plantea proponer una metodología para la sintonización de parámetros de los modelos de los sistemas de control de una central de generación de energía eléctrica utilizando un algoritmo de optimización heurístico programado en ambiente DlgSILENT, lenguaje DPL.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Relevar información de eventos suscitados en el área de influencia eléctrica de una central de generación.
- Estructurar un modelo matemático equivalente del área de influencia eléctrica de la central de generación.
- Programar un algoritmo para la sintonización de los parámetros de la central de generación en lenguaje DPL.

- Sintonizar los parámetros de los sistemas de control de la central de generación.

1.3 ALCANCE

En el presente trabajo de titulación se propondrá y desarrollará una metodología basada en métodos de optimización heurísticos para la sintonización de parámetros en modelos de sistemas de control de una central de generación de energía eléctrica.

Se comenzará por buscar y recopilar la mejor información con la que se pueda contar de los modelos de sistemas de control de una central. Luego, usando la base datos del SNI se realizarán cálculos de cortocircuito para configurar un modelo de red equivalente de la central y de su zona de influencia.

Posteriormente, se relevará registros de eventos producidos en el área de influencia eléctrica de la central, estos mismos eventos serán recreados y simulados en la red equivalente configurada en el programa DIgSILENT Power Factory, para que luego se proceda a minimizar el error entre los registros y los resultados de las simulaciones mediante la aplicación del algoritmo heurístico de optimización programado en lenguaje DPL que permitirá realizar una validación en sentido residual y sintonizar parámetros de los sistemas de control de la central.

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

El presente capítulo contiene a manera de resumen la información que se estima relevante y necesaria conocer para comprender el trabajo desarrollado. Se enfocará en los conceptos que se consideran importantes sobre la sustentación teórica, en conjunto con las bases físicas y matemáticas de todos los temas o procedimientos que se utilizaron para la ejecución de cada una de las etapas de este trabajo.

2.1. ESTABILIDAD EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

2.1.1. ESTRUCTURA DEL SEP Y EL PROBLEMA DE ESTABILIDAD

Los sistemas eléctricos de potencia tienen una gran variedad de elementos que se encuentran interconectados como: generadores, líneas de transmisión, cargas, subestaciones, elementos de control, elementos de protección, entre otros. Estos elementos permiten llevar a cabo la transformación de energía de recursos primarios (recursos hidráulicos, térmicos, eólicos) a energía eléctrica, para luego transportar esta energía desde las centrales de generación hasta los grandes centros de distribución, donde finalmente será transportada a cada uno de los usuarios conectados a las redes primarias y secundarias para su consumo. [1]

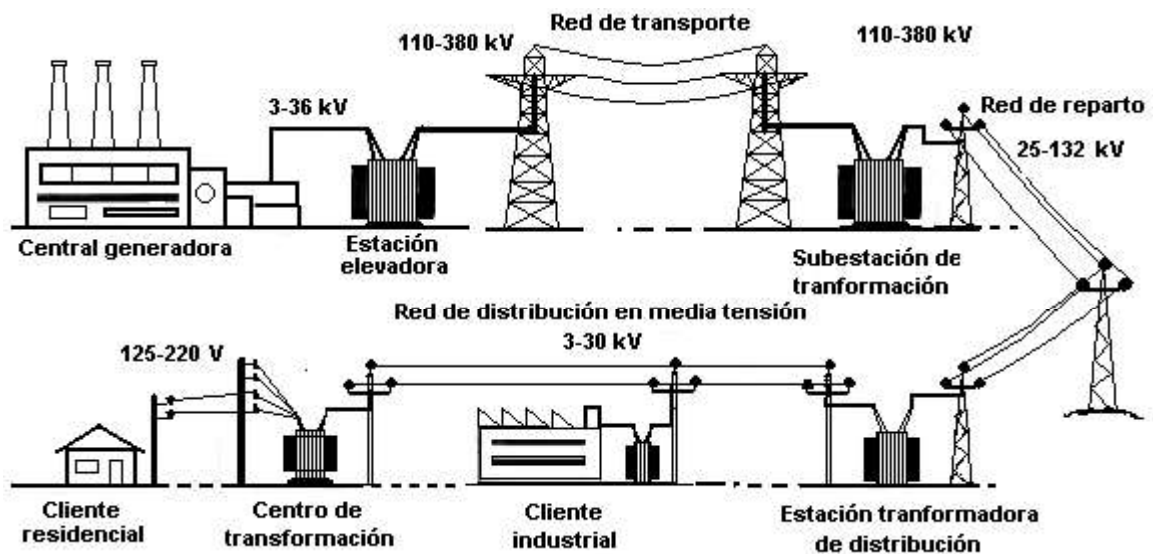


Figura 2.1. Estructura de un Sistema Eléctrico de Potencia

Satisfacer la demanda luego de haber ocurrido un evento/perturbación sobre algún elemento del SEP, manteniendo los valores adecuados de voltaje y frecuencia, es el resultado del correcto funcionamiento de los elementos de los sistemas de generación, transmisión y distribución [2].

Ante cualquier eventualidad la actuación y operación coordinada de los dispositivos de protección/control, permitirá mantener la estabilidad del sistema y evitará un colapso general, que puede deberse a [3]:

- Pérdida de sincronismo entre los generadores ante un evento de cortocircuito o pérdida de capacidad de la red.
- Oscilaciones no amortiguadas con posterior pérdida de sincronismo entre los generadores.
- Caída o aumento incontrolado de voltajes.
- Caída o aumento incontrolado de frecuencia.

2.1.2. DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN DE ESTABILIDAD.

La estabilidad de un sistema eléctrico de potencia es la capacidad del sistema de permanecer en un estado de operación de equilibrio bajo condiciones normales de operación y retornar a un estado aceptable de equilibrio después de haber sido sometido a una perturbación [4].

Algunos ejemplos de perturbaciones son: fallas en la red de transmisión, conexión y desconexión repentina de bloques de carga (generalmente industriales), disparo de líneas de transmisión y pérdida de uno o varios generadores que se encuentren operando [5].

La estabilidad de un sistema eléctrico puede clasificarse en base a diversos criterios, uno de los más simples es de acuerdo al periodo de tiempo en que el sistema regresa a su estado de equilibrio, como pueden ser [6]:

a) Estabilidad en estado transitorio: Habilidad del sistema de alcanzar una condición estable después de una perturbación. Comprende un periodo de tiempo de 0-1 segundos.

b) Estabilidad en estado dinámico: Habilidad del sistema de alcanzar una condición estable frente a las pequeñas perturbaciones que existen continuamente en el SEP, mediante la implementación de controles automáticos. Comprende un periodo de tiempo de 1-300 segundos.

c) **Estabilidad en estado permanente:** Habilidad del sistema de regresar a su estado estable antes de que las maquinas pierdan sincronismo habiendo determinado su límite de potencia. Comprende un periodo de tiempo mayor a 300 segundos.

Para los análisis de estabilidad se deben tomar en cuenta los factores que contribuyen a la inestabilidad y los métodos que mejoran la operación estable. Las siguientes consideraciones permiten la clasificación de la estabilidad en categorías apropiadas [6]:

- Naturaleza física de la inestabilidad resultante
- El tamaño de la perturbación considerada
- Los dispositivos, procesos, y cantidad de tiempo que deben ser tomados en consideración para determinar la estabilidad.
- El método más apropiado de cálculo y predicción de estabilidad.

La figura 2.2 brinda una visión general de los problemas de estabilidad, mismos que se encuentran clasificados dentro de categorías y sub-categorías para un entendimiento más profundo y detallado.

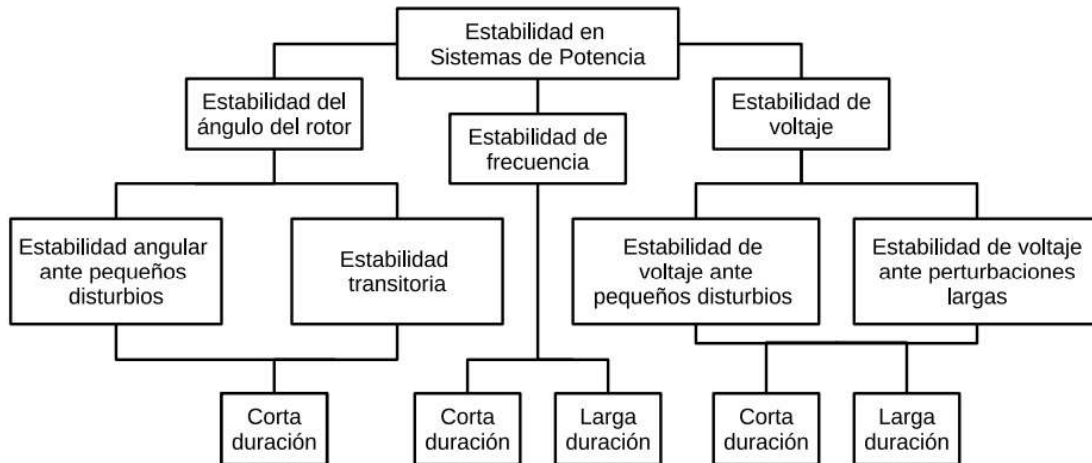


Figura 2.2. Clasificación de Estabilidad en Sistema de Potencia [4].

2.1.3. ESTABILIDAD DE ÁNGULO DE ROTOR.

Es la capacidad que tienen las máquinas síncronas interconectadas de un SEP para continuar en sincronismo ante una perturbación. Esta capacidad está relacionada con el ángulo del rotor el cual depende de la diferencia entre el par electromagnético y el par mecánico. Las maquinas permanecen en sincronismo cuando el par electromagnético que

es producido por la salida de potencia eléctrica del generador y el par mecánico que se debe a la potencia mecánica de entrada de la máquina primo motriz se encuentran en equilibrio [4], [8].

De no presentarse este equilibrio, el resultado es una inestabilidad que ocurre en forma de aumento de oscilaciones angulares y la aceleración o desaceleración de la velocidad del rotor de algún generador, llevando a la pérdida del sincronismo entre una máquina y el resto de máquinas o entre grupos de máquinas [4], [8].

2.1.3.1. Estabilidad angular ante pequeños disturbios (o pequeña señal)

Se refiere a la habilidad del sistema de mantener el sincronismo ante pequeñas perturbaciones. Estas pequeñas perturbaciones pueden ser [8]:

- Cambios de pequeños porcentajes de la carga total al sistema.
- Cambios de pequeños porcentajes en la generación total que se entrega al sistema.

Los disturbios son considerados muy pequeños para que se permita la linealización del sistema de ecuaciones con el fin de realizar un análisis.

Para estudios de estabilidad angular ante pequeños disturbios se pueden diferenciar dos tipos de inestabilidad [8]:

- **Inestabilidad no oscilatoria:** que se debe al constante incremento del ángulo del rotor del generador por falta de torque sincronizante.
- **Inestabilidad oscilatoria:** que se debe al incremento en magnitud de las oscilaciones del rotor causado por un insuficiente torque de amortiguamiento.

En los sistemas de energía actuales, el problema de estabilidad del ángulo del rotor ante pequeñas perturbaciones generalmente se asocia con una amortiguación insuficiente de las oscilaciones. El problema de la inestabilidad aperiódica se ha eliminado en gran medida mediante el uso de reguladores de voltaje de acción continua en el generador; sin embargo, este problema aún puede ocurrir cuando los generadores operan con excitación constante cuando están sujetos a las acciones de los limitadores de excitación (limitadores de corriente de campo) [7].

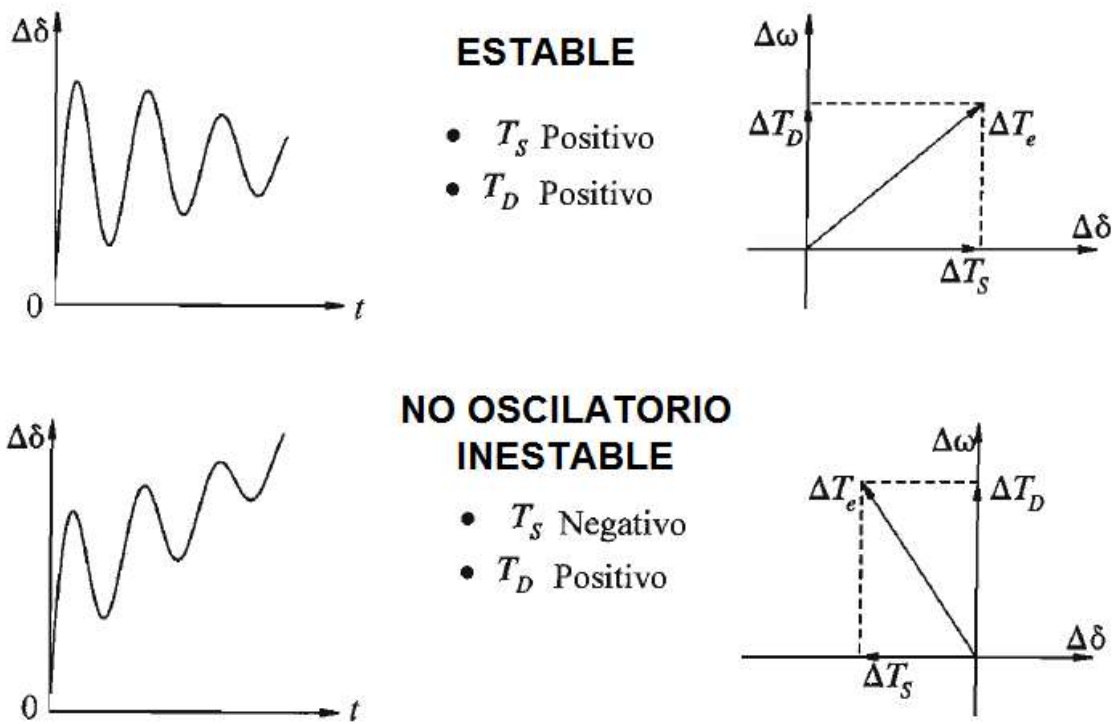


Figura 2.3. Naturaleza de la respuesta de pequeña señal con voltaje de campo constante

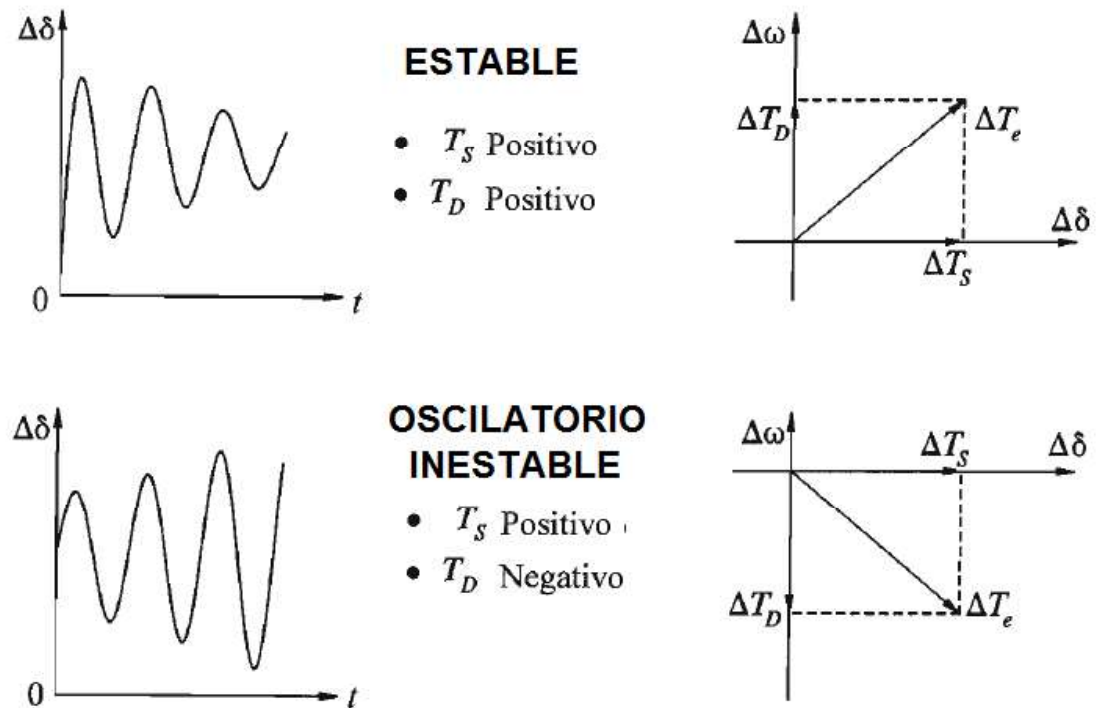


Figura 2.4. Naturaleza de la respuesta de pequeña señal con control de excitación [7].

Los problemas de estabilidad de ángulo del rotor con pequeñas perturbaciones pueden ser de naturaleza local o global. Los problemas locales involucran una pequeña parte del sistema de potencia y generalmente están asociados con las oscilaciones de ángulo del rotor de una sola central de energía contra el resto del sistema de potencia. Dichas oscilaciones se denominan oscilaciones de modo de planta local. La amortiguación de estas oscilaciones depende de la fuerza del sistema de transmisión con el que se conecta la central de energía y el funcionamiento de los sistemas de control de excitación del generador [7].

Los problemas globales son causados por interacciones entre grandes grupos de generadores y tienen efectos generalizados que implican oscilaciones de un grupo de generadores en un área que se balancea contra un grupo de generadores de otra área. Dichas oscilaciones se denominan oscilaciones en modo interárea cuyas características son complejas y difieren significativamente de las de las oscilaciones de modo local [6].

Las características de las cargas, en particular, tienen un efecto importante en la estabilidad de los modos interárea [7].

El período de tiempo de interés en los estudios de estabilidad de pequeñas perturbaciones es del orden de 10 a 20 segundos después de una perturbación [7].

2.1.3.2. Estabilidad Transitoria.

Es la habilidad del sistema de mantener el sincronismo en las máquinas cuando es sometido a una severa perturbación transitoria. Los grandes cambios de los ángulos del rotor están inmersos en la respuesta del sistema y son influenciados por la relación no lineal potencia-ángulo. La estabilidad transitoria mantiene relación con el estado de operación inicial del sistema, con la magnitud de la perturbación y con la robustez de la red de transmisión en el periodo post-falla [4].

La finalidad de los estudios de estabilidad transitoria es realizar un análisis de las características y comportamiento de un sistema de potencia ante contingencias, perturbaciones y/o eventos transitorios. Los resultados de estos estudios hacen posible evaluar y decidir las acciones que permitirán que el sistema soporte la ocurrencia de dichos eventos manteniendo las mínimas desviaciones posibles respecto de la condición pre-disturbio de operación (estado estable). Algunas de las acciones correctivas que pueden ser determinadas a partir de los estudios de estabilidad transitoria son: el tiempo crítico de

liberación de fallas en el ajuste de protecciones y el diseño de esquemas para deslastre de carga [9].

Existe una gran variedad de perturbaciones que se dividen en base al grado de su severidad y probabilidad de ocurrencia en el SEP. No obstante, los sistemas se diseñan para mantener la estabilidad frente a ciertas contingencias previstas. Las contingencias que por lo general se consideran son los cortocircuitos que pueden ser de diferentes tipos como: fase-tierra, dos fases-tierra, o trifásico. Lo más común es suponer que las fallas ocurren en las líneas de transmisión, pero es correcto también considerar fallas en barras o en transformadores, mismas que son despejadas por la apertura de los interruptores o seccionadores para aislar y desenergizar el elemento en falla [4].

En la figura 2.5 el comportamiento de ángulo del rotor de la máquina sincrónica es mostrado para casos de estabilidad e inestabilidad [4].

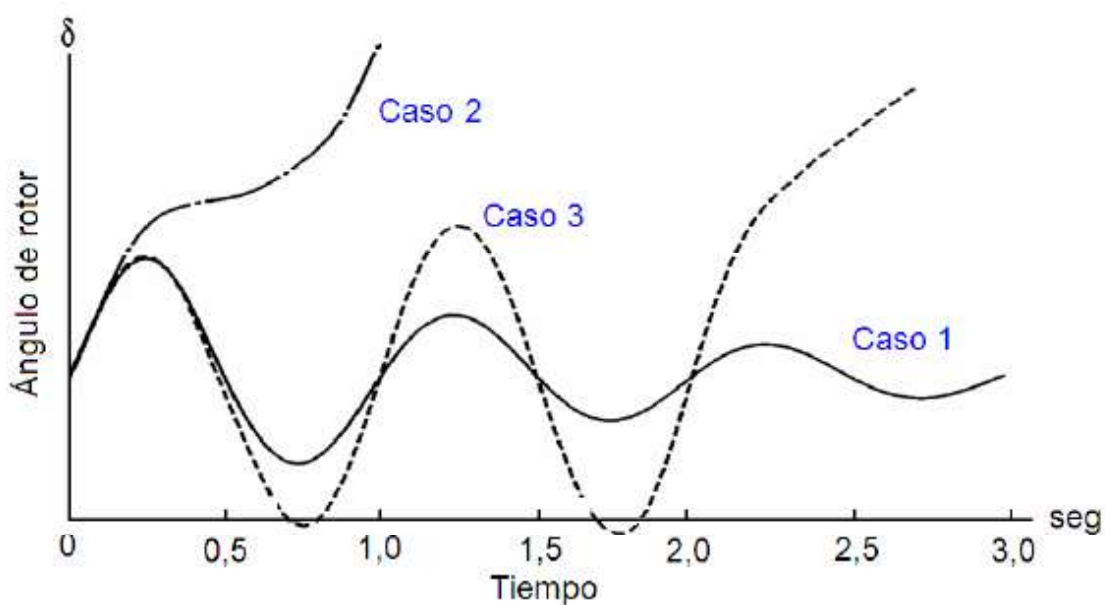


Figura 2.5. Respuesta del ángulo del rotor a una perturbación transitoria [4].

En el caso estable (caso 1), el ángulo del rotor se incrementa a un máximo, luego decrece su amplitud oscilando hasta alcanzar un valor relativamente constante. En el caso 2, el ángulo del rotor continúa incrementándose constantemente hasta que el sincronismo se pierde. Esta forma de inestabilidad está referida a la primera oscilación donde la inestabilidad es causada por el insuficiente torque sincronizante. En el caso 3 el sistema es estable en la primera oscilación pero llega a ser inestable como resultado del crecimiento de las oscilaciones según como se acerca al extremo. Esta forma de inestabilidad generalmente ocurre cuando existió una post perturbación de pequeña señal que no se

pudo controlar y derivó en la inestabilidad del sistema, y no necesariamente es el resultado de una perturbación transitoria [4].

La separación angular no periódica debido a la falta de torque sincronizante es la forma de inestabilidad más usual, aunque se manifieste como estabilidad de primera oscilación. Sin embargo, en sistemas de potencia grandes, la inestabilidad transitoria puede no siempre ocurrir como primera oscilación de inestabilidad asociada con un modo único; lo que podría ser el resultado de la superposición de un modo de oscilación lento de interárea y un modo de oscilación de planta local, causando una desviación de ángulo de rotor más allá de la primera oscilación. Esto puede igualmente ser el resultado de efectos no lineales afectando un solo modo, causando inestabilidad más allá de la primera oscilación [4].

En estudios de estabilidad transitoria, el período de estudio de interés es por lo general de 3 a 5 segundos después de la perturbación, aunque puede ser extendido de 10 a 20 segundos para sistemas muy grandes con predominio de modos de oscilación interárea.

La estabilidad de ángulo del rotor de pequeño disturbio y la estabilidad transitoria son categorizadas como fenómenos de corto término [4].

2.2 TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS (EMT)

2.2.1 CONCEPTO DE TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS [10]

Formalmente se puede definir a un transitorio electromagnético como la respuesta instantánea de un SEP luego de haberse producido un cambio repentino en su condición inicial o estable que lo lleva a un estado diferente o final. Este fenómeno es causado por maniobras de los equipos/dispositivos, por fallas o por descargas atmosféricas sobre un elemento energizado del sistema.

Comparando el tiempo en estado estacionario con el período transitorio, este último es sumamente corto y podría considerarse insignificante. Sin embargo, tiene un gran impacto en el sistema, debido a los grandes esfuerzos a los que son sometidos los equipos por sobre-corrientes y sobre-voltajes que puedan producirse en estos pequeños períodos de tiempo, y que pueden llegar a dañar equipos, elementos o su aislamiento.

2.2.2 IMPORTANCIA DEL ANÁLISIS DE TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS [11], [12]

Al momento de realizar estudios o análisis de transitorios electromagnéticos los puntos de interés son los cortos períodos de tiempo posteriores a la aparición de una perturbación en la red, tomado en cuenta los voltajes, corrientes y energías impuestas a los elementos del sistema de potencia durante estos eventos. Según la clase de perturbación que se vaya a analizar, los períodos de tiempo relevantes varían desde el orden de los μs hasta el orden de los ms. Los períodos de análisis pueden llegar al orden de segundos cuando el sistema está sometido a varias perturbaciones sucesivas (ejemplo: energización, desconexión y reconexión de líneas).

Debido a estas circunstancias es importante comprender los eventos que ocurren durante los períodos transitorios, para poder tomar acciones preventivas o correctivas en la operación del SEP tanto en estado estable como durante diferentes tipos de perturbaciones.

Cuando actúa un interruptor, tanto la corriente como el voltaje sufren un desfase producido por el efecto inductivo y capacitivo de los diferentes elementos asociados al interruptor. Estos fenómenos que ocurren a frecuencia industrial son llamados transitorios por maniobras.

La onda viajera que se propaga luego de una descarga atmosférica sobre una línea de transmisión es un evento de consideración. Los esfuerzos sobre los componentes del sistema dependerán de la impedancia de línea que aumentará el valor pico de la onda viajera la cual puede ser refractada o reflejada.

Finalmente, se consideran las fallas transitorias que implican la apertura de un interruptor con su posterior re-cierre, lo que causará sobre-voltajes y sobre-corrientes en los elementos asociados al interruptor.

2.2.3 SIMULACIONES EMT (DIgSILENT Power Factory) [13]

2.2.3.1 Simulaciones Transitorias

Los módulos para simulaciones transitorias disponibles en DIgSILENT PowerFactory, permiten analizar el comportamiento dinámico de pequeños y grandes sistemas en el dominio del tiempo. Por lo tanto, estos módulos cuentan con funciones que posibilitan

modelar sistemas complejos como redes industriales y grandes redes de transmisión en detalle, teniendo en cuenta los parámetros eléctricos y mecánicos.

Tanto los transitorios como los problemas de estabilidad y de control son consideraciones importantes durante la planificación, diseño y operación de los sistemas de energía modernos. Los estudios que involucren transitorios electromecánicos y electromagnéticos se realizarán utilizando simulaciones en el dominio del tiempo durante períodos de tiempo variables.

Los transitorios en los sistemas de energía eléctrica se pueden clasificar de acuerdo con tres marcos temporales posibles:

- Transitorios a corto plazo o electromagnéticos.
- Transitorios a medio plazo o electromecánicos.
- Transitorios a largo plazo.

2.2.3.2 Simulaciones Trifásicas EMT

Una función de simulación de transitorios electromagnéticos (EMT) utiliza un modelo de red dinámica para transitorios electromagnéticos y electromecánicos en condiciones de red balanceadas y no balanceadas. Esta función es particularmente adecuada para el análisis de transitorios a corto plazo.

Los voltajes y las corrientes se representan en la simulación EMT con sus valores instantáneos, por lo que también se tiene en cuenta el comportamiento dinámico de los elementos pasivos de la red. Esto es necesario para las siguientes aplicaciones:

- Cálculos de componentes DC y armónicos de corrientes y voltajes.
- Comportamiento exacto de máquinas accionadas por inversor.
- Comportamiento exacto de los sistemas de transmisión HVDC.
- Comportamiento no lineal de elementos de red pasivos como la saturación de transformadores.
- Fenómenos de sobretensión en dispositivos de conmutación.
- Rayos y ondas viajeras.
- Análisis del comportamiento de los dispositivos de control/protección durante fallas.

La gran cantidad de información necesaria para representar una red significa que se pueden simular todas las fases y todos los eventos definidos (simétricos y asimétricos). La función EMT también se puede utilizar para la simulación de transitorios a largo plazo. Sin embargo, debido a que los elementos de red pasivos se representan dinámicamente, el tamaño del paso de integración debe ser significativamente menor que en el caso de una representación en estado estable y, como resultado, el tiempo de cálculo aumentará.

La cantidad de información con la que se cuente y el nivel de detalle con el que se modele el sistema de potencia, permitirán comprender y analizar de mejor manera los efectos de eventos que se produzcan en dicho sistema.

Para el caso de elementos propios de la red, tales como: cargas, generadores, líneas, transformadores, etc. Será suficiente contar con información detallada de todos sus parámetros como: resistencias, inductancias, capacitancias, potencias, impedancias de secuencias, etc. Ya que, esta información solo debe ser ingresada correctamente dentro de los cuadros de diálogo de los modelos de cada elemento y no involucra un cálculo o análisis que deba detallarse.

Por otra parte, los sistemas de control de las centrales de generación y la red equivalente del sistema de estudio, sí involucran un proceso de estructuración y validación de su funcionamiento, por lo que en las siguientes secciones de este capítulo se explicarán su desarrollo y fundamento teórico.

2.3 RED EQUIVALENTE DE UN SEP [14], [15]

El gran tamaño y complejidad de un SEP, así como sus interconexiones, dificulta el análisis cuando solo una parte del sistema es la que se encuentra bajo estudio.

Un equivalente de red es la representación de una parte del SEP producto de dividir el sistema en subsistemas o sistemas más pequeños. El equivalente de red puede operar de manera independiente tomando en cuenta el efecto aproximado del resto del sistema o de cada subsistema que se desee incorporar.

Para análisis de estado estable o transitorio, el objetivo de una red equivalente es mantener la capacidad de simular diferentes condiciones del sistema usando solo los elementos que conforman el área de interés, mientras se mantiene la precisión en los resultados dentro

de límites aceptables en comparación a usar el sistema entero. Esto principalmente cuando ocurre:

- Fallas locales en el área de interés, tales como salidas de equipos o elementos.
- Cambios en las condiciones de operación como: niveles de generación y/o carga del sistema

Para estudios de transitorios electromagnéticos se considera una fuente de voltaje ideal sin armónicos que deformen la onda de voltaje, y que mantengan su magnitud y frecuencia constante.

El equivalente se lo obtiene haciendo estudios de cortocircuito trifásicos y monofásicos en la barra donde se va colocar el equivalente de red, con el propósito de obtener las impedancias de secuencia positiva, negativa y cero, que junto con las potencias y corrientes de cortocircuito permiten representar la red externa.

2.4 SISTEMAS DE CONTROL DE UNIDADES DE GENERACIÓN

Dado que poco a poco los sistemas eléctricos han ido creciendo y volviéndose más complejos, todas las partes que lo conforman como la generación, transmisión y distribución han aumentado en la misma medida. Las condiciones mínimas de calidad eléctrica que son exigidas han provocado que se implementen y desarrollen controles que actúen sobre los generadores. Existen una gran cantidad de controladores, pero pocos resultan imprescindibles al momento de operar, controlar y estabilizar los sistemas eléctricos [16].

El generador eléctrico es el encargado de la conversión electromecánica de energía. La energía mecánica que ingresa al generador puede proceder de una turbina (eólica, hidráulica, de vapor, etc.) o del eje de un motor de combustión interna [16].

Al ser el consumo eléctrico un componente altamente dinámico, el generador necesita de reguladores para mejorar su estabilidad y responder lo antes posible a perturbaciones como: cortocircuitos, desconexiones súbitas de carga o aumento excesivo de generación de energía. La figura 2.6 muestra de manera esquemática los controles más importantes que actúan sobre un generador [16].

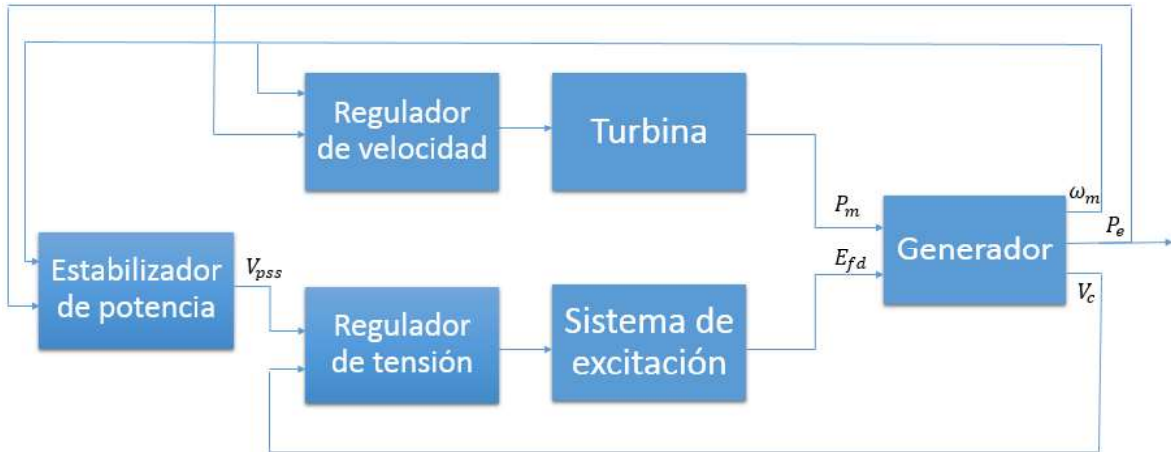


Figura 2.6. Diagrama básico de los controles de un generador [16].

2.4.1 COMPONENTES BÁSICOS DE MODELOS DE SISTEMA DE CONTROL [17], [18]

Un sistema de control está compuesto esencialmente por:

- Objetivos de control
- Componentes del sistema de control
- Resultados

Los objetivos representan las entradas que ingresan al sistema de control. De la misma manera, los resultados representan las salidas que son las variables controladas por el sistema.

En forma específica, un sistema de control usa entradas que son manipuladas con una lógica establecida por los elementos de control para obtener salidas.



Figura 2.7. Componentes básicos de un sistema de control [17].

2.4.1.1 Función de Transferencia [17], [18]

En un sistema una función de transferencia se describe a través de una ecuación lineal que no varía en el tiempo. Suponiendo que todas sus condiciones iniciales sean cero, se

la define como el cociente entre la transformada de Laplace de la salida y la transformada de Laplace de la entrada.

Considérese un sistema lineal que no varía en el tiempo definido por:

$$a_0 \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_{n-1} \frac{dy(t)}{dt} + a_n y(t) = b_0 \frac{d^m u(t)}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} u(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_{m-1} \frac{du(t)}{dt} + b_m u(t) \quad (2.1)$$

Con ($n \geq m$)

Donde para el sistema: $y(t)$ representa la salida y $u(t)$ es la entrada. Entonces, se expresa la función de transferencia como:

$$\begin{aligned} \text{Función de Transferencia} = G(s) &= \frac{\mathcal{L}[\text{salida}]}{\mathcal{L}[\text{entrada}]} \Big|_{\text{condiciones iniciales cero}} \\ \text{Función de Transferencia} &= \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \dots + b_{m-1} s + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n} \end{aligned} \quad (2.21)$$

Usando estas funciones, la dinámica de un sistema puede representarse por medio de ecuaciones algebraicas en el dominio de s .

Se considera un sistema de n -ésimo orden cuando en el denominador la potencia más alta de s es igual a n .

2.4.1.2 Diagrama de Bloques [17], [18]

Un diagrama de bloques muestra las conexiones y relaciones que hay entre los componentes del sistema. El diagrama es una representación gráfica y visual del flujo de señales y las funciones que desempeña cada elemento del sistema. Además, tiene la ventaja de indicar de manera más sencilla el desempeño del sistema real sobre una representación matemática abstracta.

El diagrama de bloques muestra el vínculo entre las variables mediante el uso bloques funcionales. Un bloque funcional o simplemente bloque, es un objeto visual que sirve para representar una operación matemática que actúa sobre sus entradas para obtener sus salidas.

La flecha que se dirige hacia el bloque representa la entrada, mientras la flecha que sale del bloque representa la salida. Estas flechas son denominan señales del sistema.



Figura 2.8. Forma de un Diagrama de Bloques [17].

2.4.2 SISTEMAS DE EXCITACIÓN

El sistema de excitación tiene por objetivo brindar el voltaje adecuado al devanado de campo del generador. La estructura más común de un sistema de excitación comprende subsistemas con funciones de control o protección y un regulador de tensión como uno de los principales subsistemas. Su principal objetivo es mantener los valores de voltaje en terminales del generador en un valor definido manipulando la corriente de campo para compensar las variaciones de voltaje en la red [19].

Dentro de las aplicaciones de control de los sistemas de excitación se pueden encontrar: control de voltaje en los terminales del generador, control de flujo de potencia reactiva y el mejoramiento de la estabilidad del sistema de potencia. Las funciones de protección garantizan que los límites de capacidad de la máquina síncrona, sistema de excitación, y otros equipos, no sean excedidos [20].

Comparado con el resto de los sistemas de control de un generador, los sistemas de excitación presentan una respuesta dinámica de alta velocidad. Esto se debe a que la dinámica mecánica de los generadores es mucho más lenta que la dinámica eléctrica; además que, con el desarrollo de nuevas tecnologías en electrónica de potencia, el voltaje de campo puede ser ahora controlada con mayor velocidad y precisión que antes [19].

2.4.2.1 Elementos de un Sistema de Excitación [20]

En la Figura 2.9 se presenta un sistema de excitación típico con su diagrama de bloques funcional y componentes más importantes.

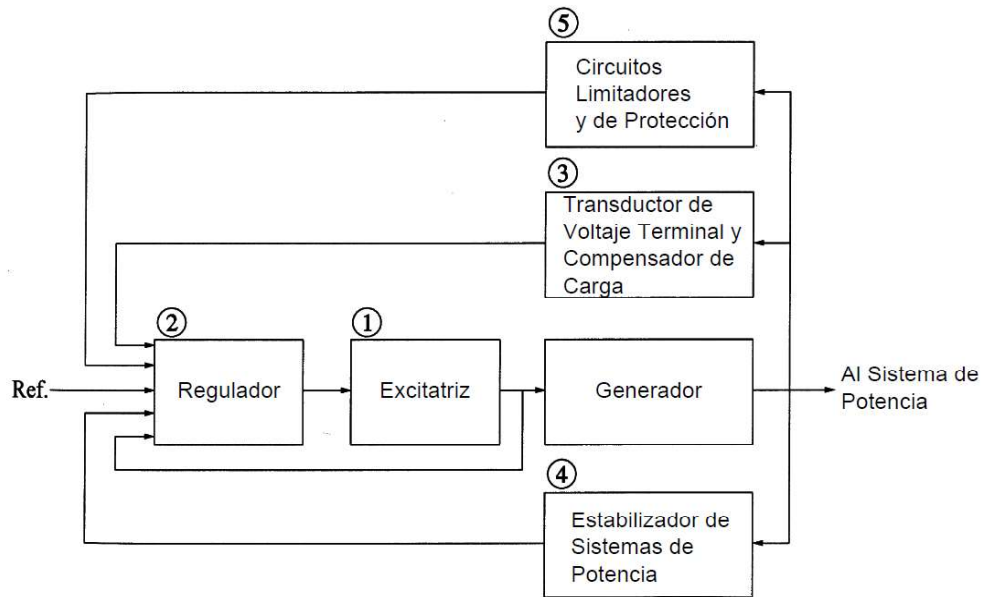


Figura 2.9. Configuración típica de un Sistema de Excitación.

- 1) **Excitatriz:** Proporciona la potencia DC al devanado de campo de la máquina síncrona, constituyendo para el sistema de excitación la etapa de potencia.
- 2) **Regulador:** Procesa y amplifica las señales que ingresan al sistema de control en niveles y formas apropiadas para actuar sobre la excitatriz. Incorpora funciones de regulación y estabilización del sistema de excitación.
- 3) **Transductor de Voltaje Terminal y Compensador de Carga:** Censa el voltaje terminal del generador, rectifica y filtra esta señal a una cantidad DC y la compara con una referencia la cual representa el voltaje terminal deseado. Además, podría disponer de compensación de carga, si se deseara mantener constante el voltaje en algún punto remoto desde el terminal del generador.
- 4) **Estabilizador de Sistemas de Potencia (PSS):** Proporciona una señal de entrada adicional al regulador, para amortiguar las oscilaciones del sistema de potencia.
- 5) **Circuitos Limitadores y de Protección:** Contienen un amplio arreglo de funciones de control y de protección, los cuales aseguran que no se excedan los límites de capacidad de la excitatriz del generador síncrono. Las funciones más usadas por estos circuitos son: el limitador de corriente de campo, limitador de máxima excitación, limitadores de voltaje terminal, limitación y regulación V/Hz, limitador de sub-excitación, limitador de sobreexcitación, etc. Por lo general estos circuitos son independientes, y sus señales de salida podrían ser aplicadas al sistema de excitación en diferentes lugares de la cadena de control.

2.4.2.2 Regulador De Voltaje (AVR) [16], [21], [22]

La función del control automático de voltaje es mantener la tensión de salida del generador dentro de límites máximos y mínimos de variación con respecto a un valor nominal o referencial de voltaje establecido; esto con el fin de controlar el dinamismo de la operación del sistema que se debe principalmente a las constantes variaciones de carga. En otras palabras el AVR del generador permite mantener constante una consigna de voltaje en el nodo del SEP donde se encuentra actuando.

Para controlar el voltaje de los nodos del sistema no se necesita todo el sistema en conjunto, ya que, esto se realiza de manera local.

Los circuitos y etapas más importantes del AVR son:

- Circuito sensor y comparador.
- Circuito amplificador del error y control de disparo.
- Circuito de control de potencia.
- Circuito de estabilidad.

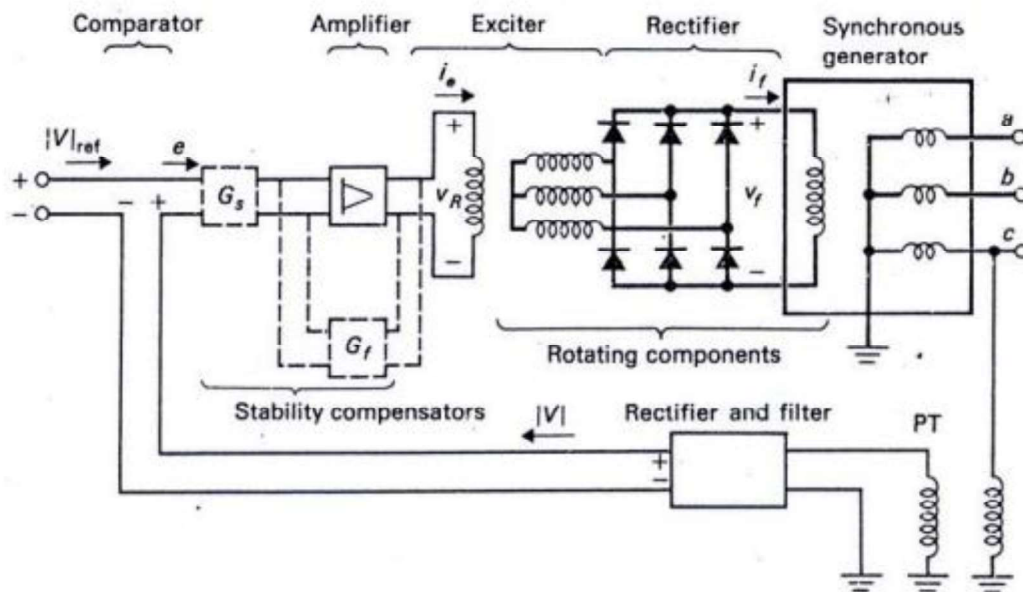


Figura 2.10. Esquema de un AVR [16].

Con el fin de explicar mejor la estructura básica de un AVR, el Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) ha documentado los principales modelos de AVR. Con el fin

de representar mediante bloques algunas de las funciones más comunes en estos elementos, se utilizará el modelo estándar ST5B de IEEE

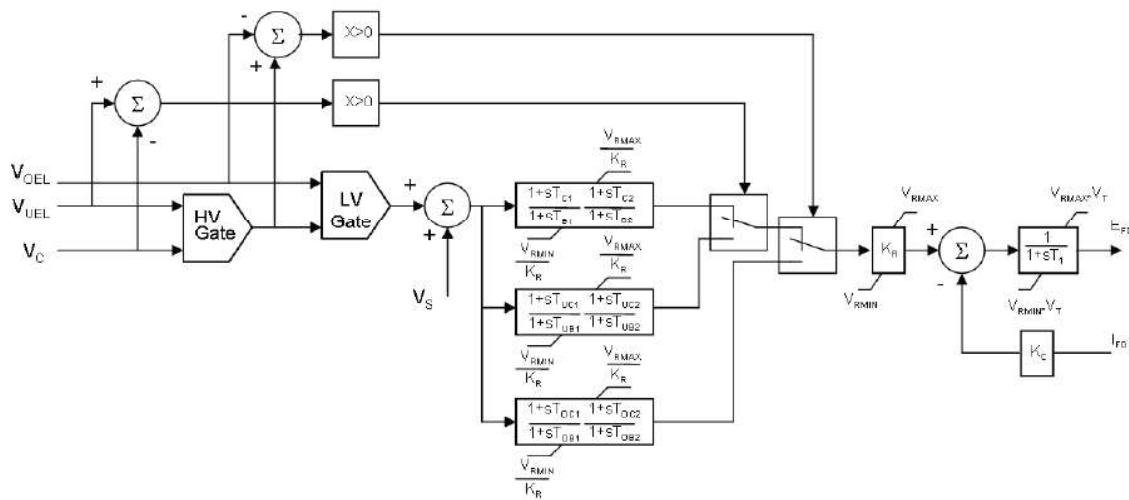


Figura 2.11. Modelo de regulador de tensión ST5B [22].

- **Limitador de sobre y sub-excitación:** Los limitadores de sobreexcitación y sub-excitación que se representan a través de los bloques HV Gate y LV Gate respectivamente y tienen la función de ser dos compuertas lógicas que se cierran si se alcanza el límite de tensión máximo o mínimo dado por cada una de las referencias.
- **Sumador de entrada PSS:** Existe la alternativa de poder incluir un bloque sumador, que añade la señal emitida por el estabilizador de potencia a la señal en procesamiento.
- **Circuito regulador de tensión:** Existen tres mallas en adelanto-atraso, para cada uno de los posibles estados en el que se podría encontrar el nivel de tensión en el generador:
 - Dentro de los límites de sobre y sub-excitación
 - Bajo el límite de sub-excitación
 - Sobre el límite de sobreexcitación

Cada una de las mallas adelanto-retraso se deben ajustar con el fin de que la regulación de tensión sea la correcta en los límites definidos.

- **Ganancia:** Se incorpora en el circuito un bloque de ganancia que ayuda a mantener la estabilidad del sistema.

- **Adición de señal de corriente de campo:** Se cuenta con la alternativa de poder sumar a la señal obtenida la corriente de campo previo a su amplificación con una ganancia (que suele ser pequeña o nula). La función de este bloque es que en caso de que la medida de la tensión en bornes sea errónea, se pueda contar con una señal de respaldo.
- **Integrador:** Se adiciona con el fin de intentar obtener el menor (idealmente nulo) error de estado estacionario para entradas escalón.

2.4.3 ESTABILIZADOR DE SISTEMAS DE POTENCIA (PSS)

El estabilizador de sistemas de potencia adiciona una señal de entrada al AVR que ante oscilaciones propias de la máquina, pueda brindar una mayor amortiguación en la respuesta transitoria. Amortiguar las oscilaciones que provienen del rotor, se logra controlando la excitatriz con señales estabilizantes adicionales [23].

El PSS adiciona una componente de torque eléctrico que se encuentra en fase con la variación de la velocidad del rotor que hace las veces de variable estabilizante [23].

Las oscilaciones que involucran a varias máquinas es el resultado de efectos positivos y negativos en la amortiguación; dichas oscilaciones varían con el flujo de potencia, la carga, etc. El factor de amortiguación es el parámetro básico para estudiar y evaluar estos problemas, así como las oscilaciones de los modos críticos calculados o determinados experimentalmente en la respuesta ante perturbaciones pequeñas [23].

A continuación se presenta un diagrama de bloques básico de un PSS con las partes que lo componen [23].

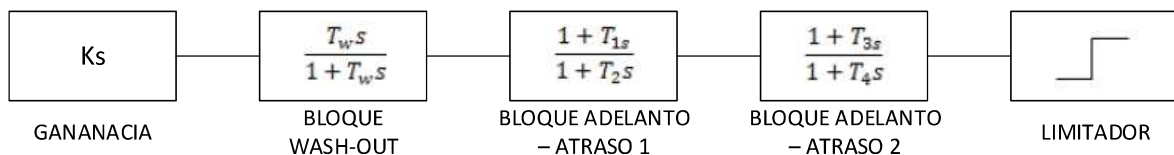


Figura 2.12. Diagrama de bloques PSS clásico [23]

Filtro Washout: Para señales con componentes de frecuencia superiores a 3 Hz se realiza un filtrado, además que se reduce la sobre-respuesta de amortiguamiento durante una perturbación de gran magnitud.

Bloques controladores de adelanto-atraso: Para que se compense el retardo de fase ocasionado por el regulador de voltaje, el generador y el sistema de potencia los parámetros de estos bloques tienen que ser sintonizados. Dependiendo del sistema y su modo de sintonización será el número de bloques de adelanto atraso.

Ganancia k_s : Es un factor que interviene en la cantidad de amortiguamiento proporcionado por el PSS, si se excede el valor crítico el amortiguamiento puede disminuir.

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.

2.4.4 SISTEMAS DE CONTROL DE VELOCIDAD (PCU) [25], [26], [27]

Para controlar la velocidad de una turbina que se encuentra operando, se suele utilizar un sistema conocido generalmente como PCU (Primary Controller Unit) que a su vez se compone de dos sistemas:

- Sistema de control de velocidad (PCO – Primary Controller).
- Unidad de máquina motriz (PMU – Prime Mover Unit).

El PCU controla la apertura de la válvula que permite el paso de vapor, agua o gas a la turbina, modificando por lo tanto su velocidad que viene fijada en función del caudal de paso. Este proceso permite también controlar la potencia eléctrica entregada mediante una señal de potencia (Pt) que es enviada por el PMU hacia el PCU.

Sumado a las funciones del sistema de excitación, estos equipos van a contribuir a la mejora de la estabilidad y seguridad del sistema eléctrico.

A continuación se muestra un esquema básico con las etapas de los reguladores de velocidad:

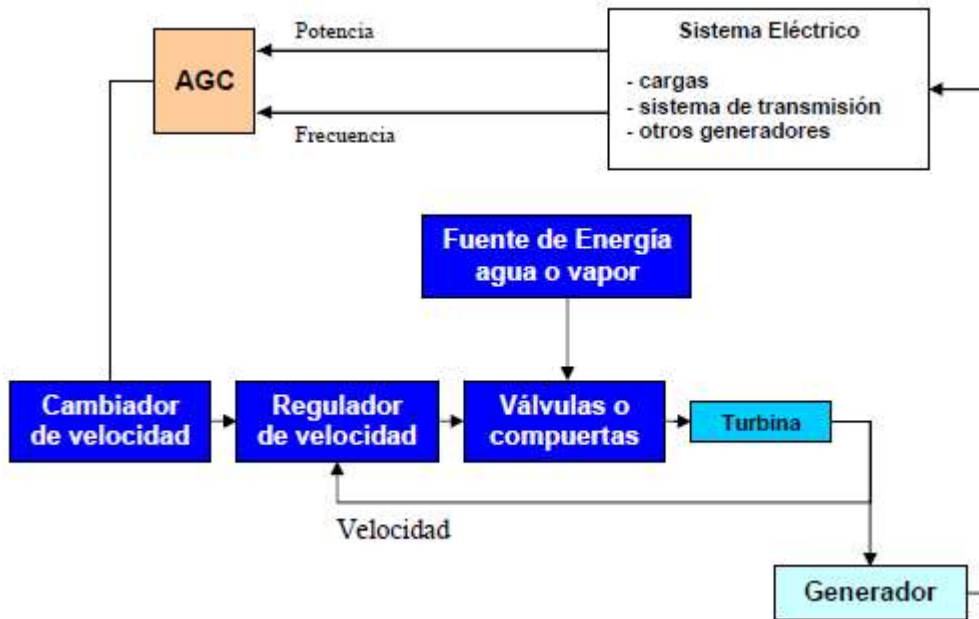


Figura 2.13. Esquema de un control de velocidad clásico [27]

Los diagramas de bloques y modelos que representan los controles de velocidad varían según el tipo de central. Por lo tanto, se mostrará un ejemplo representativo según el tipo de central y se explicará los bloques más importantes que comparten.

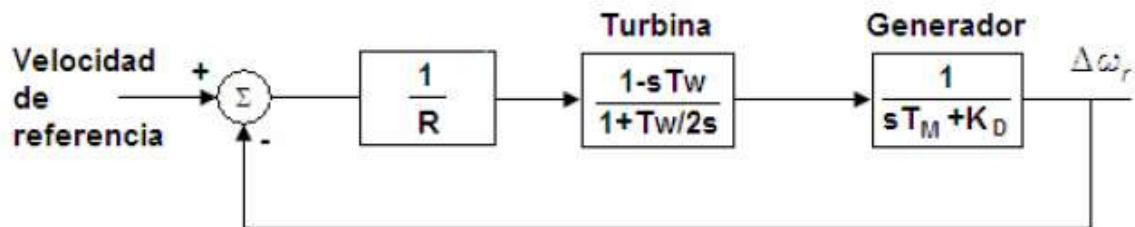


Figura 2.14. Diagrama de bloques del control de velocidad para una turbina hidráulica [20].

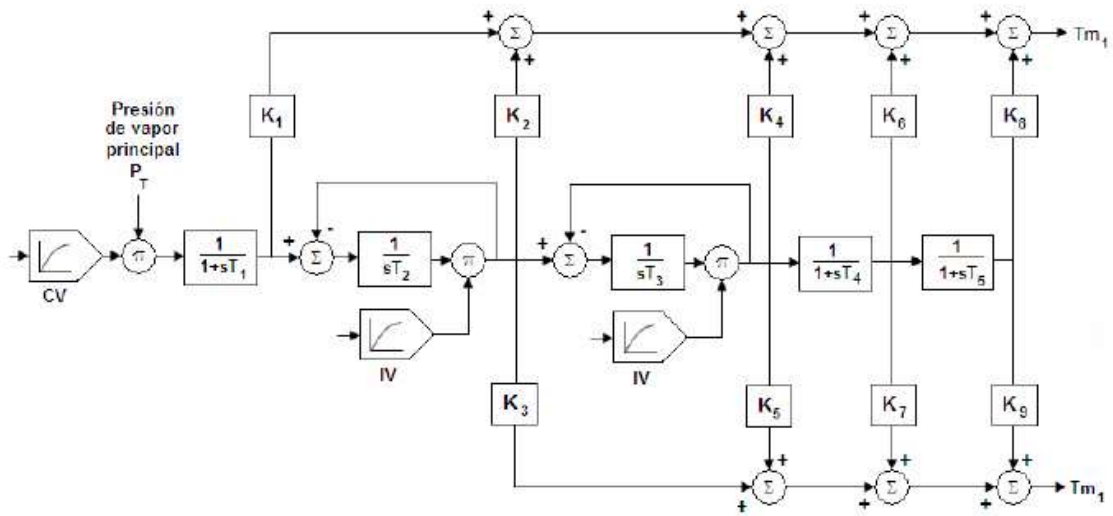


Figura 2.15. Diagrama de bloques del control de velocidad para una turbina de vapor [20].

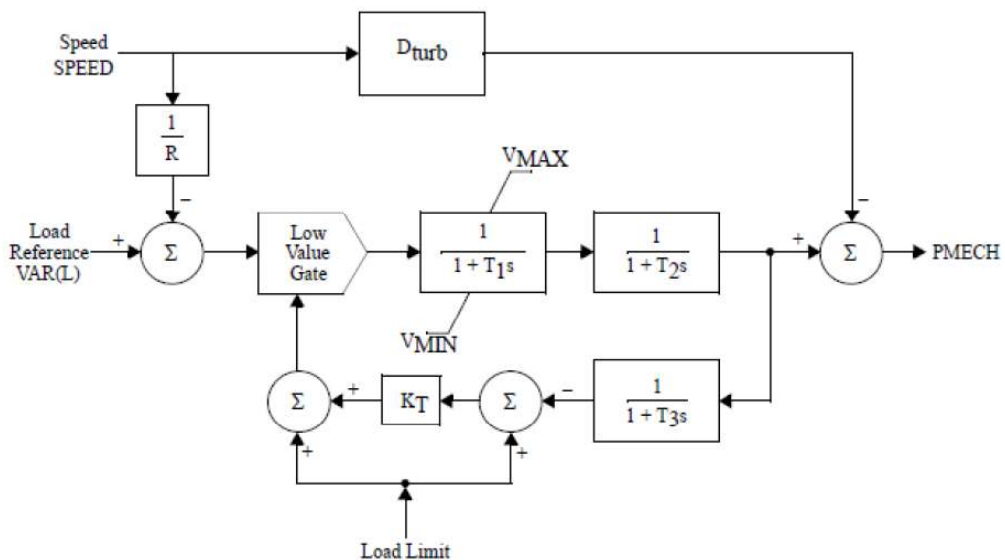


Figura 2.16. Diagrama de bloques del control de velocidad para una turbina de gas [20].

Componente de sincronización y amortiguamiento: Para estado estable, la relación velocidad-par depende proporcionalmente de la ganancia de regulación. Se tendrá una componente de amortiguamiento negativo para frecuencias de oscilación altas, pero dependiendo del valor de frecuencia de la oscilación su magnitud será pequeña.

Filtro de altas frecuencias: Debido al ruido en la señal de entrada o por la dinámica de otros componentes, algunas señales pueden presentar componentes de alta frecuencia, que al ingresar en el estabilizador pueden producir un efecto adverso en otros elementos del sistema.

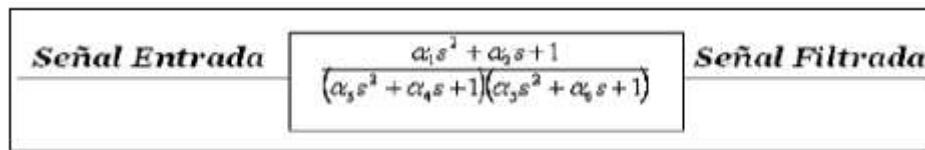


Figura 2.17. Diagrama de bloques del filtro de alta frecuencia [26].

Redes de adelanto- atraso: Con este tipo de redes que se diseñan para un rango determinado de frecuencias, se proporciona el adelanto de fase con el que se pretende compensar el efecto opuesto del generador y del sistema de excitación.

Cuando el ángulo de compensación que se requiere es grande, se utilizan varias redes colocadas en cascada a fin de lograr el efecto requerido.

Las constantes de tiempo T1 y T4 son seleccionadas de acuerdo al adelanto de fase deseado y a la ganancia de los bloques para diferentes frecuencias. No se puede olvidar que en varios casos la ganancia de los bloques es unitaria.

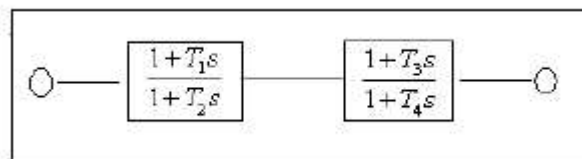


Figura 2.18. Diagrama de bloques de redes de adelanto-atraso [26].

Bloque Restaurador: Este tipo de bloque pretende eliminar la respuesta del estabilizador cuando se tienen condiciones de estado estable. Aquí el valor de frecuencia es diferente al nominal para una condición operativa estable y sin cambios.

Este bloque trata de evitar que desviaciones permanentes en las variables de entrada afecten el control de velocidad, cambiando el valor de su señal de referencia.

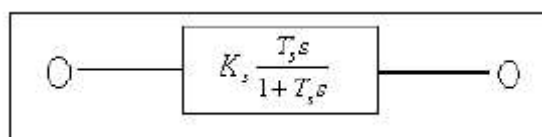


Figura 2.19. Bloque Restaurador [26].

Limitador: Cuando la señal de salida del estabilizador es grande es necesario limitarla a un rango de desviación del $\pm 5\%$ al $\pm 10\%$ de la condición nominal.

Este limitador se hace útil cuando se tienen desviaciones apreciables ocasionadas por fallas en los dispositivos electrónicos o en la señal de entrada.

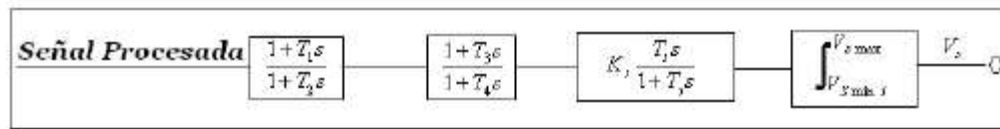


Figura 2.20. Bloque Limitador [26].

3. MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN

Los métodos de optimización son una rama de las matemáticas que consisten en el uso de modelos que pueden ser de tipo matemático, estadístico o algorítmico, con el objeto de determinar los valores de las variables que intervienen en los modelos de un sistema o proceso, para mejorar el resultado maximizando o minimizando su función principal [28].

Los problemas de optimización suelen tener tres componentes principales [28]:

- **Función Objetivo:** Es la cuantificación del sistema que se desea optimizar, ya sea para minimizarlo o maximizarlo.
- **Variables:** Son las decisiones o valores que pueden tomarse para afectar el resultado de la función objetivo. Matemáticamente se las puede dividir en variables independientes o de control y variables dependientes o de estado.
- **Restricciones:** Pueden o no ser parte del problema de optimización y son el conjunto de relaciones que ciertas variables están obligadas a cumplir, y que se expresan mediante ecuaciones o inecuaciones.

A través del tiempo se han desarrollado nuevas técnicas de optimización que buscan generalizar los métodos de solución de problemas específicos para que puedan ser aplicados a cualquier tipo de problemas.

3.1 MÉTODOS DETERMINISTAS

Los métodos de optimización deterministas o también llamados clásicos, se basan en encontrar una solución exacta al problema planteado usando restricciones de igualdad o sin restricciones dentro de un espacio de búsqueda local para una o más variables. Sus aplicaciones son reducidas en el mundo real [29].

3.1.1 MÉTODOS DIRECTOS

Este tipo de métodos encuentran el óptimo de una función explorando su naturaleza simple, gracias al uso de herramientas computacionales esta búsqueda se realiza por comparación sucesiva de los valores de la función objetivo en una secuencia de puntos, sin la necesidad de hacer intervenir derivadas analíticas. Esta característica le da la ventaja de que puede tratar fácilmente con problemas que incluyan discontinuidades, puntos de inflexión y puntos finales [24].

3.1.2 MÉTODOS DE GRADIENTE

Los métodos de gradiente se basan en el conocimiento de la derivada matemática de la función evaluada, a fin de encontrar un punto óptimo. La búsqueda a lo largo de la función toma dirección contra-gradiente si se busca un mínimo local y a favor de gradiente si se busca un máximo local. La primera derivada que representa la pendiente de la función, tomará el valor de cero en el punto óptimo [24], [31].

3.1.3 MÉTODOS DE PROGRAMACIÓN LINEAL

Este método se basa en la linealización tanto de la función objetivo como de sus restricciones para su uso en el proceso de optimización. El método más usado y común en este campo es el denominado *Simplex*. Sus aplicaciones son limitadas ya que es inapropiado para problemas complejos. La representación matemática del problema se puede expresar como [24], [31]:

$$\begin{aligned} & \text{minimizar } f^T x \\ & \text{sujeto a } Ax \leq b \\ & x \geq 0 \end{aligned} \tag{3.1}$$

3.1.4 MÉTODOS DE PROGRAMACIÓN NO LINEAL

Estos métodos son usados en problemas cuya función objetivo son de tipo no lineal, se basa en la solución de sistemas de igualdades y desigualdades bajo restricciones a las que debe estar sujeto el problema para encontrar un óptimo. En el caso de programas no lineales, el problema es más difícil de resolver porque la solución podría estar en cualquier parte dentro de la región factible, en el límite de la región factible o en un vértice. Su representación matemática es: [24], [31]

$$\begin{aligned} & \text{maximizar } f(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ & \text{sujeto a } g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq b_1 \\ & \quad \vdots \\ & \quad \vdots \\ & \quad \vdots \\ & g_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq b_m \end{aligned} \tag{3.2}$$

Las restricciones están dadas por g_1 hasta g_m .

3.2 MÉTODOS HEURÍSTICOS

Dado el caso que se deba usar métodos de optimización para sistemas reales, se puede observar que estos presentan una dificultad matemática muy elevada para su modelamiento y posterior solución. Aquí los métodos deterministas resultan ineficientes por la complejidad que conllevan; bajo esta premisa se plantea la solución de estos sistemas con métodos de tipo estocástico como los métodos heurísticos. [24]

Un método heurístico es un procedimiento para resolver un problema de optimización mediante una aproximación intuitiva, en la que la naturaleza intrínseca del problema se usa de manera inteligente para obtener una buena solución.

A continuación se presentan algunas categorías ampliadas y no excluyentes, donde se clasifican a los métodos heurísticos más usados y convencionales.

3.2.1 MÉTODOS DE DESCOMPOSICIÓN

Se descompone al problema original en sub-problemas más pequeños y sencillos de resolver, sin olvidar que todo pertenece al mismo problema aunque sea de manera general. Un claro ejemplo está en los principios de descomposición o separación de variables agravantes o descomposición de LaGrange [32].

3.2.2 MÉTODOS INDUCTIVOS

La idea de estos métodos es generalizar las propiedades o técnicas identificadas en secciones del problema, partiendo de ideas o partes pequeñas del ejercicio que luego se puedan aplicar al ejercicio completo [32].

3.2.3 MÉTODOS DE REDUCCIÓN

El principal objetivo de estos métodos es simplificar el problema restringiendo el espacio de soluciones. Se basa en introducir como restricciones del problema, las propiedades identificadas que se cumplen mayoritariamente por las buenas soluciones. El riesgo inminente es dejar fuera las soluciones óptimas del problema original [32].

3.2.4 MÉTODOS CONSTRUCTIVOS

Su proceso se basa en construir literalmente paso a paso una solución del problema dentro de un proceso iterativo. Usualmente son métodos deterministas y suelen estar basados en la mejor elección de cada iteración. Estos problemas se usan en planteamientos que se denominan clásicos como el de la mejor ruta entre dos puntos [32].

3.2.5 MÉTODOS DE BUSQUEDA LOCAL

Con respecto a los métodos presentados anteriormente, los procedimientos de búsqueda o mejora local comienzan con una solución del problema y la mejoran progresivamente. En cada iteración el procedimiento va de una solución a otra mejor, a través de cambios aleatorios en la solución. Se puede dar por terminado el proceso cuando el método es incapaz de encontrar una solución que mejore a la anterior. Un ejemplo clásico es el algoritmo de Ramificación y Poda en programación dinámica [32].

3.3 MÉTODOS META-HEURÍSTICOS

Los métodos meta-heurísticos son procedimientos que añaden una cierta capacidad de inteligencia que permite aumentar sus características como la búsqueda en un gran espacio de soluciones factibles (exploración) y el concentrar la búsqueda en una región reducida del espacio factible donde puede estar la solución óptima (explotación). Estos métodos pueden incorporar mecanismos para evitar que la búsqueda se detenga en un área confinada u óptimos locales logrando eficiencia en los procesos de optimización [33].

Debido a que la meta-heurística implementa, diseña o mejora los procedimientos heurísticos, dependerá de que tipo de heurística busca mejorar; sin embargo se identifican tres tipos clásicos de meta-heurística en base a lo que se inspiran para resolver el problema [33].

3.3.1 META-HEURÍSTICA INSPIRADA EN LA FÍSICA.

El Recocido Simulado (Simulated Annealing) es una técnica que se considera como un algoritmo de búsqueda y está inspirada en el proceso de calentamiento y posterior enfriamiento de un metal para obtener estados de baja energía en un sólido. Otro ejemplo es la atracción magnética y los campos magnéticos creados por dos cuerpos que se encuentran ionizados con cargas y composiciones particulares [32].

3.3.2 META-HEURÍSTICA INSPIRADA EN LA EVOLUCIÓN

A diferencia de los otros métodos que solo pasan de una solución a otra en cada iteración, estos van construyendo su conjunto de soluciones. El procedimiento se basa en generar, seleccionar, combinar y reemplazar una o un conjunto de soluciones en el proceso de búsqueda de la solución óptima [32].

Un ejemplo claro de esta técnica son los Algoritmos Genéticos, desarrollados a fines de los 60s y cuyo objetivo era poder hacer que las computadora aprendan por sí mismas.

Este método tiene su base en la naturaleza y los mecanismos de selección que utiliza, de acuerdo a los cuales los individuos más aptos de una población son los que sobreviven al adaptarse más fácilmente a los cambios que se producen en su entorno [32].

3.3.3 META-HEURÍSTICA INSPIRADA EN LA BIOLOGÍA

El método bio-inspirado es relativamente reciente, donde el ejemplo más claro es la optimización basada en colonias. Se inspira en el organizado comportamiento de las colonias de hormigas donde individuos muy simples de una colonia se comunican entre ellos a través de sustancias como la feromona. La repetición de recorridos por los individuos establece el camino más adecuado entre los alimentos y la colonia [32].

El método usa un proceso computacional para simular la comunicación indirecta que las hormigas utilizan para establecer el camino más corto hacia el alimento, la información resultante es aprendida y guardada en una matriz de feromonas [32].

3.4 ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN POR ENJAMBRE DE PARTÍCULAS

El algoritmo de optimización de enjambre de partículas (PSO) fue propuesto por primera vez por Kennedy y Eberhart en 1995, y ha exhibido muchas aplicaciones exitosas como: la evolución de los pesos y estructuras de las redes neuronales artificiales, la fabricación de fresadoras, control de la potencia reactiva, control de voltaje e incluso para estimar el estado de los sistemas de distribución de energía eléctrica [34].

El PSO está inspirado en las observaciones sobre los grupos de aves/peces. Varias aves/peces acuden sincrónicamente, cambian de dirección repentinamente, se dispersan

y se reagrupan juntas. Cada individuo, llamado partícula, se beneficia de la experiencia histórica propia y de la experiencia de los otros miembros del grupo durante la búsqueda de alimento. El PSO modela la dinámica social de aves/peces y sirve como un optimizador para funciones no lineales [34].

3.4.1 CONCEPTOS BÁSICOS DEL PSO [35]

PSO se basa en dos disciplinas fundamentales: ciencias sociales y ciencias de la computación; el PSO utiliza el concepto de inteligencia de enjambre, que es la propiedad de un sistema mediante el cual los comportamientos colectivos de agentes poco sofisticados que interactúan localmente con su entorno crean patrones funcionales globales coherentes.

3.4.1.1 Conceptos Sociales

Se sabe que "la inteligencia humana es el resultado de la interacción social", la evaluación, comparación, imitación de los demás individuos y el aprendizaje de las experiencias permiten a los humanos adaptarse al entorno y determinar patrones óptimos de comportamiento, actitudes y similares. Un segundo concepto social fundamental indica que "la cultura y la cognición son consecuencias inseparables de la socialización humana", la cultura se genera cuando los individuos se vuelven más similares debido al aprendizaje social mutuo y permite a las personas avanzar hacia patrones de comportamiento más adaptativos.

3.4.1.2 Principios de Inteligencia de Enjambre

La inteligencia de enjambre puede describirse considerando cinco principios fundamentales:

- **Principio de proximidad:** la población debe poder realizar cálculos simples de espacio y tiempo.
- **Principio de calidad:** la población debe ser capaz de responder a los factores de calidad en el medio ambiente.
- **Principio de respuesta diversa:** la población no debe comprometer su actividad a lo largo de canales excesivamente estrechos.
- **Principio de estabilidad:** la población no debe cambiar su modo de comportamiento cada vez que cambia el entorno.

- **Principio de adaptabilidad:** la población debería poder cambiar su modo de comportamiento cuando haya ganancias computacionales.

3.4.1.3 Características Computacionales

PSO es una extensión y encarnación potencialmente importante de autómatas celulares (CA). El enjambre de partículas puede conceptualizarse como células en CA, cuyos estados cambian en muchas dimensiones simultáneamente. Tanto PSO como CA comparten los siguientes atributos computacionales.

- Las partículas individuales (células) se actualizan en paralelo.
- Cada nuevo valor depende solo del valor anterior de la partícula (célula) y de sus vecinos.
- Todas las actualizaciones se realizan de acuerdo con las mismas reglas.

3.4.2 FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL ALGORITMO [24]

Considerando un enjambre de “S” partículas en un espacio con “D” dimensiones asignadas 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:

$$\begin{aligned} X_i^S &= [x_{i1}, x_{i2}, \dots \dots \dots, x_{iD}] \\ V_i^S &= [v_{i1}, v_{i2}, \dots \dots \dots, v_{iD}] \\ X_{pi}^S &= [x_{pi1}, x_{pi2}, \dots \dots \dots, x_{piD}] \end{aligned} \quad (3.3)$$

La mejor posición global en el enjambre se 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 para cada iteración t con la fórmula mostrada a continuación:

$$V_i(t + 1) = wV_i(t) + c_1r_1(X_p(t) - X_i(t)) + c_2r_2(X_g(t) - X_i(t)) \quad (3.4)$$

Esta ecuación muestra tres componentes que cumplen funciones muy específicas:

- El primer componente generalmente se conoce como "inercia", "impulso" o "hábito". Modela la tendencia de la partícula a continuar en la misma dirección en la que ha estado viajando.
- El segundo componente es una atracción lineal hacia la mejor posición encontrada por la partícula dada: (X_{pi}) escalado por un peso aleatorio c_1r_1 , este componente se conoce como "memoria", "autoconocimiento" o "recuerdo".
- El tercer componente de la ecuación de actualización de velocidad es una atracción lineal hacia la mejor posición encontrada por cualquier partícula X_g escalado por otro peso aleatorio c_2r_2 . Este componente se conoce como "cooperación", "conocimiento grupal" o "información compartida".

Como se muestra en la ecuación (3.5) para cada iteración t , la posición de la partícula X_i es alterada añadiendo la velocidad $v_i(t)$

$$X_i(t + 1) = X_i(t) + V_i(t + 1) \quad (3.5)$$

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 individual y global 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:

$$X_g \in \{X_{p0}, X_{p1}, \dots, X_{ps}\}$$

(3.6)

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

El proceso de actualización de la velocidad y posición de las partículas del enjambre se observa en forma grupal e individual tal como se muestra en los siguientes gráficos:

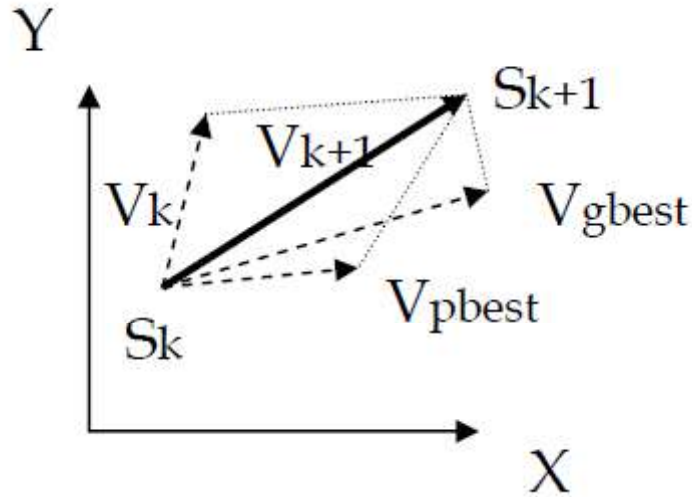


Figura 3.1. Dinámica de evolución de cada partícula del PSO [24].

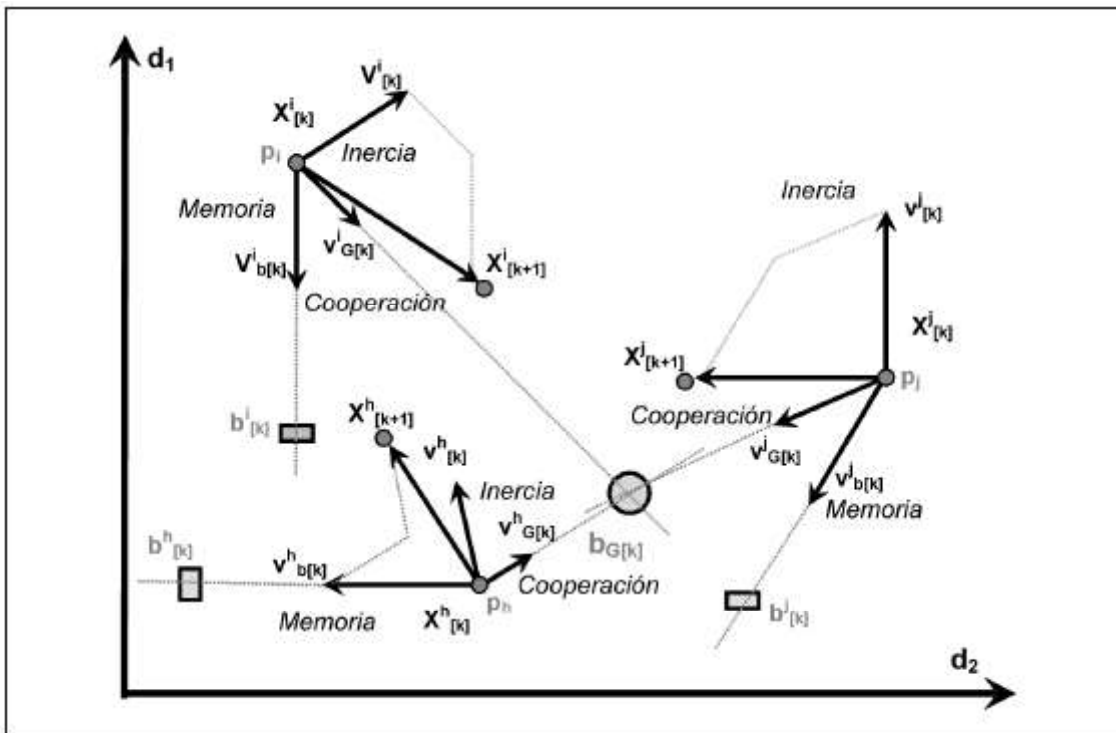


Figura 3.2. Dinámica de evolución grupal del PSO [24].

3.4.3 CONFIGURACIONES DEL ALGORITMO [34], [35]

3.4.3.1 Tamaño de la Población.

Como parte de la inicialización, es necesario definir el número de partículas utilizadas en la búsqueda. Este ha sido un tema de debate durante varios años, ya que, se pensaría que cuanto mayor es el número de partículas, más probable es que se encuentre una solución en menos iteraciones, pero este no es realmente el caso. Un número de partículas más grande requiere un alto costo computacional para evaluar la gran cantidad de ubicaciones que equivale a una gran cantidad de parámetros. Del mismo modo, si un enjambre de partículas es pequeño, la lógica dictaría que el costo computacional sería bajo, por lo tanto, una solución sería encontrada más rápido. Nuevamente, este no es el caso, ya que el bajo número de partículas daría como resultado una búsqueda que no cubre el área de soluciones posibles de manera adecuada y, por lo tanto, nuevamente tomará más tiempo hallar un óptimo aceptable. En este sentido la determinación del tamaño de la población se debe realizar de acuerdo al problema sobre el cual se enfoca la optimización, aunque, empíricamente quince a veinte partículas se consideran suficientes para realizar una búsqueda adecuada.

3.4.3.2 Velocidad Máxima y Mínima

En cada paso de iteración, el algoritmo procede ajustando la distancia y velocidad que cada partícula se mueve en cada dimensión del hiperespacio problemático. La velocidad de la partícula es una variable estocástica y, por lo tanto, está sujeta a crear una trayectoria incontrolada, haciendo que la partícula siga ciclos más amplios en el espacio del problema. Para amortiguar estas oscilaciones, se pueden definir los límites superior e inferior para la velocidad $V_i(t)$.

$$\begin{aligned} V_i(t) > v_{max} &\rightarrow V_i(t) = v_{max}, \\ V_i(t) < v_{min} &\rightarrow V_i(t) = v_{min}, \end{aligned} \tag{3.7}$$

La mayoría de las veces, el valor de v_{max} y v_{min} se selecciona empíricamente, de acuerdo con las características del problema, pudiendo calcularse en casos específicos o usarse parámetros alternos con para definir sus límite como rangos de peso de inercia, rangos de

valores aleatorios, etc. Esto dependerá y será escogido según las características del problema.

3.4.3.3 Coeficientes de Aceleración

Las constantes de aceleración c_1 y c_2 controlan el movimiento de cada partícula hacia su mejor posición individual y global, respectivamente. Los valores pequeños limitan el movimiento de las partículas, mientras que un valor grande puede hacer que las partículas diverjan.

Particularmente, se considera una sola aceleración constante $c = c_1 + c_2$. El valor propuesto de algunos autores es que $c = 4$, lo que significa que $c_1 + c_2 = 4$. Un buen punto de partida es considerar que $c_1 = c_2 = 2$. Es importante tener en cuenta que c_1 y c_2 no necesariamente deben ser iguales, ya que los "pesos" para la experiencia individual y grupal pueden variar de acuerdo con las características del problema.

3.4.3.4 Peso de Inercia

Este parámetro controla la exploración del espacio de búsqueda, por lo tanto, un valor inicialmente más alto (típicamente 0,9) permite que las partículas se muevan libremente para encontrar rápidamente el vecindario del óptimo global. Una vez que se encuentra la región óptima, el valor del peso de inercia se puede disminuir (generalmente a 0,4) para reducir la búsqueda, pasando de un modo exploratorio a un modo explotador. El peso de inercia se lo calcula mediante la siguiente fórmula:

$$w = (w_{max} - w_{min}) \frac{(iter_{max} - iter)}{iter_{max}} + w_{min} \quad (3.8)$$

Donde:

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

$iter$: Iteración actual.

w : Peso de inercia.

3.4.4 ALGORITMO PSO [36]

Existen muchas variantes del algoritmo PSO que dependen del tipo de problema en el que se lo usa, el campo de soluciones esperadas o el tipo de parámetros del algoritmo, pero puede decirse que un algoritmo PSO estándar generalmente constaría de las siguientes etapas:

- Configurar los parámetros que usará el programa como: peso de inercia máximo y mínimo (w_{max}, w_{min}), coeficientes de aceleración (c_1, c_2), número máximo de iteraciones ($iter_{max}$), tamaño de la población (T), y dimensiones de la partícula (D).
- Inicializar las partículas con velocidades y posiciones aleatorias, que deben encontrarse dentro de un rango establecido. Cada coordenada del vector velocidad V_i es inicializada de manera similar que la posiciones en el intervalo $[v_{min}, v_{max}]$ donde los límites se calculan de manera general como: $-1.0 \leq v \leq 1.0$.
- Evaluar para cada partícula su función objetivo.
- Para cada partícula comparar la función objetivo de la posición actual con la función objetivo de la mejor posición local hasta ese momento. Si se brinda un mejor resultado reemplazar la mejor posición local con la posición actual.
- Para cada función objetivo de la mejor posición local actual compararla con la función objetivo de la mejor posición global. Si se brinda un mejor resultado reemplazar la posición global con la mejor posición local actual.
- Actualizar el peso de inercia según la ecuación (3.8).
- Actualizar la posición y velocidad de cada partícula según las ecuaciones (3.4) y (3.5).
- Si el criterio de parada como número máximo de iteraciones o función objetivo dentro de un rango se cumple, el algoritmo termina satisfactoriamente, de otro modo regresar al segundo paso.

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

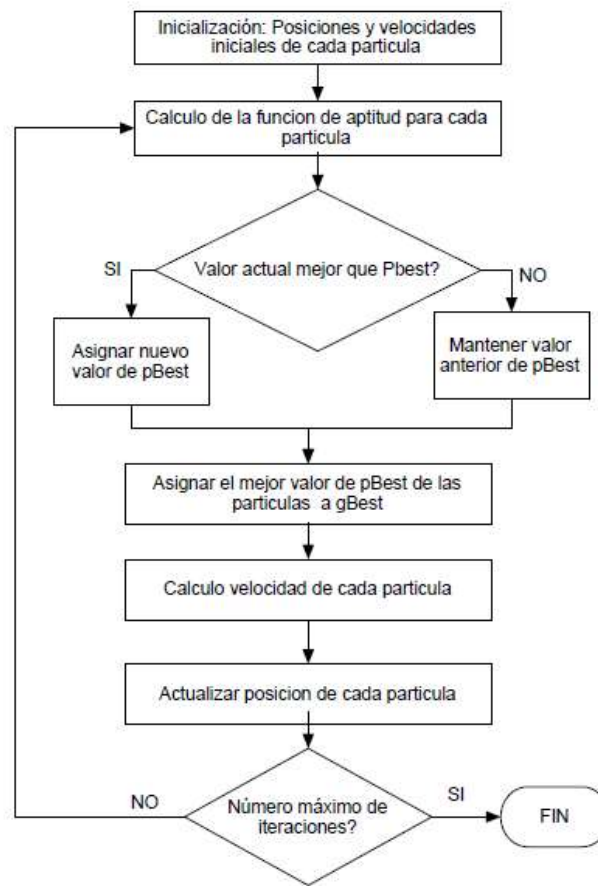


Figura 3.3. Diagrama de flujo del PSO

3.5 APLICACIÓN DEL ALGORITMO PSO

A fin de dar un entendimiento claro y detallado de cómo opera el algoritmo de enjambre de partículas (PSO), se presenta un ejemplo sencillo que muestra paso a paso la resolución de un problema planteado, usando valores numéricos tanto para las variables del problema como para los coeficientes y constantes del algoritmo.

3.5.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Un laboratorio desea reproducir un compuesto químico en base a información incompleta de su fórmula. Se conoce que el compuesto consta de 3 ingredientes cuyos datos se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 3.1. Información de los Ingredientes del Compuesto Químico

	INGREDIENTE "X ₁ "	INGREDIENTE "X ₂ "	INGREDIENTE "X ₃ "
Cantidad aproximada [gr]	20 a 30	30 a 50	5 a 10
Costo de cada gramo [\$]	22	13	40

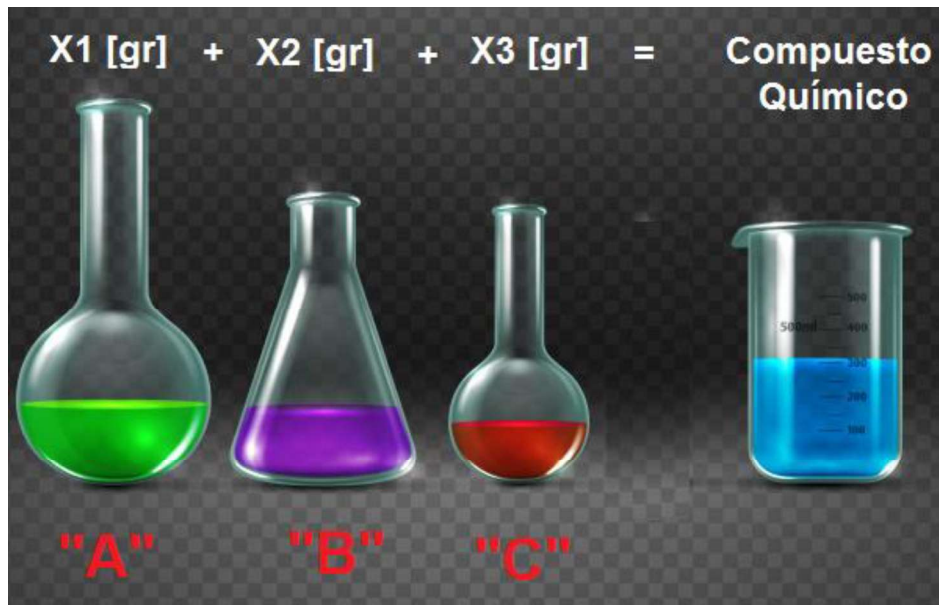


Figura 3.4. Representación gráfica del problema.

Por último, se sabe que el precio del compuesto ya elaborado es de \$ 2 214.

Lo que se buscará encontrar son las cantidades exactas de cada ingrediente que permitan reproducir el compuesto químico y que además coincida en su costo de elaboración para tener certeza que se trata de la misma fórmula química.

3.5.2 RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA

Antes de aplicar el algoritmo de optimización PSO, se debe establecer las condiciones bajo las que este operará en busca de una solución óptima al problema.

Tabla 3.2. Valores numéricos de rangos y coeficientes.

Variable	Valor
Máximo de iteraciones "iter_max"	10
Número de partículas "m"	5
Coefficiente de aceleración "c1"	2
Coefficiente de aceleración "c2"	2
Peso de inercia máximo "w_max"	0,9
Peso de inercia mínimo "w_min"	0,4
Valor máximo de X1 "x1_max"	30
Valor mínimo de X1 "x1_min"	20
Valor máximo de X2 "x2_max"	50
Valor mínimo de X2 "x2_min"	30
Valor máximo de X3 "x3_max"	10
Valor mínimo de X3 "x3_min"	5

A continuación se debe establecer la función objetivo con que trabajará el algoritmo. En este caso se trata de una minimización del valor absoluto en la diferencia entre el valor del compuesto original y el valor de los nuevos compuestos encontrados a lo largo de cada iteración y por cada partícula.

$$\min f(x_1, x_2, x_3) = |(22 * x_1 + 13 * x_2 + 40 * x_3) - 2214|$$

3.5.3 PRIMERA ITERACIÓN

Al inicio del proceso se darán las primeras soluciones del problema y por ser la primera iteración se deben crear las partículas que empezarán a orientarse en el espacio de búsqueda. Estas partículas recién creadas se convertirán inmediatamente en las mejores posiciones individuales y globales por no existir partículas previas que pudieran mejores resultados. Todo el proceso se realizará siguiendo los pasos que se detallan en el diagrama de flujo de la figura 3.3.

3.5.3.1 Posiciones y velocidades iniciales

Se crea cada partícula con posiciones y velocidades aleatorias que se deberán encontrar dentro de los rangos establecidos para cada parámetro de la tabla 3.2, como se muestra a continuación:

Tabla 3.3. Posiciones aleatorias iniciales de las partículas.

	$X_1(1)$	$X_2(1)$	$X_3(1)$
PARTÍCULA 1	21,4	35,6	9,2
PARTÍCULA 2	22,6	44,1	8,3
PARTÍCULA 3	28,1	39,7	8,6
PARTÍCULA 4	25,3	32	5,8
PARTÍCULA 5	29,3	41,7	6,3

Tabla 3.4. Velocidades aleatorias iniciales de las partículas [-1, 1].

	$V_1(1)$	$V_2(1)$	$V_3(1)$
PARTÍCULA 1	-0,72	-0,26	0,29
PARTÍCULA 2	0,46	-0,85	0,39
PARTÍCULA 3	-0,11	0,83	0,35
PARTÍCULA 4	-0,79	-0,73	-0,67
PARTÍCULA 5	-0,53	-0,97	0,07

3.5.3.2 Evaluación de la función objetivo de cada partícula

Tabla 3.5. Cálculo de la función objetivo de las partículas creadas en la 1er iteración.

	$X_1(1)$	$X_2(1)$	$X_3(1)$	F. Objetivo (1)
PARTÍCULA 1	21,4	35,6	9,2	307,2
PARTÍCULA 2	22,6	44,1	8,3	61,8
PARTÍCULA 3	28,1	39,7	8,6	60,8
PARTÍCULA 4	25,3	32	5,8	465,4
PARTÍCULA 5	29,3	41,7	6,3	66,4

Al tratarse de la primera iteración, la tabla 3.3 representa la mejor posición de cada partícula por ser las únicas partículas existentes hasta el momento. Por otra parte, la mejor posición global se obtiene del menor valor de la función objetivo, y no será necesario compararlo con ningún otro valor ya que no existen mejores valores previos.

Tabla 3.6. Mejor posición individual de las partículas creadas en la 1er iteración.

	$X_1(p_1)$	$X_2(p_1)$	$X_3(p_1)$	F. Objetivo (p_1)
PARTÍCULA 1	21,4	35,6	9,2	307,2
PARTÍCULA 2	22,6	44,1	8,3	61,8
PARTÍCULA 3	28,1	39,7	8,6	60,8
PARTÍCULA 4	25,3	32	5,8	465,4
PARTÍCULA 5	29,3	41,7	6,3	66,4

Tabla 3.7. Mejor posición global de las partículas creadas en la 1er iteración.

	$X_1(g_1)$	$X_2(g_1)$	$X_3(g_1)$	F. Objetivo (g_1)
PARTÍCULA T	28,1	39,7	8,6	60,8

3.5.3.3 Actualización del peso de inercia

Viene dado por la ecuación (3.8), en donde se reemplazan los valores de la tabla 3.2.

$$w = (0.9 - 0.4) \frac{(10 - 1)}{10} + 0.4 = 0.85$$

3.5.3.4 Cálculo de las nuevas posiciones y velocidades de las partículas

Se calcula las nuevas posiciones y velocidades usando las posiciones y velocidades iniciales aleatorias obtenidas en la primera iteración. Se debe usar la ecuación (3.5), y verificar que los resultados se encuentren dentro de los límites de cada parámetro según la tabla 3.2.

Tabla 3.8. Nuevas posiciones de cada partícula para la variable X_1

	Ecuación	Resultado
PARTÍCULA 1	$X_1(2) = X_1(1) + V_1(1)$	$X_1(2) = 20,68$
PARTÍCULA 2		$X_1(2) = 23,06$
PARTÍCULA 3		$X_1(2) = 27,99$
PARTÍCULA 4		$X_1(2) = 24,51$
PARTÍCULA 5		$X_1(2) = 28,77$

Tabla 3.9. Nuevas posiciones de cada partícula para la variable X_2

	Ecuación	Resultado
PARTÍCULA 1	$X_2(2) = X_2(1) + V_2(1)$	$X_2(2) = 35,34$
PARTÍCULA 2		$X_2(2) = 43,25$
PARTÍCULA 3		$X_2(2) = 40,53$
PARTÍCULA 4		$X_2(2) = 31,27$
PARTÍCULA 5		$X_2(2) = 40,3$

Tabla 3.10. Nuevas posiciones de cada partícula para la variable X_3

	Ecuación	Resultado
PARTÍCULA 1	$X_3(2) = X_3(1) + V_3(1)$	$X_3(2) = 9,49$
PARTÍCULA 2		$X_3(2) = 8,69$
PARTÍCULA 3		$X_3(2) = 8,95$
PARTÍCULA 4		$X_3(2) = 5,13$
PARTÍCULA 5		$X_3(2) = 6,37$

Tabla 3.11. Posiciones actualizadas de las partículas para la iteración 1.

	$X_1(2)$	$X_2(2)$	$X_3(2)$
PARTÍCULA 1	20,68	35,34	9,49
PARTÍCULA 2	23,06	43,25	8,69
PARTÍCULA 3	27,99	40,53	8,95
PARTÍCULA 4	24,51	31,27	5,13
PARTÍCULA 5	28,77	40,73	6,37

De la misma manera, se procede a calcular las nuevas velocidades de las partículas usando los coeficientes ya establecidos c_1 y c_2 , los valores aleatorios r_1 y r_2 hallados en el rango $[0, 1]$, el peso de inercia calculado $w = 0.85$ y las mejores posiciones individuales y globales de cada partícula. Se usa la ecuación (3.4) para cada velocidad inicial como se muestra a continuación:

Tabla 3.12. Nuevas velocidades de cada partícula para la variable X_1

	Ecuación	Resultado
PARTÍCULA 1	$V_1(2) = 0,85 * V_1(1) + \{2 * 0,78 * (X_1(p_1) - X_1(1))\} + \{2 * 0,01 * (X_1(g_1) - X_1(1))\}$	$V_1(2) = -0,41$
PARTÍCULA 2	$V_1(2) = 0,85 * V_1(1) + \{2 * 0,76 * (X_1(p_1) - X_1(1))\} + \{2 * 0,4 * (X_1(g_1) - X_1(1))\}$	$V_1(2) = 4,84$
PARTÍCULA 3	$V_1(2) = 0,85 * V_1(1) + \{2 * 0,06 * (X_1(p_1) - X_1(1))\} + \{2 * 0,34 * (X_1(g_1) - X_1(1))\}$	$V_1(2) = -0,1$
PARTÍCULA 4	$V_1(2) = 0,85 * V_1(1) + \{2 * 0,2 * (X_1(p_1) - X_1(1))\} + \{2 * 0,79 * (X_1(g_1) - X_1(1))\}$	$V_1(2) = 3,78$
PARTÍCULA 5	$V_1(2) = 0,85 * V_1(1) + \{2 * 0,6 * (X_1(p_1) - X_1(1))\} + \{2 * 0,97 * (X_1(g_1) - X_1(1))\}$	$V_1(2) = -2,77$

Tabla 3.13. Nuevas velocidades de cada partícula para la variable X_2

	Ecuación	Resultado
PARTÍCULA 1	$V_2(2) = 0,85 * V_2(1) + \{2 * 0,35 * (X_2(p_1) - X_2(1))\} + \{2 * 0,79 * (X_2(g_1) - X_2(1))\}$	$V_2(2) = 6,24$
PARTÍCULA 2	$V_2(2) = 0,85 * V_2(1) + \{2 * 0,58 * (X_2(p_1) - X_2(1))\} + \{2 * 0,62 * (X_2(g_1) - X_2(1))\}$	$V_2(2) = -6,2$
PARTÍCULA 3	$V_2(2) = 0,85 * V_2(1) + \{2 * 0,02 * (X_2(p_1) - X_2(1))\} + \{2 * 0,62 * (X_2(g_1) - X_2(1))\}$	$V_2(2) = 0,7$
PARTÍCULA 4	$V_2(2) = 0,85 * V_2(1) + \{2 * 0,4 * (X_2(p_1) - X_2(1))\} + \{2 * 0,85 * (X_2(g_1) - X_2(1))\}$	$V_2(2) = 12,49$
PARTÍCULA 5	$V_2(2) = 0,85 * V_2(1) + \{2 * 0,22 * (X_2(p_1) - X_2(1))\} + \{2 * 0,46 * (X_2(g_1) - X_2(1))\}$	$V_2(2) = -2,67$

Tabla 3.14. Nuevas velocidades de cada partícula para la variable X_3

	Ecuación	Resultado
PARTÍCULA 1	$V_3(2) = 0,85 * V_3(1) + \{2 * 0,77 * (X_3(p_1) - X_3(1))\} + \{2 * 0,23 * (X_3(g_1) - X_3(1))\}$	$V_3(2) = -0,03$
PARTÍCULA 2	$V_3(2) = 0,85 * V_3(1) + \{2 * 0,26 * (X_3(p_1) - X_3(1))\} + \{2 * 0,1 * (X_3(g_1) - X_3(1))\}$	$V_3(2) = 0,39$
PARTÍCULA 3	$V_3(2) = 0,85 * V_3(1) + \{2 * 0,42 * (X_3(p_1) - X_3(1))\} + \{2 * 0,34 * (X_3(g_1) - X_3(1))\}$	$V_3(2) = 0,3$
PARTÍCULA 4	$V_3(2) = 0,85 * V_3(1) + \{2 * 0,91 * (X_3(p_1) - X_3(1))\} + \{2 * 0,28 * (X_3(g_1) - X_3(1))\}$	$V_3(2) = 1,02$
PARTÍCULA 5	$V_3(2) = 0,85 * V_3(1) + \{2 * 0,46 * (X_3(p_1) - X_3(1))\} + \{2 * 0,35 * (X_3(g_1) - X_3(1))\}$	$V_3(2) = 1,68$

Tabla 3.15. Velocidades actualizadas de las partículas para la iteración 1.

	$V_1(2)$	$V_2(2)$	$V_3(2)$
PARTÍCULA 1	-0,41	6,24	-0,03
PARTÍCULA 2	4,84	-6,20	0,39
PARTÍCULA 3	-0,10	0,70	0,30
PARTÍCULA 4	3,78	12,49	1,02
PARTÍCULA 5	-2,77	-2,67	1,68

3.5.4 INICIO DE LA ITERACIÓN 2

3.5.4.1 Cálculo de la función objetivo de las nuevas partículas

Usando las posiciones actualizadas de la tabla 3.11 se procede a una nueva evaluación de la función objetivo para cada partícula con estos valores.

Posteriormente, se realiza una comparación partícula por partícula entre las recién calculadas y las de la tabla 3.6 de mejores posiciones individuales de la iteración 1. Si la primera brinda mejores resultados, reemplazará a la segunda como mejor partícula individual.

Finalmente, se hará la misma comparación entre la mejor posición global de la iteración 1 que se encuentra en la tabla 3.7 y la mejor posición individual de todas las partículas de la actual iteración en la tabla 3.17. Se presentan los resultados obtenidos a continuación:

Tabla 3.16. Resultados de la función objetivo con las partículas de la 2da iteración.

	$X_1(2)$	$X_2(2)$	$X_3(2)$	F. Objetivo (2)
PARTÍCULA 1	20,68	35,34	9,49	319,15
PARTÍCULA 2	23,06	43,25	8,69	61,54
PARTÍCULA 3	27,99	40,53	8,95	24,42
PARTÍCULA 4	24,51	31,27	5,13	531,38
PARTÍCULA 5	28,77	40,73	6,37	104,34

Tabla 3.17. Mejor posición individual de las partículas en la 2da iteración.

	$X_1(p_2)$	$X_2(p_2)$	$X_3(p_2)$	F. Objetivo (p_2)
PARTÍCULA 1	21,40	35,60	9,20	307,20
PARTÍCULA 2	23,06	43,25	8,69	61,54
PARTÍCULA 3	27,99	40,53	8,95	24,42
PARTÍCULA 4	25,30	32,00	5,80	465,40
PARTÍCULA 5	29,30	41,70	6,30	66,40

Si la fila se encuentra en amarillo, significa que fue reemplazada por un mejor valor hallado en la iteración actual.

Tabla 3.18. Mejor posición global de las partículas en la 2da iteración.

	$X_1(g_2)$	$X_2(g_2)$	$X_3(g_2)$	F. Objetivo (g_2)
PARTÍCULA T	27,99	40,53	8,95	24,42

3.5.4.2 Actualización del peso de inercia

En cada iteración se debe actualizar este valor, ya que tiene la variante del número de iteración actual.

$$w = (0.9 - 0.4) \frac{(10 - 2)}{10} + 0.4 = 0.8$$

3.5.4.3 Cálculo de las nuevas posiciones y velocidades de las partículas

Se repite el proceso de la iteración 1 usando las nuevas velocidades y posiciones de dicha iteración que se encuentran en la tabla 3.11 y 3.15.

Tabla 3.19. Nuevas posiciones de cada partícula para la variable X_1

	Ecuación	Resultado
PARTÍCULA 1	$X_1(3) = X_1(2) + V_1(2)$	$X_1(3) = 20,27$
PARTÍCULA 2		$X_1(3) = 27,90$
PARTÍCULA 3		$X_1(3) = 27,89$
PARTÍCULA 4		$X_1(3) = 28,30$
PARTÍCULA 5		$X_1(3) = 26,01$

Tabla 3.20. Nuevas posiciones de cada partícula para la variable X_2

	Ecuación	Resultado
PARTÍCULA 1	$X_2(3) = X_2(2) + V_2(2)$	$X_2(3) = 41,59$
PARTÍCULA 2		$X_2(3) = 37,05$
PARTÍCULA 3		$X_2(3) = 41,23$
PARTÍCULA 4		$X_2(3) = 43,76$
PARTÍCULA 5		$X_2(3) = 38,06$

Tabla 3.21. Nuevas posiciones de cada partícula para la variable X_3

	Ecuación	Resultado
PARTÍCULA 1	$X_3(3) = X_3(2) + V_3(2)$	$X_3(3) = 9,46$
PARTÍCULA 2		$X_3(3) = 9,08$
PARTÍCULA 3		$X_3(3) = 9,25$
PARTÍCULA 4		$X_3(3) = 6,15$
PARTÍCULA 5		$X_3(3) = 8,05$

Tabla 3.22. Posiciones actualizadas de las partículas para la iteración 2.

	$X_1(3)$	$X_2(3)$	$X_3(3)$
PARTÍCULA 1	20,27	41,59	9,46
PARTÍCULA 2	27,90	37,05	9,08
PARTÍCULA 3	27,89	41,23	9,25
PARTÍCULA 4	28,30	43,76	6,15
PARTÍCULA 5	26,01	38,06	8,05

Para la velocidad de cada partícula se expresan las siguientes ecuaciones y resultados:

Tabla 3.23. Nuevas velocidades de cada partícula para la variable X_1

	Ecuación	Resultado
PARTÍCULA 1	$V_1(3) = 0,8 * V_1(2) + \{2 * 0,22 * (X_1(p_2) - X_1(2))\} + \{2 * 0,29 * (X_1(g_2) - X_1(2))\}$	$V_1(3) = 4,17$
PARTÍCULA 2	$V_1(3) = 0,8 * V_1(2) + \{2 * 0,45 * (X_1(p_2) - X_1(2))\} + \{2 * 0,42 * (X_1(g_2) - X_1(2))\}$	$V_1(3) = 8,21$
PARTÍCULA 3	$V_1(3) = 0,8 * V_1(2) + \{2 * 0,26 * (X_1(p_2) - X_1(2))\} + \{2 * 0,85 * (X_1(g_2) - X_1(2))\}$	$V_1(3) = -0,08$
PARTÍCULA 4	$V_1(3) = 0,8 * V_1(2) + \{2 * 0,33 * (X_1(p_2) - X_1(2))\} + \{2 * 0,54 * (X_1(g_2) - X_1(2))\}$	$V_1(3) = 7,47$
PARTÍCULA 5	$V_1(3) = 0,8 * V_1(2) + \{2 * 0,47 * (X_1(p_2) - X_1(2))\} + \{2 * 0,24 * (X_1(g_2) - X_1(2))\}$	$V_1(3) = -2,24$

Tabla 3.24. Nuevas velocidades de cada partícula para la variable X_2

	Ecuación	Resultado
PARTÍCULA 1	$V_2(3) = 0,8 * V_2(2) + \{2 * 0,89 * (X_2(p_2) - X_2(2))\} + \{2 * 0,16 * (X_2(g_2) - X_2(2))\}$	$V_2(3) = 7,38$
PARTÍCULA 2	$V_2(3) = 0,8 * V_2(2) + \{2 * 0,01 * (X_2(p_2) - X_2(2))\} + \{2 * 0,4 * (X_2(g_2) - X_2(2))\}$	$V_2(3) = -7,43$
PARTÍCULA 3	$V_2(3) = 0,8 * V_2(2) + \{2 * 0,51 * (X_2(p_2) - X_2(2))\} + \{2 * 0,95 * (X_2(g_2) - X_2(2))\}$	$V_2(3) = 0,60$
PARTÍCULA 4	$V_2(3) = 0,8 * V_2(2) + \{2 * 0,12 * (X_2(p_2) - X_2(2))\} + \{2 * 0,04 * (X_2(g_2) - X_2(2))\}$	$V_2(3) = 11,56$

PARTÍCULA 5	$V_2(3) = 0,8 * V_2(2) + \{2 * 0,81 * (X_2(p_2) - X_2(2))\}$ $+ \{2 * 0,37 * (X_2(g_2) - X_2(2))\}$	$V_2(3) = -0,84$
-------------	---	------------------

Tabla 3.25. Nuevas velocidades de cada partícula para la variable X_3

	Ecuación	Resultado
PARTÍCULA 1	$V_3(3) = 0,8 * V_3(2) + \{2 * 0,75 * (X_3(p_2) - X_3(2))\}$ $+ \{2 * 0,6 * (X_3(g_2) - X_3(2))\}$	$V_3(3) = -1,10$
PARTÍCULA 2	$V_3(3) = 0,8 * V_3(2) + \{2 * 0,35 * (X_3(p_2) - X_3(2))\}$ $+ \{2 * 0,72 * (X_3(g_2) - X_3(2))\}$	$V_3(3) = 0,71$
PARTÍCULA 3	$V_3(3) = 0,8 * V_3(2) + \{2 * 0,13 * (X_3(p_2) - X_3(2))\}$ $+ \{2 * 0,94 * (X_3(g_2) - X_3(2))\}$	$V_3(3) = 0,25$
PARTÍCULA 4	$V_3(3) = 0,8 * V_3(2) + \{2 * 0,84 * (X_3(p_2) - X_3(2))\}$ $+ \{2 * 0,38 * (X_3(g_2) - X_3(2))\}$	$V_3(3) = 4,92$
PARTÍCULA 5	$V_3(3) = 0,8 * V_3(2) + \{2 * 0,5 * (X_3(p_2) - X_3(2))\}$ $+ \{2 * 0,68 * (X_3(g_2) - X_3(2))\}$	$V_3(3) = 4,85$

Tabla 3.26. Velocidades actualizadas de las partículas para la iteración 2.

	$V_1(3)$	$V_2(3)$	$V_3(3)$
PARTÍCULA 1	4,17	7,38	-1,10
PARTÍCULA 2	8,21	-7,43	0,71
PARTÍCULA 3	-0,08	0,60	0,25
PARTÍCULA 4	7,47	11,56	4,92
PARTÍCULA 5	-2,24	-0,84	4,85

3.5.5 INICIO DE LA ITERACIÓN 3

A partir de esta iteración solo se presentarán los resultados de cada paso de las iteraciones en las tablas de resultados, ya que el proceso que se mostró anteriormente de manera detallada se vuelve repetitivo y no presentará variaciones en su lógica

El propósito de las siguientes iteraciones, es que se pueda observar cómo evolucionan las mejores partículas en cada paso iterativo, así como el mejor resultado global que va acercándose cada vez más a su meta de minimizar la función objetivo establecida.

Tabla 3.27. Resultados de la función objetivo con las partículas de la 3ra iteración.

	$X_1(3)$	$X_2(3)$	$X_3(3)$	F. Objetivo (3)
PARTÍCULA 1	20,27	41,59	9,46	141,88
PARTÍCULA 2	27,90	37,05	9,08	125,33
PARTÍCULA 3	27,89	41,23	9,25	6,50
PARTÍCULA 4	28,30	43,76	6,15	32,56
PARTÍCULA 5	26,01	38,06	8,05	178,17

Tabla 3.28. Mejor posición individual de las partículas en la 3ra iteración.

	$X_1(p_3)$	$X_2(p_3)$	$X_3(p_3)$	F. Objetivo (p_3)
PARTÍCULA 1	20,27	41,59	9,46	141,88
PARTÍCULA 2	23,06	43,25	8,69	61,54
PARTÍCULA 3	27,89	41,23	9,25	6,50
PARTÍCULA 4	28,30	43,76	6,15	32,56
PARTÍCULA 5	29,30	41,70	6,30	66,40

Tabla 3.29. Mejor posición global de las partículas en la 3ra iteración.

	$X_1(g_3)$	$X_2(g_3)$	$X_3(g_3)$	F. Objetivo (g_3)
PARTÍCULA T	27,89	41,23	9,25	6,50

Tabla 3.30. Posiciones actualizadas de las partículas para la iteración 3.

	$X_1(4)$	$X_2(4)$	$X_3(4)$
PARTÍCULA 1	24,44	48,97	8,36
PARTÍCULA 2	36,11	29,63	9,79
PARTÍCULA 3	27,80	41,83	9,51
PARTÍCULA 4	35,77	55,32	11,08
PARTÍCULA 5	23,77	37,22	12,90

Tabla 3.31. Velocidades actualizadas de las partículas para la iteración 3.

	$V_1(4)$	$V_2(4)$	$V_3(4)$
PARTÍCULA 1	12,29	4,92	-1,23
PARTÍCULA 2	4,36	6,59	0,09
PARTÍCULA 3	-0,06	0,45	0,19
PARTÍCULA 4	4,93	6,38	3,96
PARTÍCULA 5	0,06	5,87	3,18

3.5.6 INICIO DE LA ITERACIÓN 4

Tabla 3.32. Resultados de la función objetivo con las partículas de la 4ta iteración.

	$X_1(4)$	$X_2(4)$	$X_3(4)$	F. Objetivo (4)
PARTÍCULA 1	24,44	48,97	8,36	127,18
PARTÍCULA 2	30,00	30,00	9,79	262,45
PARTÍCULA 3	27,80	41,83	9,51	32,79
PARTÍCULA 4	30,00	50,00	10,00	346,00
PARTÍCULA 5	23,77	37,22	10,00	174,38

Tabla 3.33. Mejor posición individual de las partículas en la 4ta iteración.

	$X_1(p_4)$	$X_2(p_4)$	$X_3(p_4)$	F. Objetivo (p_4)
PARTÍCULA 1	24,44	48,97	8,36	127,18
PARTÍCULA 2	23,06	43,25	8,69	61,54
PARTÍCULA 3	27,89	41,23	9,25	6,50
PARTÍCULA 4	28,30	43,76	6,15	32,56
PARTÍCULA 5	29,30	41,70	6,30	66,40

Tabla 3.34. Mejor posición global de las partículas en la 4ta iteración.

	$X_1(g_4)$	$X_2(g_4)$	$X_3(g_4)$	F. Objetivo (g_4)
PARTÍCULA T	27,89	41,23	9,25	6,50

Tabla 3.35. Posiciones actualizadas de las partículas para la 4ta iteración.

	$X_1(5)$	$X_2(5)$	$X_3(5)$
PARTÍCULA 1	30,00	50,00	7,13
PARTÍCULA 2	30,00	36,59	9,88
PARTÍCULA 3	27,74	42,27	9,70
PARTÍCULA 4	30,00	50,00	10,00
PARTÍCULA 5	23,83	43,09	10,00

Tabla 3.36. Velocidades actualizadas de las partículas para la 4ta iteración.

	$V_1(5)$	$V_2(5)$	$V_3(5)$
PARTÍCULA 1	13,37	-9,59	0,79
PARTÍCULA 2	0,33	34,10	-2,96
PARTÍCULA 3	0,20	-0,78	-0,47
PARTÍCULA 4	-1,35	-11,84	2,51
PARTÍCULA 5	3,19	12,42	-1,21

3.5.7 INICIO DE LA ITERACIÓN 5

Tabla 3.37. Resultados de la función objetivo con las partículas de la 5ta iteración.

	$X_1(5)$	$X_2(5)$	$X_3(5)$	F. Objetivo (5)
PARTÍCULA 1	30,00	50,00	7,13	231,10
PARTÍCULA 2	30,00	36,59	9,88	60,97
PARTÍCULA 3	27,74	42,27	9,70	52,50
PARTÍCULA 4	30,00	50,00	10,00	346,00
PARTÍCULA 5	23,83	43,09	10,00	2,99

Tabla 3.38. Mejor posición individual de las partículas en la 5ta iteración.

	$X_1(p_5)$	$X_2(p_5)$	$X_3(p_5)$	F. Objetivo (p_5)
PARTÍCULA 1	24,44	48,97	8,36	127,18
PARTÍCULA 2	30,00	36,59	9,88	60,97
PARTÍCULA 3	27,89	41,23	9,25	6,50
PARTÍCULA 4	28,30	43,76	6,15	32,56
PARTÍCULA 5	23,83	43,09	10,00	2,99

Tabla 3.39. Mejor posición global de las partículas en la 5ta iteración.

	$X_1(g_5)$	$X_2(g_5)$	$X_3(g_5)$	F. Objetivo (g_5)
PARTÍCULA T	23,83	43,09	10,00	2,99

Tabla 3.40. Posiciones actualizadas de las partículas para la 5ta iteración.

	$X_1(6)$	$X_2(6)$	$X_3(6)$
PARTÍCULA 1	30,00	40,41	7,92
PARTÍCULA 2	30,00	50,00	6,93
PARTÍCULA 3	27,95	41,50	9,23
PARTÍCULA 4	28,65	38,16	10,00
PARTÍCULA 5	27,02	50,00	8,79

Tabla 3.41. Velocidades actualizadas de las partículas para la 5ta iteración.

	$V_1(6)$	$V_2(6)$	$V_3(6)$
PARTÍCULA 1	2,45	-11,11	6,44
PARTÍCULA 2	-0,94	32,60	-2,14
PARTÍCULA 3	-1,18	-1,99	-0,24
PARTÍCULA 4	-7,10	-26,29	-2,44
PARTÍCULA 5	2,39	9,31	-0,91

3.5.8 INICIO DE LA ITERACIÓN 6

Tabla 3.42. Resultados de la función objetivo con las partículas de la 6ta iteración.

	$X_1(6)$	$X_2(6)$	$X_3(6)$	F. Objetivo (6)
PARTÍCULA 1	30,00	40,41	7,92	24,92
PARTÍCULA 2	30,00	50,00	6,93	223,01
PARTÍCULA 3	27,95	41,50	9,23	14,98
PARTÍCULA 4	28,65	38,16	10,00	38,99
PARTÍCULA 5	27,02	50,00	8,79	231,94

Tabla 3.43. Mejor posición individual de las partículas en la 6ta iteración.

	$X_1(p_6)$	$X_2(p_6)$	$X_3(p_6)$	F. Objetivo (p_6)
PARTÍCULA 1	30,00	40,41	7,92	24,92
PARTÍCULA 2	30,00	36,59	9,88	60,97
PARTÍCULA 3	27,89	41,23	9,25	6,50
PARTÍCULA 4	28,30	43,76	6,15	32,56
PARTÍCULA 5	23,83	43,09	10,00	2,99

Tabla 3.44. Mejor posición global de las partículas en la 6ta iteración.

	$X_1(g_6)$	$X_2(g_6)$	$X_3(g_6)$	F. Objetivo (g_6)
PARTÍCULA T	23,83	43,09	10,00	2,99

Tabla 3.45. Posiciones actualizadas de las partículas para la 6ta iteración.

	$X_1(7)$	$X_2(7)$	$X_3(7)$
PARTÍCULA 1	30,00	29,29	14,36
PARTÍCULA 2	30,00	50,00	4,78
PARTÍCULA 3	26,77	39,50	8,99
PARTÍCULA 4	21,55	11,86	10,00
PARTÍCULA 5	29,41	50,00	7,88

Tabla 3.46. Velocidades actualizadas de las partículas para la 6ta iteración.

	$V_1(7)$	$V_2(7)$	$V_3(7)$
PARTÍCULA 1	-1,11	-7,39	7,45
PARTÍCULA 2	-1,89	-9,31	5,23
PARTÍCULA 3	-2,38	-1,55	1,24
PARTÍCULA 4	-9,44	-5,88	-6,15
PARTÍCULA 5	-8,11	-17,27	1,76

El criterio de terminación suele ser por lo general un máximo de iteraciones que aseguran que el algoritmo ha explorado la mayoría de las zonas de búsqueda con sus partículas, aunque también se puede considerar un valor superior o inferior a un criterio de la función objetivo.

En este punto, por tratarse de un ejemplo únicamente demostrativo, se dará por terminado el ejercicio, habiéndose encontrado valores que acercan a cero la función objetivo en su mejor ubicación global, y ya que la última iteración no brindó un resultado que mejore la evaluación anterior de la función objetivo. Esto con el fin de no extender demasiado los cálculos de esta sección que tiene como finalidad mostrar el alcance y operación del método de enjambre de partículas.

4. METODOLOGÍA PARA SINTONIZACIÓN DE PARÁMETROS DE SISTEMAS DE CONTROL

El presente capítulo detalla la propuesta metodológica de este trabajo. Se establecen los pasos, procedimientos e información básica con la que se debe contar para poder aplicar la metodología de manera correcta; ya que, la forma en que se lo estructuró, permite aplicarlo a una gran variedad de casos.

Se explicará la importancia de validar modelos de sistemas eléctricos recopilando la mejor información de la que se pueda tener acceso y que pueda ser confiable al momento de ser usada. Posteriormente, se explica el proceso de tratamiento de la información externa disponible que se usará en la metodología y en los modelos del sistema de pruebas. Finalmente, se detalla la incorporación del método de optimización, las variaciones efectuadas en busca de mejores resultados y la información que entrega luego de ser aplicada al caso de estudio.

Una idea general del procedimiento se presenta en la figura 4.1. Cada punto de este procedimiento se explicará en las siguientes secciones de este capítulo usando la información que permitió el desarrollo de este trabajo.

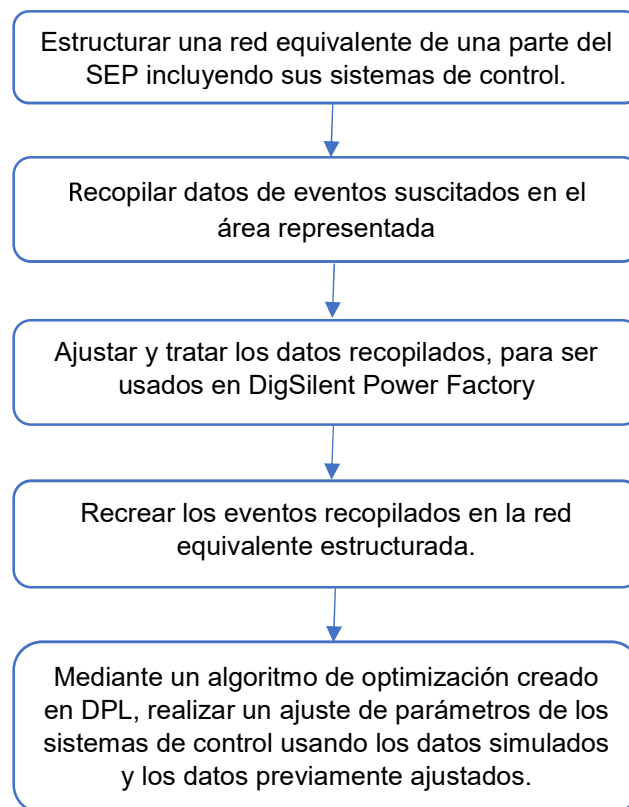


Figura 4.1. Esquema de sintonización de parámetros de sistemas de control.

4.1 VALIDACIÓN DE MODELOS [37]

En la actualidad la mayoría de ciencias relacionadas con la física, incluyendo los sistemas eléctricos, necesitan métodos estadísticos como: muestreo, simulación, diseño de experimentos, modelamiento estadístico e inferencia; a fin de poder recolectar, comprender y analizar datos para una posterior interpretación de los mismos.

Para el caso de los sistemas eléctricos, la simulación es lo más usado, ya que, es un proceso de experimentación controlada que imita los aspectos importantes del comportamiento de un sistema mediante la construcción de un modelo matemático implementado en una herramienta computacional que permite analizar el cambio del comportamiento del modelo o sistema, dadas ciertas condiciones o circunstancias.

Un sistema modelado representa el conjunto de componentes o elementos que interactúan para brindar datos de su comportamiento en la realidad. Mientras que un modelo es la representación formal de un sistema real; los modelos generalmente son matemáticos y se usan para aumentar la comprensión de lo que emulan, hacer predicciones y ayudar a su control.

Crear un modelo que represente algo real, tangible u observable incluye los siguientes pasos:

- Describirlo.
- Modelarlo matemáticamente
- Validarlo
- Usarlo para predecir su comportamiento futuro.

Validar un modelo es una parte crucial del proceso, debido a que permite comprobar que los primeros pasos se realizaron adecuadamente, y garantiza que las predicciones arrojaran los resultados esperados.

En estudios eléctricos la validación de un modelo estará sujeto a un caso experimental dado, debido a que la formulación matemática varía según el tipo de estudio realizado, lo cual deberá ser parte de la información del modelo.

La validación de este trabajo es residual, ya que realiza comparaciones de las salidas del modelo con las mediciones de un caso real y observa si existen diferencias entre las mismas para poder explicar a qué son debidas; y, posteriormente buscar la manera de minimizar estas diferencias ajustando el modelo mediante análisis de sensibilidad o ajuste

de dominios de parámetros. Todo este proceso será previo a implementar el algoritmo de optimización.

4.2 MODELOS EMPLEADOS

4.2.1 MODELAMIENTO DE LA RED EQUIVALENTE

El programa Digsilent PowerFactory cuenta con un módulo de simulaciones EMT para el estudio de transitorios electromagnéticos. Los inconvenientes que presenta este módulo, son la necesidad de contar con suficiente memoria para almacenar los resultados, y que para un sistema eléctrico muy grande los tiempos de cómputo son considerablemente mayores que con otros tipos de estudio debido a que cada paso de cálculo se encuentra en el orden de los milisegundos o microsegundos, además de la posibilidad de no convergencia del sistema debido a la gran cantidad de información que se debe procesar.

Estos inconvenientes se hacen notorios al momento de usar los pre-despachos diarios elaborados por CENACE que son la principal fuente de información sobre generación, cargas y operación del sistema, los cuales consideran todo el SNI de Ecuador, Colombia y Perú. De aquí la importancia de considerar una red equivalente que aisle el subsistema que será objeto de estudio, pero siempre tomando en cuenta la robustez, aportaciones y estabilidad que brinda el resto del sistema.

Para establecer una red equivalente se deben considerar tanto los flujos de potencia en estado estable, como cortocircuitos trifásicos y monofásicos en la barra donde se colocará dicho equivalente, como se muestra a continuación:

Flujo de potencia: Se simula un flujo de potencia en estado estable y se toman los valores del voltaje en por unidad y ángulo de la barra donde se colocará la red externa. Estos datos se ingresan en la pestaña “*Load Flow*” de la red externa. Además se debe configurar el nodo como barra Slack para que haga las veces de referencia del sistema.

Tabla 4.1. Potencias entrantes y salientes a ser reemplazadas en la barra

	P (MW)	Q (MVAR)
L1	41,38	15,7
L2	-40,86	2,85
L3	-40,01	3,84
TOTAL	-39,49	22,39

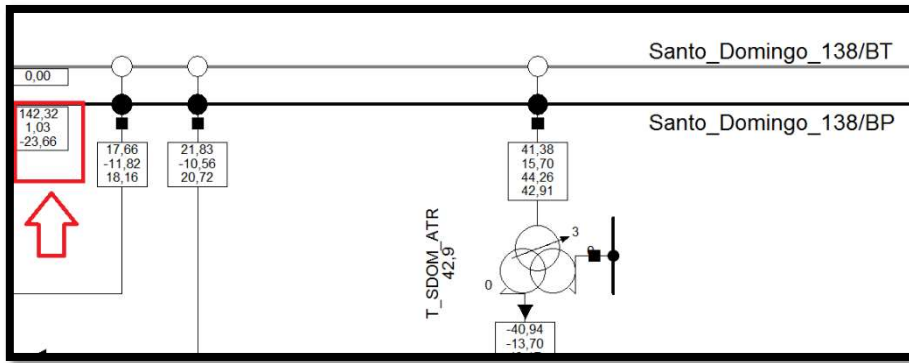


Figura 4.2. Flujo de potencia en estado estable en barra Santo Domingo 138 kV.

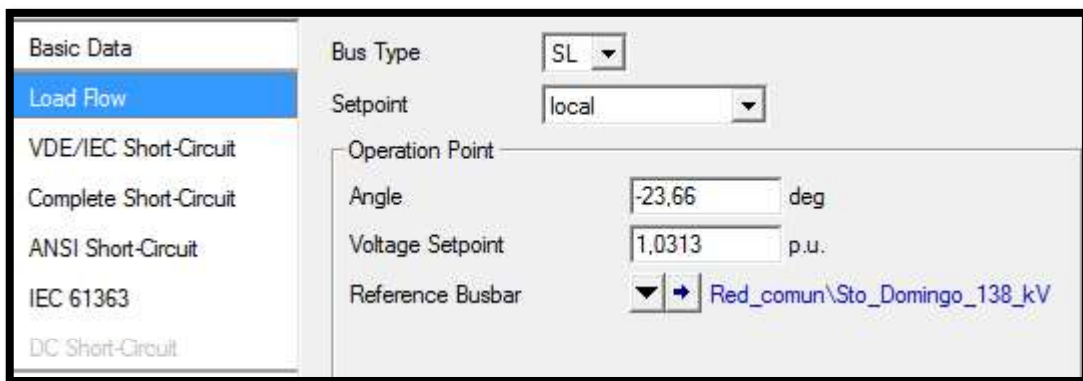


Figura 4.3. Pestaña de configuración "Load Flow" de la red equivalente

Cortocircuito Trifásico: Se deben considerar las Potencias y Corrientes de Cortocircuito que representan las aportaciones del resto del sistema en caso de producirse una perturbación, esto se obtiene simulando un corto circuito trifásico sobre la barra que conectará la red equivalente y sumando las aportaciones que entran por las líneas que no van a ser consideradas posteriormente. Estos datos se ingresan en cualquier pestaña que contenga especificaciones de "Short Corcuit". Se considerarán únicamente condiciones máximas, ya que las condiciones mínimas pueden ser establecidas con valores estimados o calculadas de la misma manera que para condiciones máximas.

Tabla 4.2. Potencias y Corrientes de Cortocircuito

	SKSS (MVA)	IKSS(KA)
L1	147,1028	0,6154
L2	894,2733	3,7414
L3	877,77	3,6723
TOTAL	1919,1461	8,0291

Max. Values			Min. Values		
Short-Circuit Power Sk ^{max}	1919,14	MVA	Short-Circuit Power Sk ^{min}	8000,	MVA
Short-Circuit Current Ik ^{max}	8,0291	kA	Short-Circuit Current Ik ^{min}	33,46958	kA
R/X Ratio (max.)	0,1		R/X Ratio (min.)	0,1	

Figura 4.4. Pestaña de configuración “Short Circuit” para cortocircuito trifásico

Corto circuito monofásico: Sobre la barra que se coloca la red equivalente se simula un corto circuito monofásico y se toman datos de impedancia, resistencia e inductancia para las secuencias positiva, negativa y cero. Previo a ingresar la información en la pestaña de “Short Circuit” se deben realizar calculos entre los valores obtenidos como se muestra a continuación:

Tabla 4.3. R, X y Z de un cortocircuito monofásico

R0	X0	Z0	R1	X1	Z1	Z2
0,4641	6,6872	6,7033	1,3153	9,9666	10,053	9,806

Tabla 4.4. Cálculos de radio de impedancia en un cortocircuito monofásico

Z2 / Z1	X0 / X1	R0 / X0
0,97543022	0,67096101	0,069401244

Impedance Ratio		Impedance Ratio	
Z2/Z1 max.	0,9754302	Z2/Z1 min.	1,
X0/X1 max.	0,670961	X0/X1 min.	1,
R0/X0 max.	0,06940124	R0/X0 min.	0,1

Figura 4.5. Pestaña de configuración “Short Circuit” para cortocircuito monofásico.

4.2.2 MODELAMIENTO DE LA CENTRAL TERMOELÉCTRICA ESMERALDAS II

En esta sección se presenta primero la información usada para elaborar los modelos de la Central Térmica Esmeraldas II, y luego los modelos estructurados y funcionales dentro del programa DigSilent Power Factory a partir de dicha información. Esta fue la única

información recabada a detalle, ya que para el resto de elementos incorporados en la red equivalente como: barras, líneas de transmisión, transformadores, compensadores, cargas, etc. la información fue tomada de la base datos de corto plazo del SNI.

4.2.2.1 Información básica de la central

La Central Termoeléctrica Esmeraldas se encuentra ubicada en el nor-occidente del Ecuador, en la provincia de Esmeraldas, y constituye la tercera central termoeléctrica más grande del país.

La central está compuesta por 12 motores de 8,35 [MW] y voltaje de 13,8 [kV] que se conectan al SNI a través de dos transformadores con una potencia nominal de 50 [MW] en caso de que no exista refrigeración o de 63 [MW] en caso de que sea refrigerado mediante aceite. La tensión en el lado de alta tensión es de 138 [kV].

4.2.2.2 Generador Sincrónico

Se trata de un generador con una potencia aparente nominal de 9,823 [MVA] y una tensión de 13,8 [kV]. Los valores de los parámetros de este modelo han sido definidos o calculados a partir de la información del ANEXO A. Aquellos valores requeridos por PowerFactory que no constan en dicha información, se mantienen en su valor por defecto.

Tabla 4.5. Datos del generador sincrónico C.T. Esmeraldas II en PowerFactory

Parámetro	Valor	Unidad
Potencia nominal	9,823	MVA
Tensión Nominal	13,8	kV
Factor de Potencia	0,85	-----
Conexión	YN	-----
xd	1,787	p.u.
xq	0,919	p.u.
x2	0,226	p.u.
r2	-----	p.u.
x0	0,135	p.u.
r0	-----	p.u.
Qmax	Curva	Mvar
Qmin	Curva	Mvar
Td0'	5,91	s
Td0''	0,02275	s
Tq0''	0,0774	s
xd'	0,344	p.u.
xd''	0,213	p.u.
xq''	0,24	p.u.

xls	-----	p.u.
rs	-----	p.u.
H	3,4	s

4.2.2.3 Marco Compuesto (Composite Frame)

Es una plantilla o estructura de conexionado, en el cual se definen las interfaces o vías de comunicación de las distintas señales, entre los slots que van a definirse dentro de un modelo compuesto, donde se muestran los sistemas de control y sus conexiones con el generador que controlan. Se utiliza el marco compuesto de librería que se muestra en la Figura 4.6 donde los números en color rojo indican los siguientes elementos:

- Regulador de tensión o AVR (AVR slot)
- Modelo maquina síncrona (sym slot)
- Regulador de velocidad o GOV (GOV slot)
- Estabilizador del sistema de potencia (PSS slot)

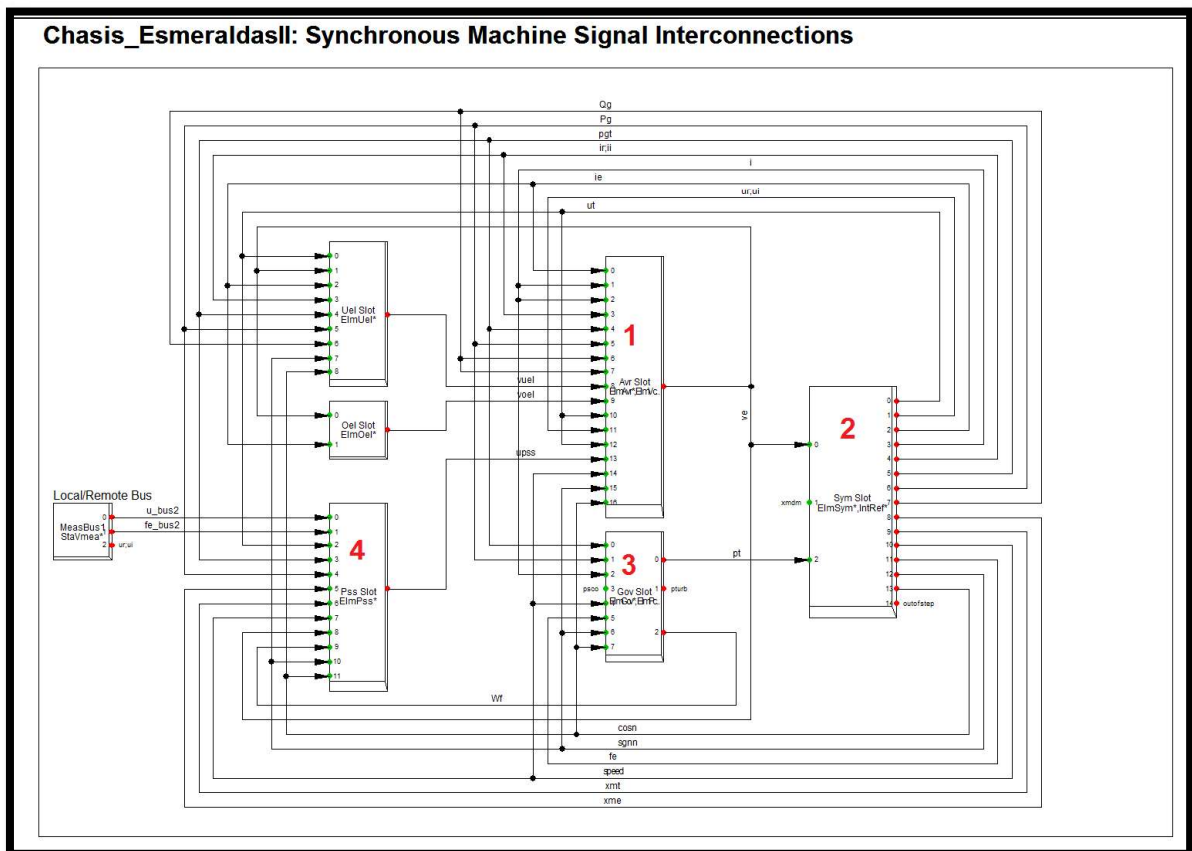


Figura 4.6. Marco compuesto para un generador de la central Térmica Esmeraldas II

Los elementos que no están numerados se refieren a elementos de medida o a controles que no han sido modelados por no estar presentes en esta central. Aunque aparezcan en este esquema no tienen ninguna repercusión sobre el comportamiento del modelo de la central.

4.2.2.4 Regulador de tensión (AVR)

El regulador de tensión de la Central Térmica de Esmeraldas II, es un regulador UNITROL del fabricante ABB y está formado por un único lazo de control de tensión de excitación, tanto su modelo como detalles de parámetros se presentan en el ANEXO B donde también se pueden apreciar las señales provenientes del PSS.

Respecto al sistema de excitación, esta central se alimenta a través de un transformador conectado a los terminales del propio generador y un puente rectificador controlado. En sistemas de excitación estáticos con estas características, las constantes de tiempo de la excitación son muy pequeñas por lo que no resulta necesario incluir un bloque que represente la estabilización de la excitación. [38]

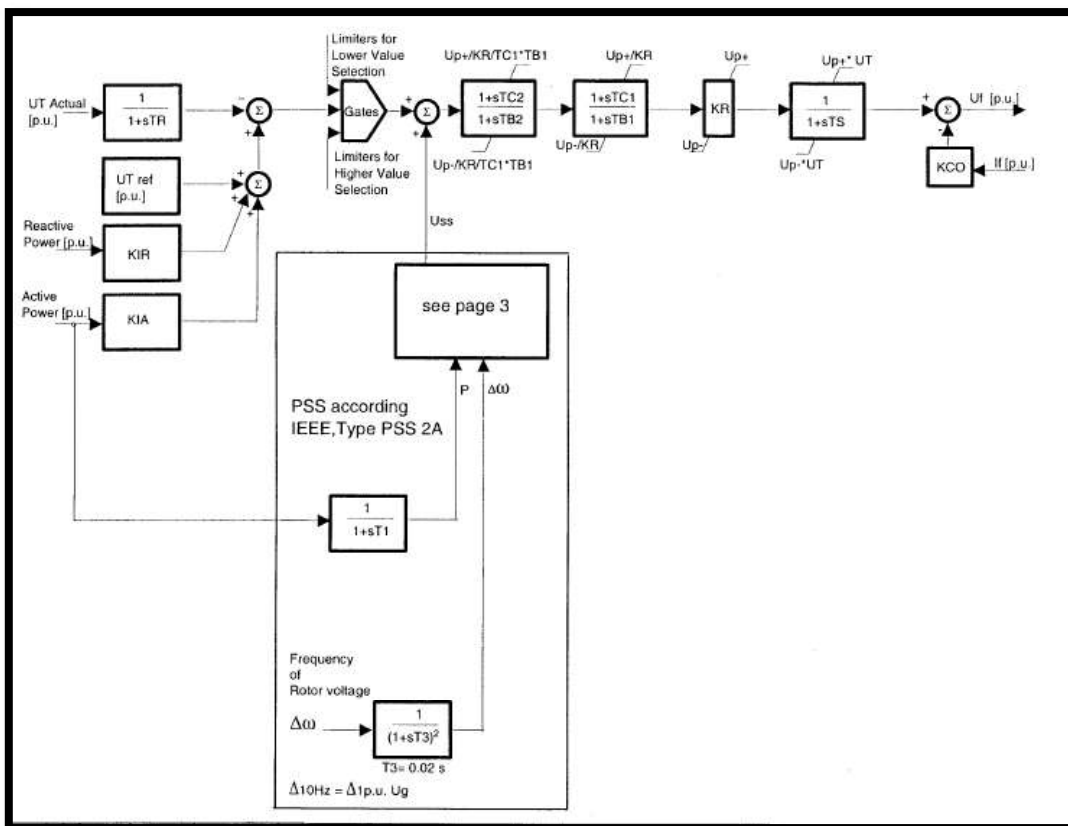


Figura 4.7. Esquema del Regulador de Tensión (AVR)

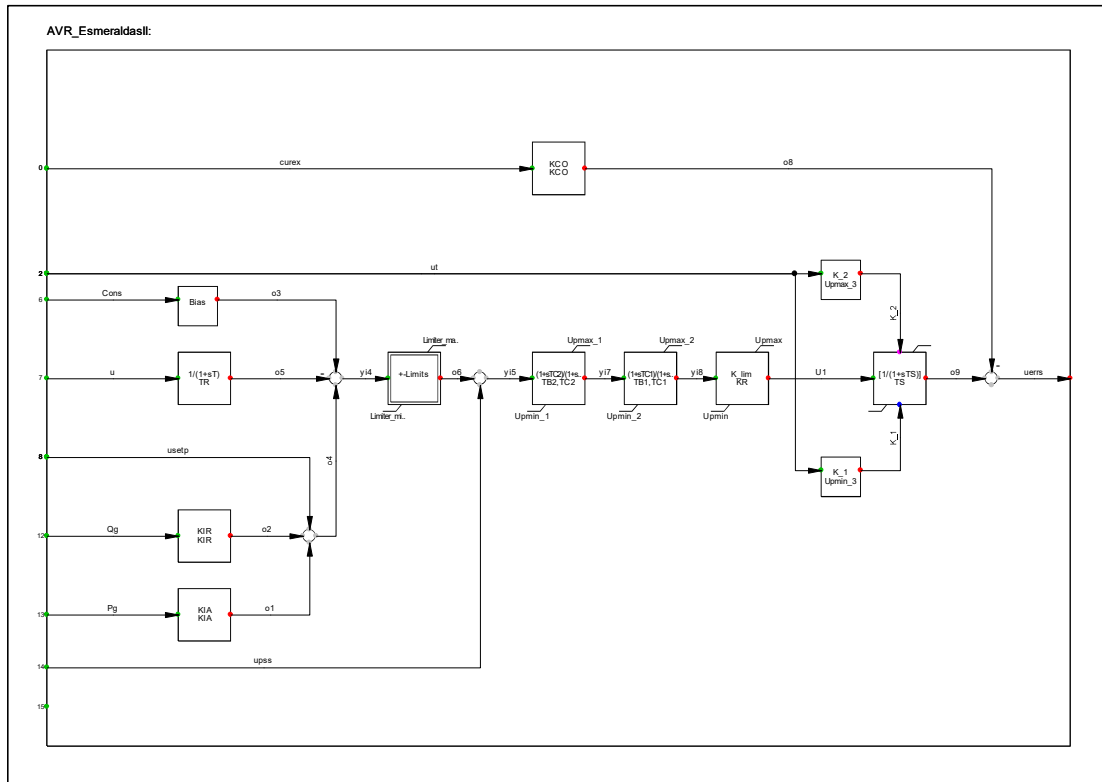


Figura 4.8. Modelo del regulador de tensión (AVR) en Power Factory

Tabla 4.6. Parámetros sugeridos por el fabricante para del AVR

Variable	Unidades	Valor	Descripción
TR	s	0,02	Constante de tiempo del filtro de la medida
TS	s	0,003	Constante del convertidor de potencia y unidad de disparo
KIR	p.u.	-0,2.....0,2	Influencia de la potencia reactiva
KIA	p.u.	-0,2.....0,2	Influencia de la potencia activa
KR	p.u.	10.....100	Ganancia estática del AVR
TC2	s	0,02.....2	Contante de tiempo del Lead-Lag 1
TB2	s	$(V_p/V_{hf}) \cdot TC2$	Contante de tiempo del Lead-Lag 2
TC1	s	0,01.....10	Contante de tiempo del Lead-Lag 3
TB1	s	$(KR/V_p) \cdot TC1$	Contante de tiempo del Lead-Lag 4
Vp	p.u.	1.....300	Ganancia proporcional del AVR
Up+	p.u.	----	Up/UFG
Up-	p.u.	----	$0,85 \cdot Up$
Up	V	----	Máxima tensión de excitación del sistema
UFG	V	----	Tensión de vacío del campo magnético del entrehierro
Ut	p.u.	----	Tensión en terminales del generador
Ut Ref	p.u.	0,9.....1,1	Tensión de referencia en terminales
KCO	p.u.	----	Caída de tensión debida a la conmutación de los tiristores

Tabla 4.7. Parámetros ingresados al AVR en Power Factory

Variable	Unidades	Valor	Descripción
TR	s	0,02	Constante de tiempo del filtro de la medida
TS	s	0,003	Constante del convertidor de potencia y de la unidad de disparo
KIR	p.u.	0	Influencia de la potencia reactiva
KIA	p.u.	0	Influencia de la potencia activa
KR	p.u.	10	Ganancia estática del AVR
TC2	s	0,02	Contante de tiempo del Lead-Lag 1
TB2	s	0,002	Contante de tiempo del Lead-Lag 2
TC1	s	0,1	Contante de tiempo del Lead-Lag 3
TB1	s	1	Contante de tiempo del Lead-Lag 4
Upmin	p.u.	0	Up-
Upmax	p.u.	2,5	Up+
Upmin_1	p.u.	0	Límite (Up-/KR/TC1*TB1)
Upmax_1	p.u.	2,5	Límite (Up+/KR/TC1*TB1)
Upmin_2	p.u.	0	Límite (Up-/KR)
Upmax_2	p.u.	0,25	Límite (Up+/KR)
Upmin_3	p.u.	0	Límite (Up-*Ut)
Upmax_3	p.u.	2,5	Límite (Up+*Ut)
Limiter_min	p.u.	0	Limitador del valor mínimo
Limiter_max	p.u.	2,5	Limitador del valor máximo

4.2.2.5 Estabilizador del Sistema de Potencia (PSS)

El esquema de control correspondiente al estabilizador de potencia o PSS según el ANEXO B es el de la Figura 4.8, donde la salida del PSS actúa como entrada del AVR como se muestra en el recuadro de la parte inferior de la Figura 4.7.

El modelo representado corresponde al modelo estándar IEEE de tipo PSS-2A tal y como aparece descrito en la parte superior de la Figura 4.9.

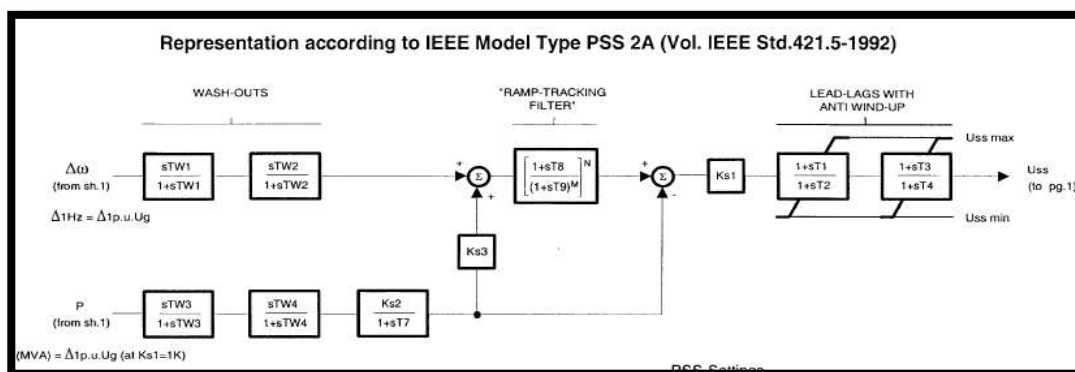


Figura 4.9. Esquema del Estabilizador de Potencia (PSS)

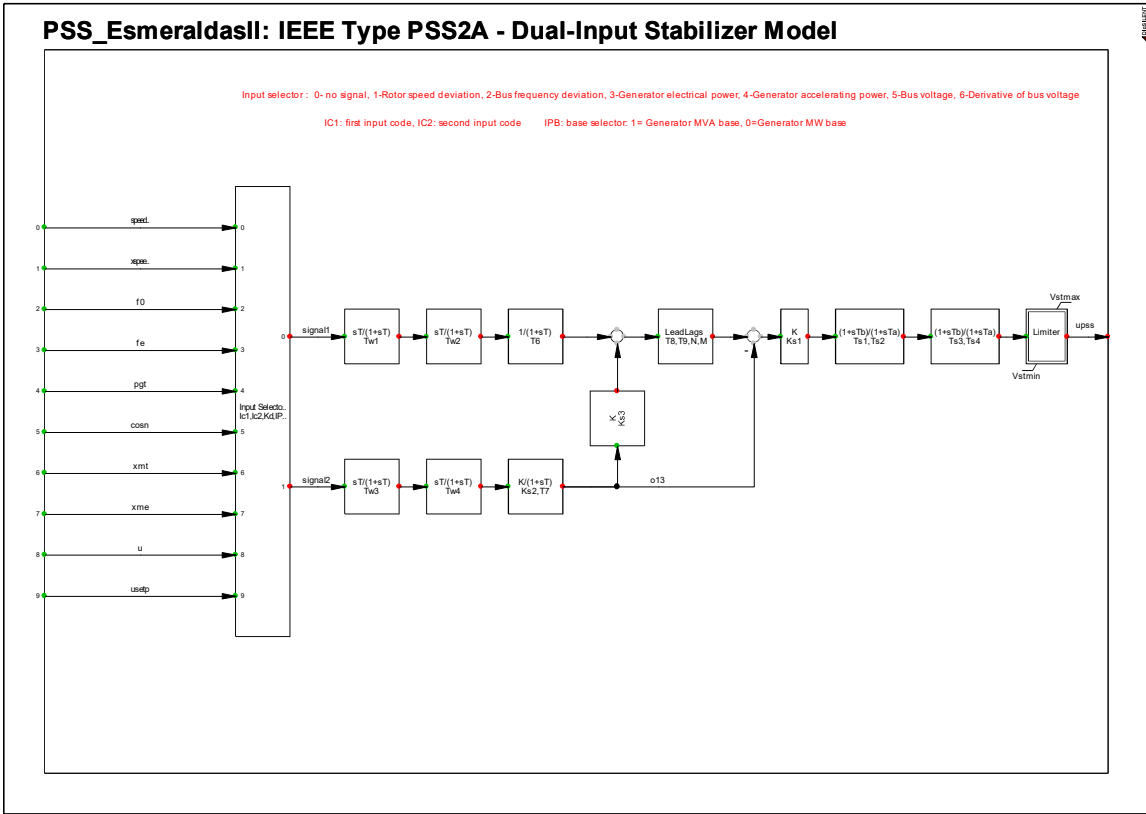


Figura 4.10. Modelo del estabilizador de potencia (PSS) en Power Factory

Tabla 4.8. Parámetros sugeridos por el fabricante para el PSS

Variable	Unidades	Valor	Descripción
	1/s	10.....1	Desviación de frecuencia
P	p.u.	2.....1	Potencia activa del generador
Uss	p.u.	+/-1	Variable correctora del PSS
Uss max	p.u.	0...0,006...1	Límite máxima de Corr.Var.PSS
Uss min	p.u.	0...0,006...1	Límite mínimo de Corr.Var.PSS
TW1, TW2	s	0...0,1...65	Filtro de la señal de frecuencia
TW3, TW4	s	0...0,1...65	Filtro de la señal de potencia
T1, T3	s	0...0,0002...12,8	Lead-Lag 1
T2, T4	s	0...0,00008...51,2	Lead-Lag 2
KS1, KS3	p.u.	0...0,0002...12,8	Ganancias
T7	s	0...0,1...65	Filtro de P
T8	s	0...0,0002...12,8	Filtro de la rampa de seguimiento 1
T9	s	0...0,00008...51,2	Filtro de la rampa de seguimiento 2
M	p.u.	2,5	Número entero del filtro de seguimiento 1
N	p.u.	1	Número entero del filtro de seguimiento 2

Tabla 4.9. Parámetros ingresados al PSS en Power Factory

Variable	Unidades	Valor	Descripción
Tw1	s	1,5	1er constante de tiempo washout
Tw2	s	1,5	2nd constante de tiempo washout
T6	s	0,015	1er constante de tiempo de la señal del transductor
Tw3	s	1,5	1er constante de tiempo del 2nd washout
Tw4	s	1,5	2nd constante de tiempo del 2nd washout
Ks2	p.u.	0,5	2nd factor de la señal del transductor
T7	s	1,5	2nd constante de tiempo de la señal del transductor
Ks3	p.u.	1,5	Factor de acoplamiento washout
Ks1	p.u.	3	Ganancia PSS
Ts1	s	0,18	1er constante de tiempo de filtro del derivador lead-lag
Ts2	s	0,02	1er constante de tiempo de retraso del derivador lead-lag
Ts3	s	2	2nd constante de tiempo de filtro del derivador lead-lag
Ts4	s	5	2nd constante de tiempo de retraso del derivador lead-lag
T8	s	0,4	Tiempo de filtro de la rampa de seguimiento
T9	s	0,1	Tiempo de retraso de la rampa de seguimiento
N	----	1	Exponente 1 para el bloque de seguimiento
M	----	4	Exponente 2 para el bloque de seguimiento
Ic1	----	1	1er Selector
Ic2	----	3	2nd Selector
Kd	p.u.	0,01	Factor del derivador
IPB	----	1	Base del PSS
Vstmin	p.u.	-0,05	Mínima salida del controlador
Vstmax	p.u.	0,05	Máxima salida del controlador

4.2.2.6 Regulador de Velocidad (GOV)

En el caso del regulador de velocidad no se pudo contar con la información suficiente para armar este sistema de control en base a datos exactos, ya que los diagramas de bloques solo pueden ser proporcionados por los fabricantes del producto. En su lugar, revisando los manuales de operación de las tarjetas de la marca WOODWARD y comparando los sistemas de control con centrales de generación que cuentan con equipos semejantes a la central Esmeraldas II como la de la central Jaramijó, se logró determinar que el modelo que más se aproxima al control de velocidad de la central es el modelo estándar de librería DEGOV1, que es el recomendado para Governor con motor diésel, donde la realimentación del control droop puede realizarse desde la válvula o desde la potencia eléctrica generada. Este modelo se basa en un Governor Woodward que consiste en un sensor de velocidad eléctrica, un actuador hidromecánico y el motor diésel.

De los manuales de operación de las tarjetas se conoce que el regulador de velocidad puede operar tanto en modo isócrona como en modo denominado “droop load”.

Modo isócrona: el regulador de velocidad mantiene la velocidad y por lo tanto la frecuencia, independientemente de la carga que es suministrada. Este modo se usa en modo isla.

Modo “droop operation”: el regulador de velocidad emplea este modo en caso de que el generador opere conectado a red.

A continuación, se muestra el esquema completo de la marca Woodward, modelo 2301D-ST, en el que se indica mediante literales algunos de los bloques principales:

- Bloque A: Representa el bloque de control que actúa dependiendo del error de velocidad, de la potencia de referencia y la realimentación del droop.
- Bloque B: Calcula la velocidad de referencia
- Bloque C: Bloque que representa el actuador

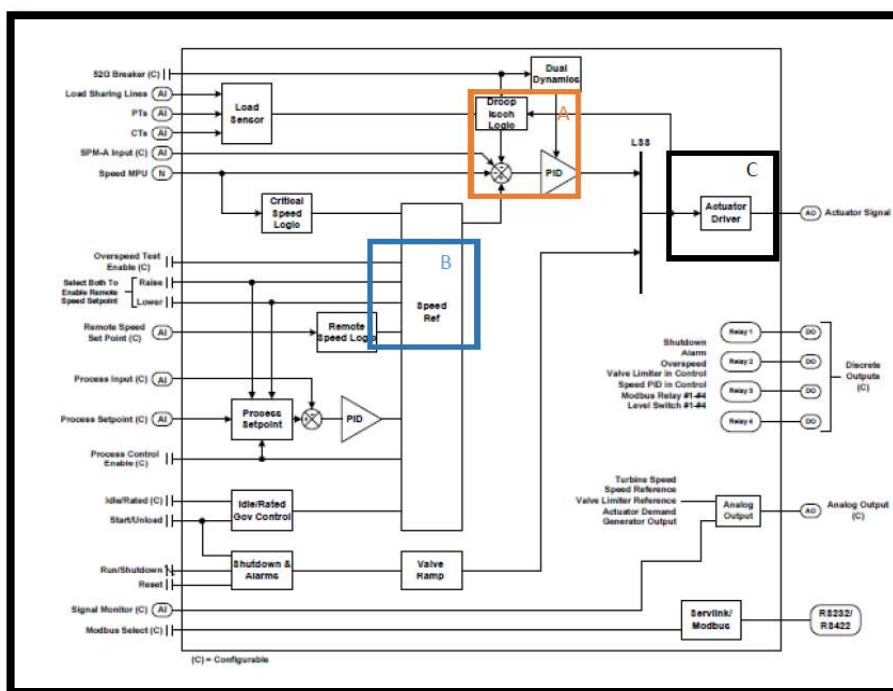


Figura 4.11. Esquema completo del control de velocidad Woodward 2301D-ST [39]

El modelo escogido DEGOV1, está basado en un Woodward Governor, que consiste en un sensor eléctrico de velocidad (bloque 1), un actuador hidromecánico (bloque 2) y un motor diésel (bloque 3) como se muestra en la Figura 4.12.

- Bloque 1: Actúa en función del error de velocidad, la consigna de potencia y la realimentación droop. Psetp representa los cambios en la consigna de potencia, wref la consigna de velocidad y w la velocidad medida. El bloque que aparece en la parte inferior del bloque 1 representa la realimentación droop que puede proceder de la válvula o de la potencia eléctrica generada, que es la opción seleccionada en este caso.
- Bloque 2: Representa el actuador hidromecánico.
- Bloque 3: Representa el motor diésel mediante un retraso con la constante de tiempo TD.

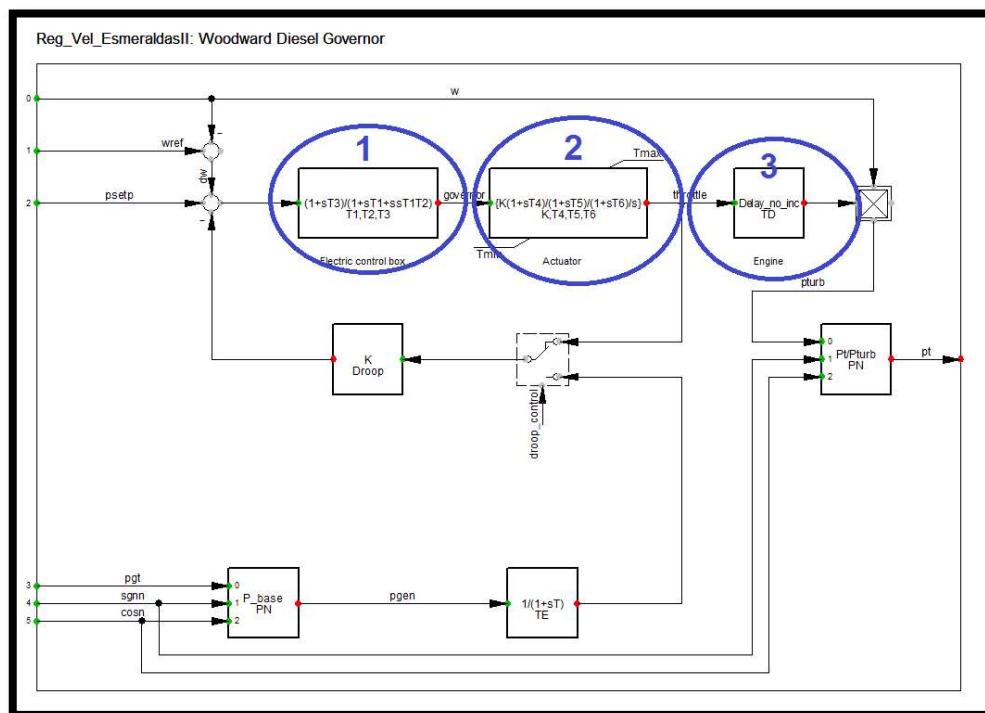


Figura 4.12. Esquema completo del regulador de velocidad DEGOV1

Al no contar con suficiente información del modelo de regulador de velocidad implementado en la central Esmeraldas II o con los detalles que proporciona el fabricante, los valores de parámetros, constantes y los rangos en que estos deben encontrarse serán tomados de valores típicos usados en modelos estándar de este tipo como se muestra en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10. Parámetros ingresados al GOV en Power Factory

Variable	Unidades	Valor	Descripción
K	p.u./p.u.	15	Ganancia del actuador
T4	s	1	Constante de tiempo del derivador del actuador
T5	s	0,1	Primera constante de tiempo del actuador
T6	s	0,2	Segunda constante de tiempo del actuador
TD	s	0,01	Retraso de la combustión
Droop	p.u.	0,05	Ganancia del bucle de realimentación
TE	s	0,1	Constante de tiempo del bucle del potencia
T1	s	0,2	Primera constante de tiempo del control
T2	s	0,1	Segunda constante de tiempo del control
T3	s	0,5	Constante de tiempo derivativa del control
Droop_control	-----	0	Modo de control de potencia
PN	-----	0	Selección de la potencia nominal
Tmin	s	0	Mínima apertura de la válvula de estrangulamiento
Tmax	s	1,1	Máxima apertura de la válvula de estrangulamiento

4.3 TRATAMIENTO DE DATOS DE CAMPO

Esta sección explica de manera simple y breve de donde se obtiene la información de perturbaciones que fueron registradas en el SEP, así como los formatos y tipos de archivos en los que viene dicha información.

Posteriormente, se muestra el uso de algunos programas computacionales que hacen posible transformar los datos numéricos de los archivos en gráficas en función del tiempo. Finalmente estos datos son exportados y ajustados previo a su uso dentro del programa PowerFactory donde serán comparados con los resultados de las simulaciones.

4.3.1 PROCEDENCIA Y FORMATO DE DATOS [40], [41]

Los sistemas de potencia tienen previsto la salida inesperada de algunos de sus elementos en cualquier momento debido a una falla o perturbación que alteraría su operación normal. Con el objetivo de tratar de obtener la mayor información de los eventos la mayoría de subestaciones cuentan con Registradores Automáticos de Perturbaciones (RAP) que sirven para protocolizar eventos de falla en un SEP.

El RAP funciona de tal manera que ante alguna perturbación o falla donde se produce un cambio abrupto en las magnitudes de las variables del sistema, arranca un registro de las señales en todas las bahías asociadas con el registrador. Los tiempos de pre-falla deben ser de al menos 150 milisegundos para mostrar las condiciones previas a la perturbación

o falla. Y los tiempos de post-falla deben evitar tiempos de almacenamiento grandes con información no relevante.



Figura 4.13. Tiempos de pre-falla y post-falla [40]

Los RAP's almacenan sus datos medidos e información que se considera relevante utilizando el formato estándar de la IEEE denominado COMTRADE (Standard Common Format for Transient Data Exchange for Power Systems). Este formato se viene implementando desde el año 1991 y ha sufrido algunas actualizaciones, las más importantes en los años 1999 y 2013. Este formato es utilizado y reconocido por una gran cantidad de programas computacionales y se utiliza principalmente para el almacenamiento y manejo de datos transitorios obtenidos desde equipos de medición, control o protección, facilitando la reconstrucción de la secuencia de eventos durante grandes perturbaciones.

Cada archivo COMTRADE contiene 4 archivos que almacenan diferentes tipos de información sobre el evento registrado. Estos tipos de archivo se distinguen por sus extensiones que son: Header, Configuration, Data e Information.

4.3.1.1 Archivo Header (XXXXXXXX.HDR)

El archivo Header es un archivo de texto ASCII, se considera opcional ya que entrega información de las condiciones del registro del evento para su mejor entendimiento. Este archivo puede incluir cualquier tipo de información que haya sido considerada importante por parte de quien la creó. Se presenta como archivo únicamente de lectura y no tiene el fin de poder ser manipulado.

4.3.1.2 Archivo Configuration (XXXXXXXX.CFG)

Este archivo es de tipo ASCII y contiene la información para entender las oscilografías como: el número de canales tanto análogos como digitales que posee el registro, el nombre

de estos canales, los valores de los factores de transformación (a y b) producto de una conversión A/D, las etiquetas correspondientes al nombre de la subestación y las etiquetas de las bahías que posea este registro, la frecuencia de muestreo y el número total de muestras.

4.3.1.3 Archivo Data (XXXXXXXX.DAT)

El archivo de datos contiene la información o los datos correspondientes a la conversión analógica/digital, además del valor de cada muestra del registro de todos los canales de entrada. El número almacenado para cada muestra es un valor a escala dado por el equipo que registra la forma de onda de entrada. Los datos almacenados pueden ser de base cero con números positivos y negativos es decir valores entre (-2000 a 2000), o todos los números positivos con valores entre (0 y 4000) donde 2000 representa el cero. Los factores de conversión especificados en el archivo Configuration definen como convertir los valores de los datos en unidades aplicadas a ingeniería.

El archivo de datos también contiene una secuencia de números y una categorización de tiempo para cada grupo de muestras.

Además de los datos de las señales de entrada analógicas, también se guardan las entradas /canales digitales ON/OFF, sub-canales digitales, eventos de entrada, entradas lógicas, entradas binarias, entradas de contactos, o estado de las entradas. Estas entradas son representadas por un "1" o "0".

4.3.1.4 Archivo Information (XXXXXXXX.INF)

El archivo Information es un archivo opcional que contiene información extra además de la mínima información necesaria para la manipulación de los datos. Este archivo puede contener información pública para cualquier usuario o a su vez información confidencial que solo puede ser abierta por un usuario específico.

4.3.2 LECTURA Y EXPORTACIÓN DE ARCHIVOS COMTRADE

Existe una gran variedad de programas computacionales que permiten trabajar con archivos tipo COMTRADE. Las principales características que se busca en este tipo de programas son que se puedan adquirir de manera libre en caso de no poder comprar licencias originales y que sus funciones sean interactivas y útiles.

Bajo estas premisas, el programa a usarse es The Output Processor (TOP), un programa que lee datos de una variedad de fuentes y los transforma en gráficos de alta calidad y aspecto consistente para incluirlos en informes y documentos. El programa ha sido diseñado para visualizar datos de una variedad de herramientas de simulación y medición.

Los formatos de datos actualmente admitidos incluyen: ASCII Text, COMTRADE, PQDIF, entre muchos otros.

El uso del programa es relativamente fácil, didáctico y muy intuitivo. Para poder visualizar un archivo únicamente hay que abrirlo desde el programa y seleccionar todas las variables que se desean graficar, las leyendas, rótulos e información se agregan por defecto en el gráfico emergente, aunque pueden configurarse desde su barra de herramientas.

Se presenta un ejemplo de la S/E Quininde, bahía Esmeraldas, donde se observan los valores de voltaje en cada una de sus fases con sus respectivas medidas y unidades.

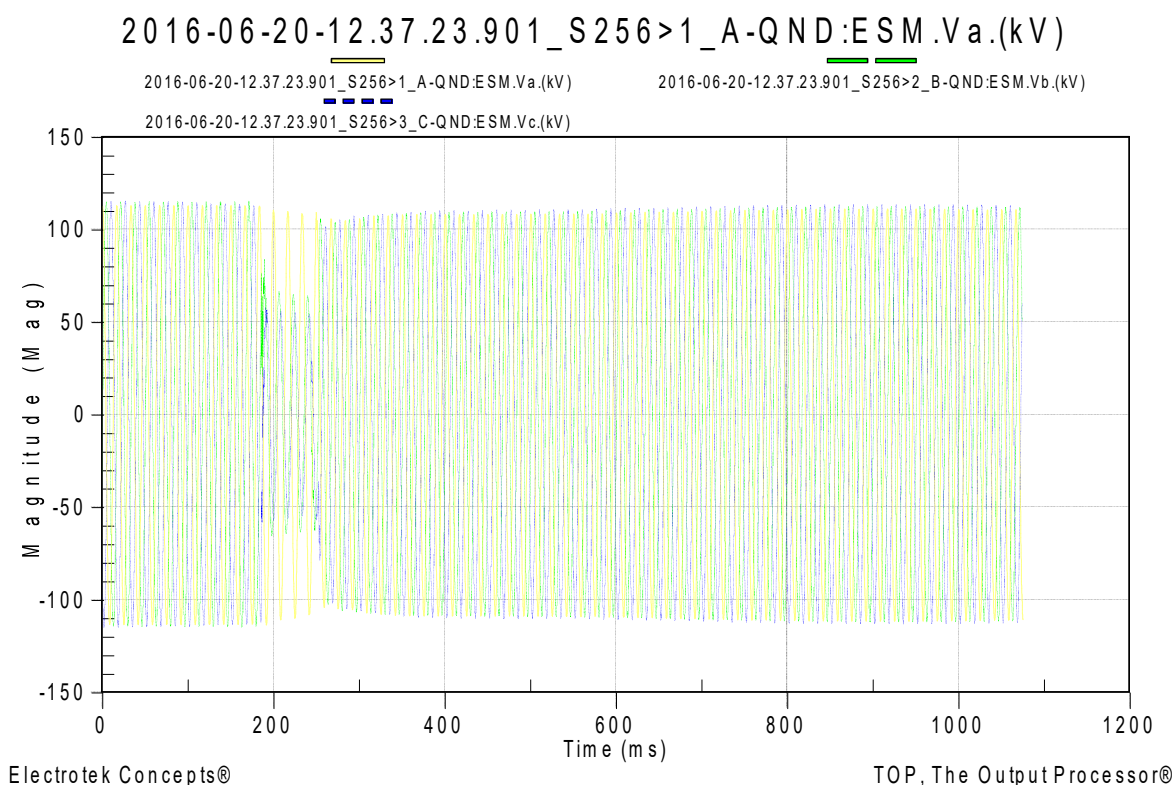


Figura 4.14. Voltajes de archivos COMTRADE graficados en el programa TOP.

Una vez abierto el archivo en el programa, es posible analizar en conjunto o por separado las variables que ahora son visibles en gráficos y que pueden ser manipuladas, escaladas

y examinadas con mayor facilidad. TOP brinda muchas ayudas de ajustes visuales para el área gráfica y también para exportar los gráficos como imágenes o texto.

Los inconvenientes aparecen el momento de manipular los datos con los que se elaboran las gráficas. TOP permite únicamente realizar funciones básicas como sumas, restas, multiplicaciones entre valores de gráficas semejantes. Es por eso que brinda la opción de poder exportar los datos extraídos de los archivos COMTRADE a un formato diferente que puede ser elegido por el usuario según su necesidad e incluyendo únicamente las variables que considere útiles. Para esto, TOP proporciona dos tipos de exportación:

Al portapapeles: Esta es la forma estándar de transferir datos entre dos aplicaciones de Windows. Después de colocar los datos en el portapapeles de TOP, puede cambiar a la aplicación de destino y recuperar los datos con el comando pegar.

A un archivo: Este método se usa para transferir datos a una aplicación que puede o no ser de Windows. Puede exportar a uno de varios formatos de archivo estándar.

Los datos que se visualizan en una ventana se pueden exportar a una variedad de otros formatos de archivo que incluyen:

- Portable Network Graphics (.PNG)
- Windows Metafile (.WMF)
- ASCII Tabbed Text (.TXT)
- Comma Separated Values (.CSV)
- IEEE COMTRADE (.CFG)
- Power Quality Data Interchange Format (.PQD)

Para el presente trabajo, este proceso es de vital importancia, ya que permite obtener la información de cada punto de muestreo como el tiempo en que fue tomado y la magnitud de los voltajes de cada una de las fases de la L/T. Estos valores son exportados a archivos .txt para luego ser usados en hojas Excel que permitirán su importación al programa MATLAB que permitirá interpolarlos y escalarlos para que tengan concordancia con los resultados de las simulaciones de Power Factory donde serán usados para el proceso de optimización como se explica en las secciones siguientes.

4.3.3 AJUSTE E INTERPOLACIÓN DE DATOS

El objetivo de este paso es extraer de los datos exportados de archivos COMTRADE únicamente la información que será útil al momento de comparar con los resultados de las simulaciones de Digsilent PowerFactory.

Este proceso se lo realiza en el programa MATLAB, ya que, permite manejar grandes cantidades de datos, usar funciones matemáticas ya definidas, programar y manipular gráficos, además que cuenta con herramientas visuales avanzadas y ayudas de todas sus funciones.

Este procedimiento consta básicamente de dos pasos que se detallan en las siguientes subsecciones.

- Ajuste del rango de datos iniciales.
- Interpolación de datos.

4.3.3.1 Ajuste del Rango de Datos Iniciales

Como ya se explicó en la sección 4.3.1 los RAP's registran los datos de las perturbaciones tomando en cuenta tiempos de pre-falla y post-falla.

El fin de disminuir el rango de la información inicial es lograr que se considere solamente la información útil, lo que significa menos tiempo de simulación y menos datos resultantes a ser analizados. Esto para el proceso iterativo posterior resulta en ahorro de tiempo considerables.

Como se puede observar en las Figuras 4.15 y 4.16, los ciclos de pre-falla A y C no coinciden en número y tampoco en el punto de inicio al tiempo 0, por lo que no se podrían comparar punto a punto sus valores en estado estable. Lo mismo ocurre para los ciclos de post-falla B y D donde se compara la respuesta del sistema luego de la perturbación.

El proceso que se realiza en MATLAB consiste en sobreponer las dos curvas a fin de obtener el rango de valores medidos que coinciden con el inicio y fin de los datos simulados. Este proceso puede ser realizado con alguna herramienta de cálculo o simplemente con prueba y error usando los gráficos hasta conseguir el mejor ajuste.

Los resultados en MATLAB sobrepuestos y comparados de las Figuras 4.15 y 4.16 se presentan en el Figura 4.17 donde ya se puede ver el rango de datos medidos que debe ser usado.

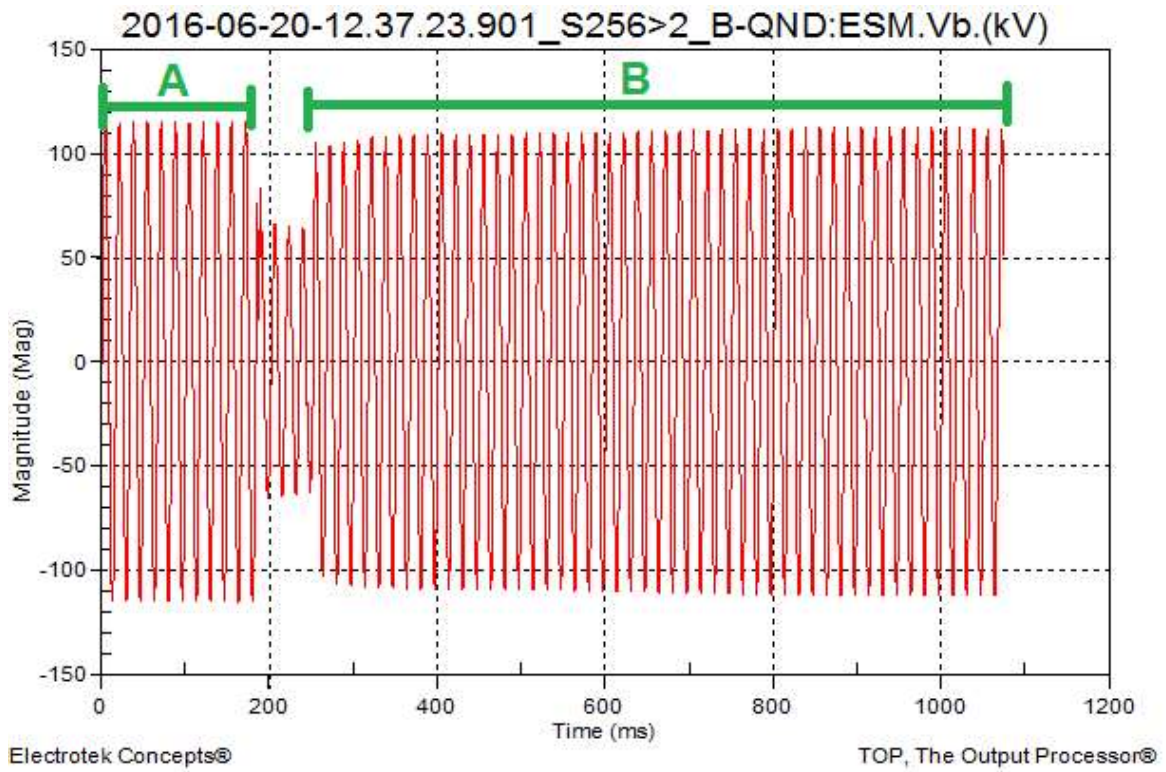


Figura 4.15. Fase “b” en TOP de datos medidos.

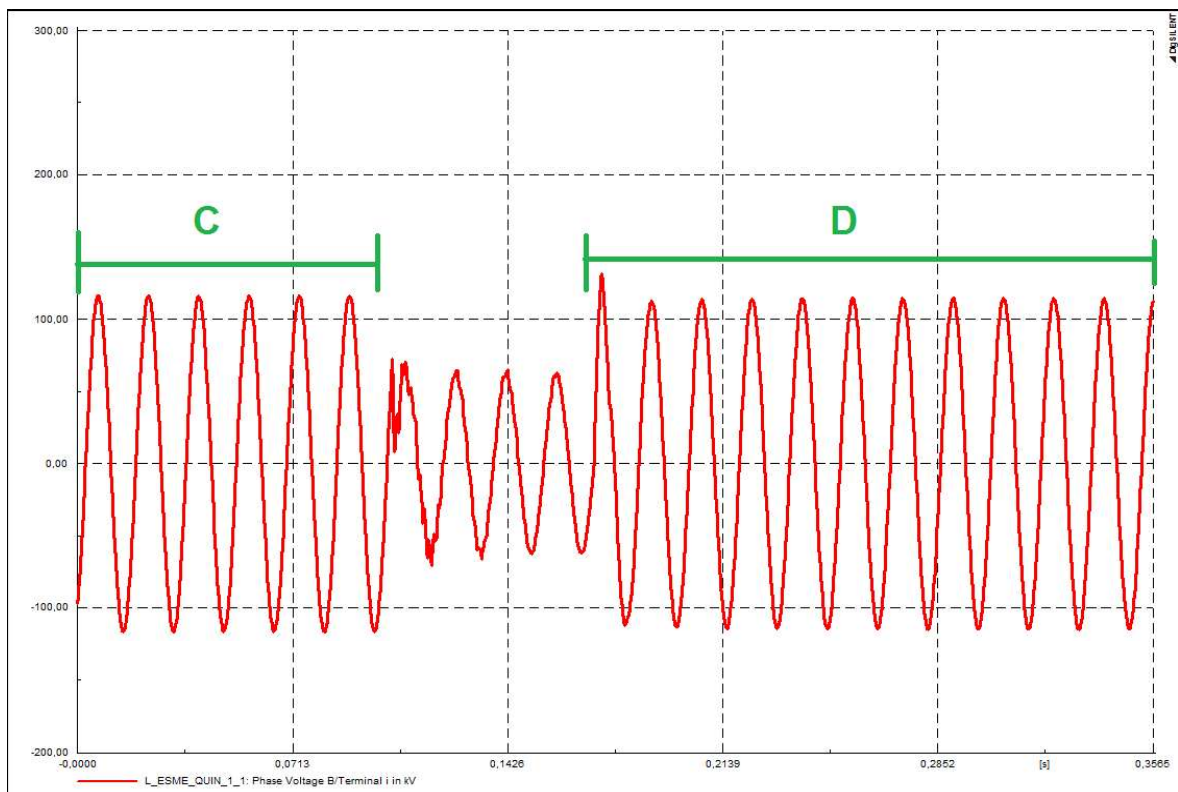


Figura 4.16. Fase “b” en Power Factory de datos simulados.

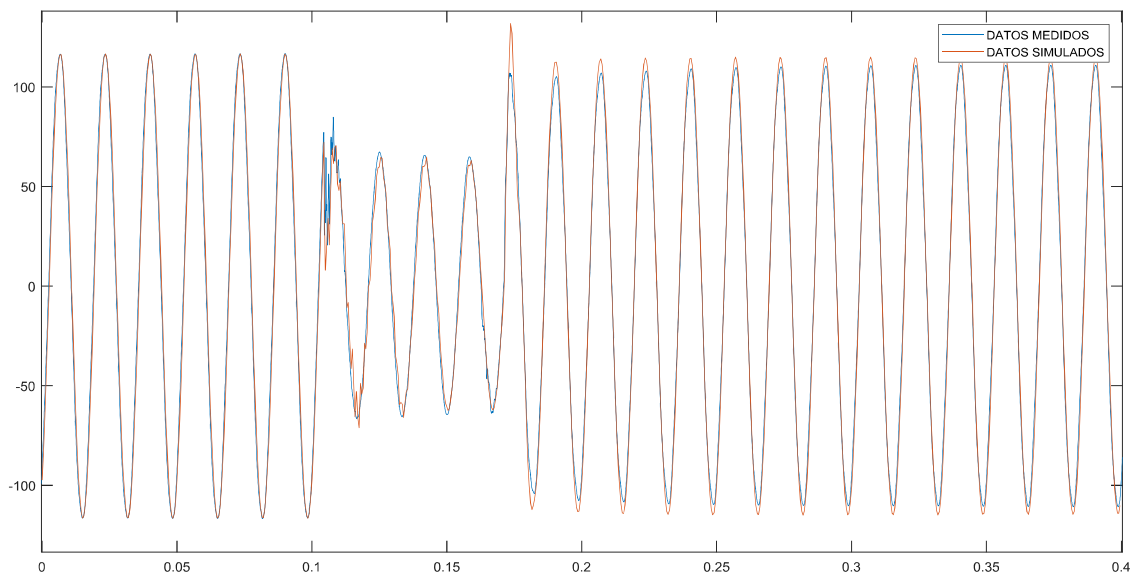


Figura 4.17. Datos medidos y simulados de la Fase “b” en MATLAB.

4.3.3.2 Interpolación de Datos

Luego de haber extraído el rango adecuado de los datos medidos que ya es semejante con el rango de datos simulados, se presenta el problema de la diferencia de cantidad de datos que contienen esos rangos y el tiempo de muestreo de cada dato como se muestra en la figura 4.18 donde los símbolos “o” representan cada punto que fue usado para construir la gráfica.

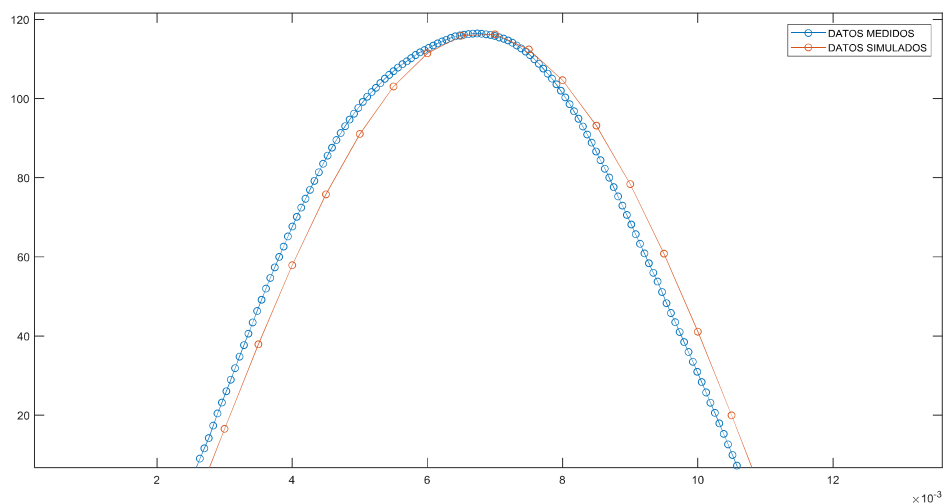


Figura 4.18. Diferencia de tasa de muestreo entre datos medidos y simulados

Este problema debe resolverse previo a realizar cualquier comparación punto a punto de datos, ya que, no tiene mucho sentido comparar un punto que fue tomado en el pico de

una onda con el que fue tomado en su cruce por cero, los valores serían totalmente distintos e incomparables.

Como se muestra en las Tablas 4.10 y 4.11 los tiempos de muestreo son diferentes, por lo que sería difícil hacer una comparación directa entre las mismas. El tiempo de muestreo de los datos medidos es invariante y viene dado por la configuración del equipo que los tomó, mientras que los datos simulados tienen una tasa de muestreo que es definida por el usuario y tiene factores de adaptación y control de integración que hacen que estos pasos puedan cambiar y ajustarse ante eventos que se pudieran producir.

Tabla 4.10. Taza de muestreo de Datos Medidos

Tiempo [s]	Magnitud [kV]	Muestreo [s]
6,51E-05	-40,5692596	6,51042E-05
0,0001302	-38,0842247	6,51042E-05
0,0001953	-35,5907364	6,51042E-05
0,0002604	-33,1310616	6,51042E-05
0,0003255	-30,8235283	6,51042E-05
0,0003906	-28,2370625	6,51042E-05
0,0004557	-25,3378544	6,51042E-05
0,0005208	-22,7260323	6,51042E-05
0,0005859	-20,2832603	6,51042E-05
0,000651	-17,7728672	6,51042E-05

Tabla 4.11. Taza de muestreo de Datos Simulados

Tiempo [s]	Magnitud [kV]	Muestreo [s]
0	-97,356767	0,0005
0,0005	-83,641844	0,0005
0,001	-66,959564	0,0005
0,0015	-47,891659	0,0005
0,002	-27,129848	0,0005
0,0025	-5,401718	0,0005
0,003	16,538789	0,0005
0,0035	37,881786	0,0005
0,004	57,858576	0,0005
0,0045	75,793052	0,0005

Las primeras soluciones que podrían imaginarse ante este problema serían: ajustar los pasos de simulación para que coincidan con el muestreo de los datos medidos; o, tomar de los datos medidos los valores más cercanos de cada paso de simulación. Ninguna de

estas soluciones serían factibles ya que en el primer caso como ya se mencionó en secciones anteriores, pasos muy pequeños involucran el manejo de una mayor cantidad de datos e información por lo que el sistema tardaría mucho tiempo en simular esas condiciones o no convergería a tal escala; para el segundo caso los valores serían aproximados pero no exactos y en algunos casos habría más de una medida que esté cerca del valor buscado, lo que implicaría tomar una decisión de cuál es el correcto y complicaría el proceso para volverlo automático.

Por lo expuesto anteriormente se toma la decisión de usar la herramienta MATLAB que permite además de hacer un proceso automático, encontrar los valores en los puntos de tiempos exactos. Es decir, usando los tiempos en que se calculó cada paso de la simulación, se encontrará su semejante para el mismo tiempo en la gráfica de valores medidos.

MATLAB utiliza una serie de comandos para interpolar, el más usado es el comando "*interp1*" que se emplea para interpolar una serie de datos. El formato de este comando es:

$$y_i = \text{interp1}(x, y, x_i, \text{método})$$

Donde:

x : abscisa de los puntos a interpolar, expresada como vector fila.

y : ordenada de los puntos a interpolar, expresada como vector fila.

xi : abscisas para construir la función de interpolación, expresada como vector fila. Si es un solo valor, calculará el valor interpolando con la función declarada en métodos.

Método: determina el método de interpolación, entre:

- Nearest: interpolación asignado el valor del vecino más cercano.
- Linear: interpolación lineal (default)
- Spline: interpolación con spline cúbica
- Pchip: interpolación con polinomios de Hermite
- Cubic: (igual que 'pchip')
- v5cubic: interpolación Cúbica usada in MATLAB 5

Los resultados de este proceso se muestran en la figura 4.19 donde se comprueba la obtención de puntos para los mismos tiempos y en la misma posición de la onda en cada caso.

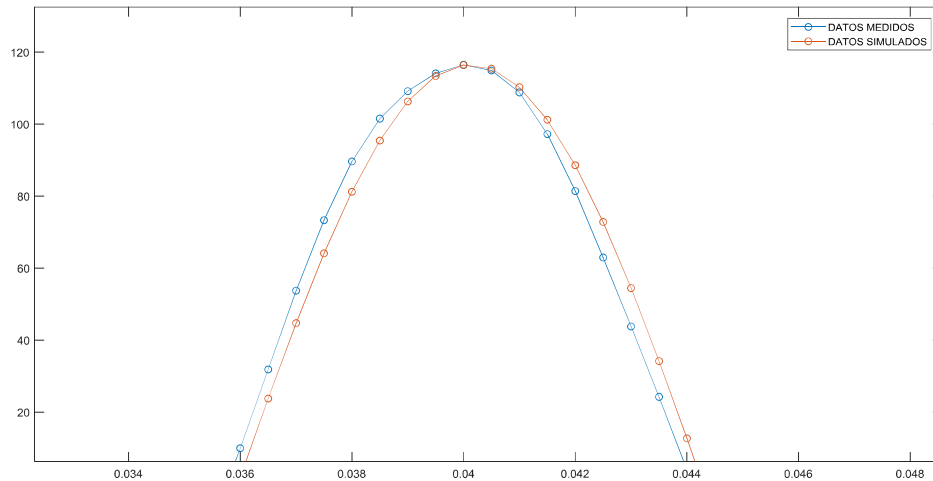


Figura 4.19. Taza de muestreo entre datos interpolados medidos y simulados

4.4 APLICACIÓN DEL ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN

4.4.1 USOS DEL ENJAMPRE DE PARTÍCULAS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS

Los algoritmos de optimización son frecuentemente usados en la ingeniería eléctrica debido a su fácil aplicación y a que no se enfocan en la modelación o dificultad del problema sino en usar sus variables para encontrar una solución a su función objetivo.

En el caso del PSO, es usado normalmente en problemas como:

- **Control de Voltaje y Potencia Reactiva:** Para minimizar las pérdidas del sistema.
- **Despacho Económico:** Para disminuir los costos de operación.
- **Confiability y Seguridad de un SEP:** Para hallar las posibles contingencias que dejarían inoperante al sistema y evitarlas.

- **Problemas de Expansión de Generación:** Que consisten en determinar qué, cuándo, dónde y cómo instalar unidades de nueva generación para cumplir con los requisitos del SEP.
- **Estimaciones de Estado:** Que consiste en encontrar el estado del sistema considerando la generación distribuida.
- **Flujos Óptimos de Potencia:** Para encontrar las magnitudes y ángulos de voltaje que minimizan la diferencia entre la potencia de entrada y la de salida en cada barra.
- **Identificación y control de SEP's:** Para obtener y mantener condiciones de estabilidad en cualquier sistema de energía grande, incluso en presencia de perturbaciones, tomando en cuenta la complejidad de la red y la creciente incorporación de dispositivos de conmutación no lineal.

Dentro de este último se encuentra la sintonización de sistemas de control donde cada partícula se define normalmente como un posible conjunto de ganancias proporcionales, derivadas, integrales o constantes de tiempo de las funciones matemáticas que se están usando para representar el sistema.

4.4.2 ALGORITMO PSO EN DIGSILENT POWERFACTORY

El algoritmo es implementado en lenguaje DPL de DigSilent con el propósito de minimizar la función objetivo que representa la diferencia entre valores medidos y valores simulados cambiando los parámetros de los modelos de AVR's a fin de sintonizarlos con el comportamiento real de estos equipos.

Se consideran únicamente los AVR's debido a que los datos con los que se cuenta solo permiten analizar el comportamiento post-falla del sistema de control por menos de un segundo después de la perturbación. Esto impide que el resto de sistemas de control cuenten con el suficiente tiempo para responder, por lo que para estos sistemas de control se deberá considerar realizar otra sintonización con datos que no sean del tipo EMT sino RMS en donde sí se pueda apreciar su operación. El proceso iterativo bajo esta lógica se presenta en la Figura 4.20.

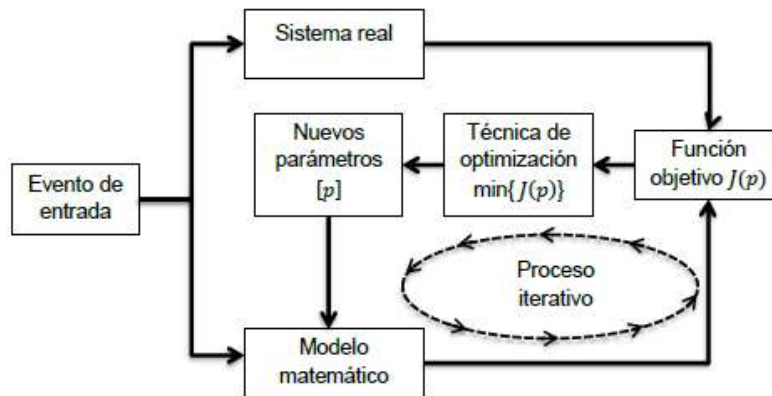


Figura 4.20. Proceso de Sintonización de Parámetros con PSO [28].

La función objetivo del algoritmo puede representarse como:

$$\min f(x_1, x_2, x_3 \dots x_n) = \sum_1^n \frac{(V_s - V_m)^2}{n} \quad (4.1)$$

Donde:

$x_1, x_2, x_3 \dots x_n$: Parámetros del sistema que van a ser cambiados iterativamente.

V_s : Valores simulados

V_m : Valores medidos

n: Número de valores totales a ser comparados

Una vez elaborado el script se deben crear variables propias del algoritmo como valores, constantes y ganancias que puedan ser cambiados para cada ejecución del programa sin la necesidad de ingresar a cambiar la programación principal, ya que estas variables externas se leen dentro del programa con el valor que se les asigne.

La Figura 4.21 muestra las opciones básicas que se relacionan a cada DPL.

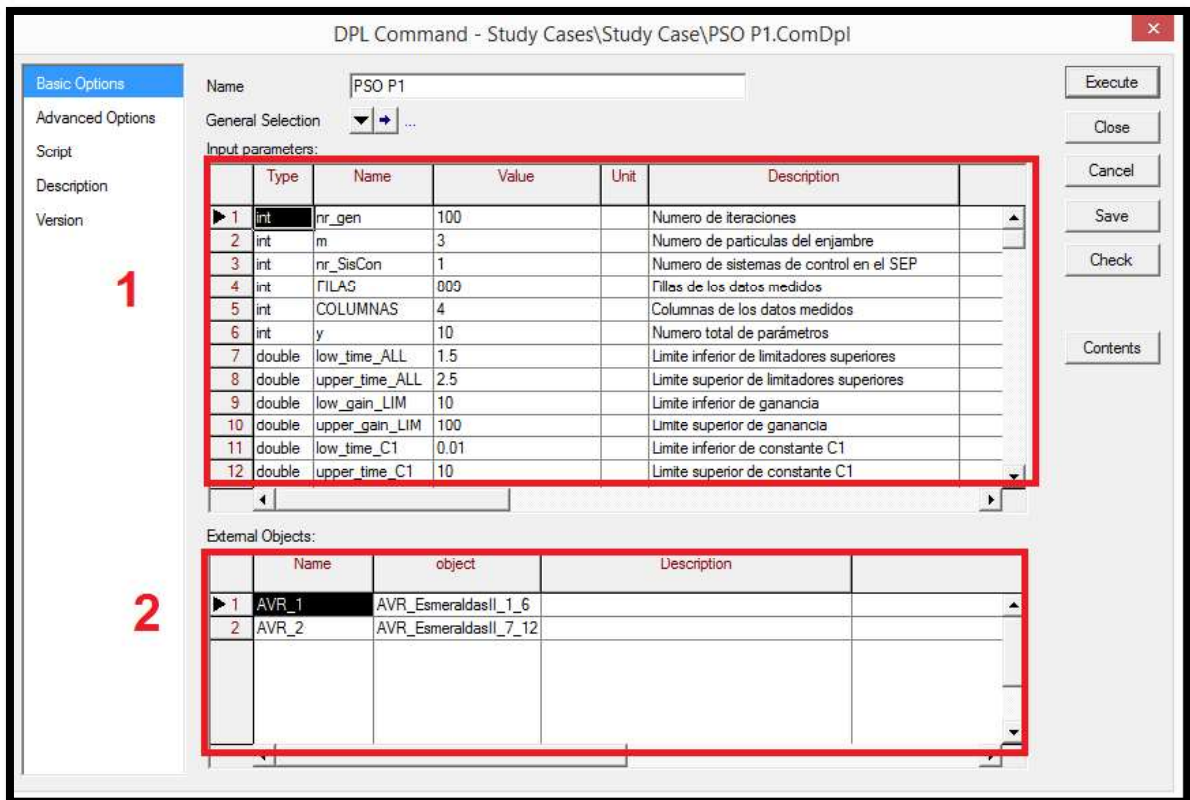


Figura 4.21. Opciones Básicas del DPL

En el área 1 de la Figura 4.21 se ingresan las variables con las que trabajará el algoritmo a lo largo de cada proceso, para este caso se las clasifica en tres tipos: de ejecución, de cálculo y limitantes.

Las variables de ejecución están relacionadas con el proceso iterativo del algoritmo y con los valores de los datos de entrada “Valores Medidos” que se usarán. La Tabla 4.12 contiene todas estas variables con sus respectivas descripciones.

Tabla 4.12. Variables de ejecución del algoritmo

Variable	Descripción
nr_gen	Define el número de iteraciones que ejecutará el programa
m	Define el número de partículas que se crean para formar el enjambre inicial.
nr_SisCon	Define el número de Sistemas de Control que operan en el SEP
y	Define el número total de parámetros que se usarán en el algoritmo
FILAS	Representa el número de filas de los datos medidos ya tratados
COLUMNAS	Representa el número de columnas de los datos medidos ya tratados

Las variables de cálculo se refieren a las variables que intervienen en la ecuación de las velocidades y posiciones de cada partícula a lo largo de cada proceso iterativo. De estas variables depende la evolución del algoritmo y sus valores pueden cambiar las veces que se considere necesarias hasta encontrar los valores que den las mejores soluciones para este tipo de problemas. La Tabla 4.13 contiene todas estas variables con sus respectivas descripciones.

Tabla 4.13. Variables de cálculo del algoritmo

Variable	Descripción
cmin	Define el mínimo peso de las mejores partículas individuales
cmax	Define el máximo peso individual de las mejores partículas individuales
c2	Define el peso de la mejor partícula global
wmin	Define la inercia mínima para las velocidades de las partículas del enjambre.
wmax	Define la inercia máxima para las velocidades de las partículas del enjambre.

Las variables limitantes como su nombre indica son las que impiden que los parámetros a lo largo de su evolución salgan fuera de los rangos que se les asignó. La Tabla 4.14 contiene todas estas variables con sus respectivas descripciones.

Tabla 4.14. Variables limitantes del algoritmo

Variable	Descripción
low_time_ALL	Límite inferior de los límites máximos de los bloques del AVR
upper_time_ALL	Límite superior de los límites máximos de los bloques del AVR
low_gain_LIM	Límite inferior de la ganancia estática del AVR
upper_gain_LIM	Límite superior de la ganancia estática del AVR
low_time_C1	Límite inferior de la constante de adelanto-atraso
upper_time_C1	Límite superior de la constante de adelanto-atraso
low_time_C2	Límite inferior de la constante de adelanto-atraso
upper_time_C2	Límite superior de la constante de adelanto-atraso
low_time_B	Límite inferior de la constante de adelanto-atraso
upper_time_B	Límite superior de la constante de adelanto-atraso

En el área 2 de la Figura 4.21 se deben incluir los objetos externos al DPL que no sean variables. En este caso son objetos que pueden estar o no en el diagrama unifilar del SEP, pero que deben pertenecer o tener relación con el programa DigSilent para poder usar sus valores o funciones dependiendo del caso.

Para este trabajo los objetos externos son los AVR's que se encuentran dentro de la Grid del proyecto de estudio como se muestra en la Figura 4.22. A estos objetos externos se les coloca un nombre con el que podrán ser llamados o usados dentro del script.

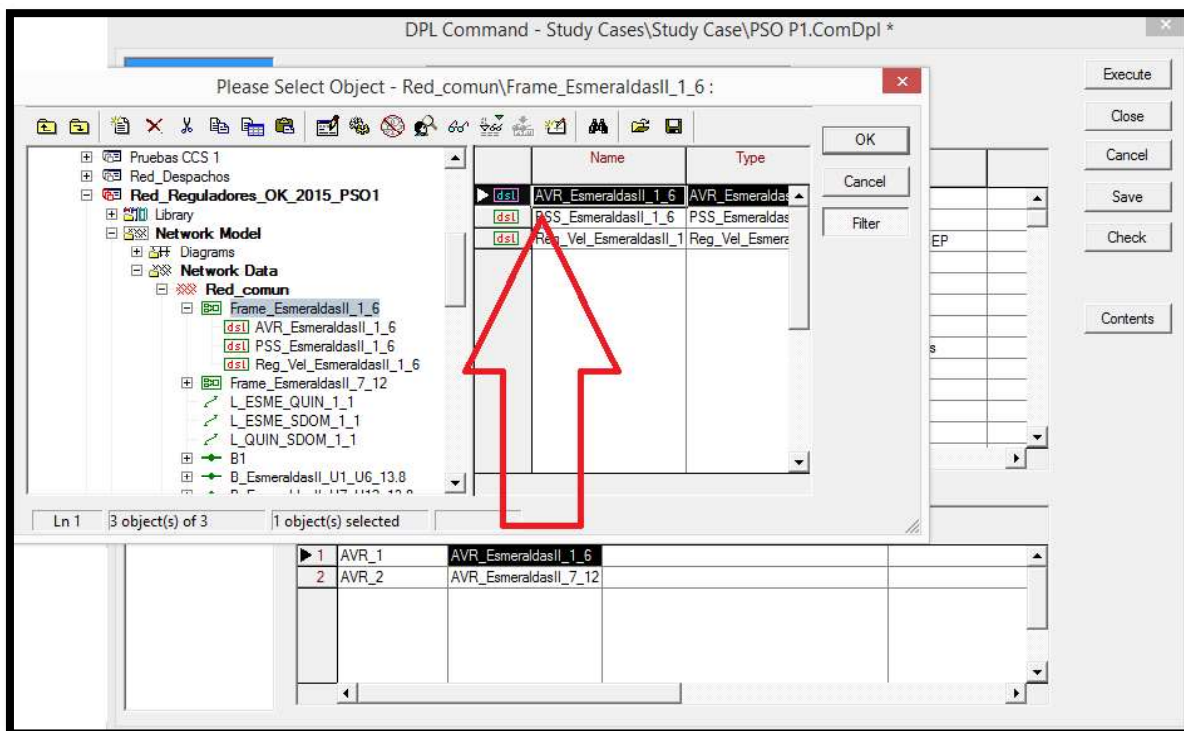


Figura 4.22. AVR como objeto externo del DPL

Por último, dentro de la tabla de contenidos deben constar todas las matrices que son creadas y usadas dentro del script para que puedan ser usadas por el DPL en cada ejecución. Además en esta sección deben constar los elementos de simulación como flujos de potencia, verificación de condiciones iniciales, arranque de simulación y caja de resultados que es de donde se obtendrán los valores resultantes de todas las variables.

Para cada caso y tipo de estudio variarán los elementos de simulación necesarios, pero deben constar en la tabla de contenidos y tener un nombre con el que puedan ser llamados y ejecutados dentro del script del DPL. La Figura 4.23 muestra la tabla de contenido y de donde se pueden obtener los elementos de simulación.

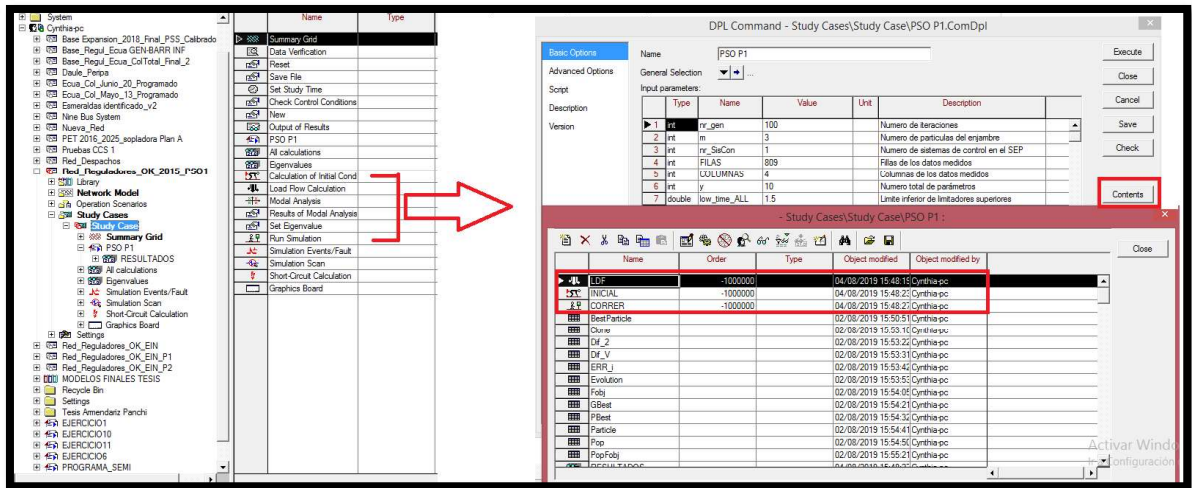


Figura 4.23. Tabla de contenidos del DPL

Con todos estos elementos debidamente incorporados y el script cargado dentro del DPL, se ejecutará el algoritmo, que deberá estar ubicado de preferencia en la carpeta de casos de estudio del proyecto en el que se vaya a realizar la optimización.

Los resultados producto de la aplicación del algoritmo, así como de toda la metodología planteada, se presentan en el siguiente capítulo, donde cambiando los parámetros a optimizar y los objetos externos, se usó el mismo algoritmo para sintonizar los parámetros de los AVR's y para encontrar los tiempos de ocurrencia y despeje de las perturbaciones, usando la misma lógica que se detalló en este capítulo.

5. RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

En este capítulo se presentan los resultados de la metodología planteada, aplicados a la Central Térmica Esmeraldas II.

Primeramente se muestran las respuestas de voltajes, ángulos y flujos de potencia del sistema de red equivalente para comprobar su correcta estructuración. Luego se muestran las respuestas de la red equivalente al incorporar los sistemas de control de la central en estado estable, ante variaciones de voltaje y ante variaciones velocidad para verificar su correcta operación.

Posteriormente, se muestra el resultado del tratamiento de datos para todas las fases de la línea de transmisión Esmeraldas-Quininde, elemento donde se obtuvieron las mediciones. Estos resultados se incluirán en un documento Excel para ser importado y usado como referencia de comparación por el programa Digsilent PowerFactory.

Finalmente se muestran los resultados de aplicación del algoritmo PSO en los sistemas de control de la central térmica Esmeraldas II, donde primero se lo uso para hallar tiempos de ocurrencia y despeje de falla, y posteriormente, para sintonizar los parámetros del AVR que controla los generadores de la mencionada central.

5.1 RESPUESTAS DE LA RED EQUIVALENTE

Para la red equivalente, la manera más fácil de comprobar que ha sido estructurada correctamente y que responde en la medida que lo haría el sistema completo, es haciendo una comparación de los flujos de potencia en cada barra, buscando que los voltajes, ángulos, y potencias de entrada o salida sean las mismas o que varíen apenas en un valor menor a un 1%.

La red equivalente fue diseñada usando la base de datos que maneja CENACE para asignar sus pre-despachos de carga diaria, se considera la zona de Esmeraldas donde se encuentra la Central Termoeléctrica Esmeraldas II, tomando en cuenta todos los elementos que se encuentran en esta zona a partir de la barra de 138 kV de Santo Domingo que es donde se coloca la red externa que representará al resto del sistema.

La Figura 5.1 muestra la red equivalente estructurada, mientras que las Figuras 5.2 y 5.3 permiten comparar los resultados de los flujos de potencia del sistema completo y del subsistema que será estudiado.

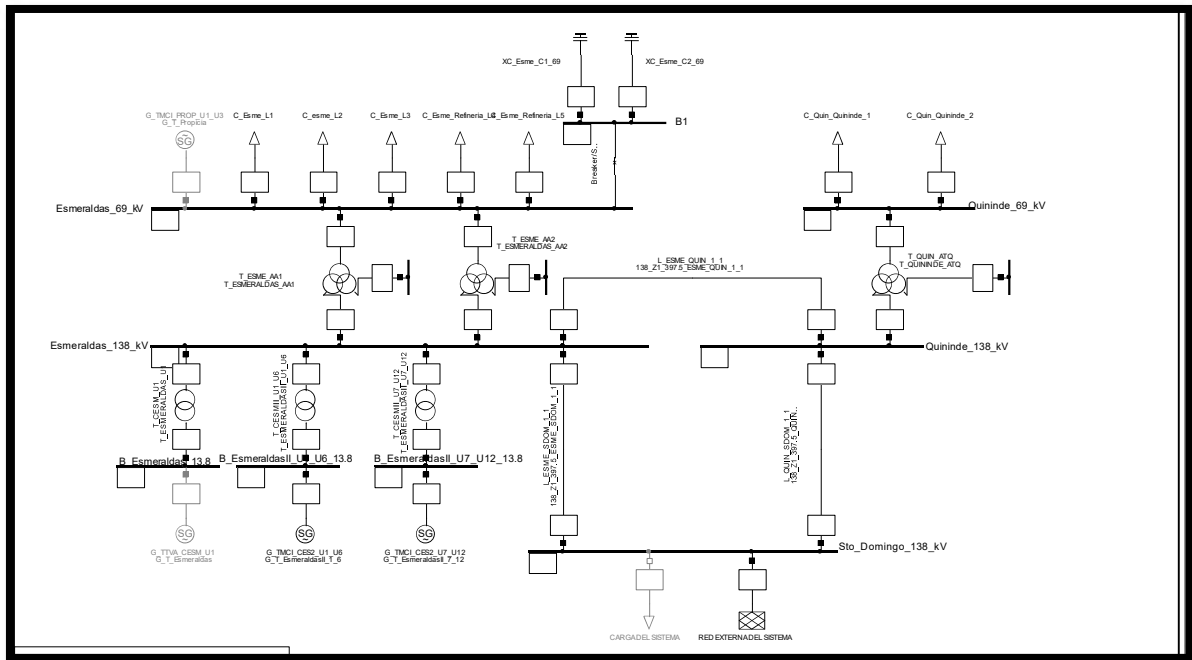


Figura 5.1. Red Equivalente Santo Domingo 138kV

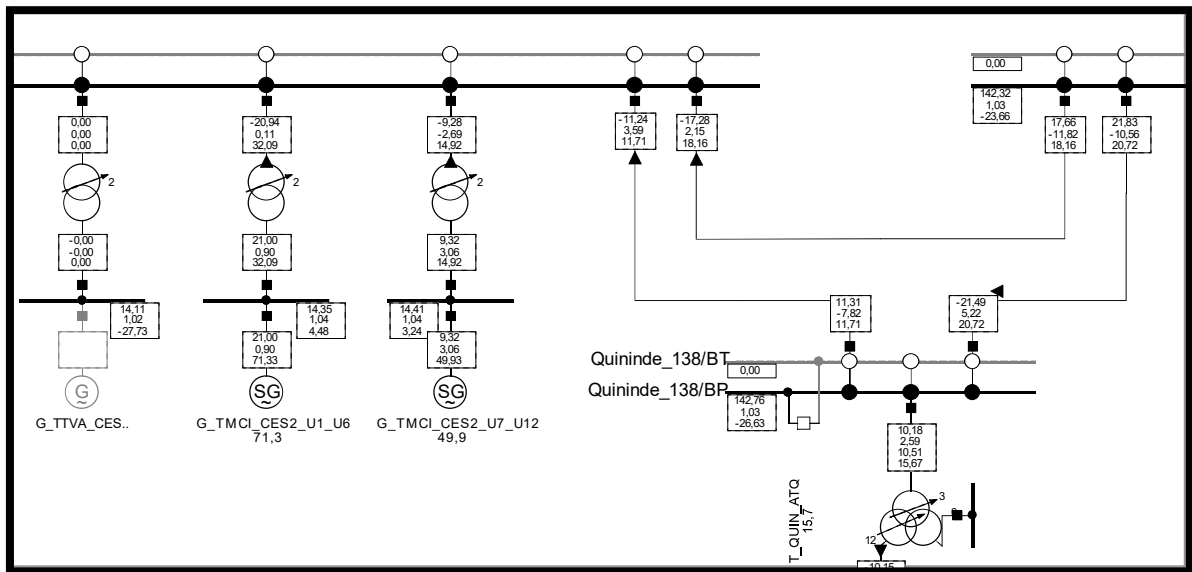


Figura 5.2. Resultados de flujo de potencia en SNI

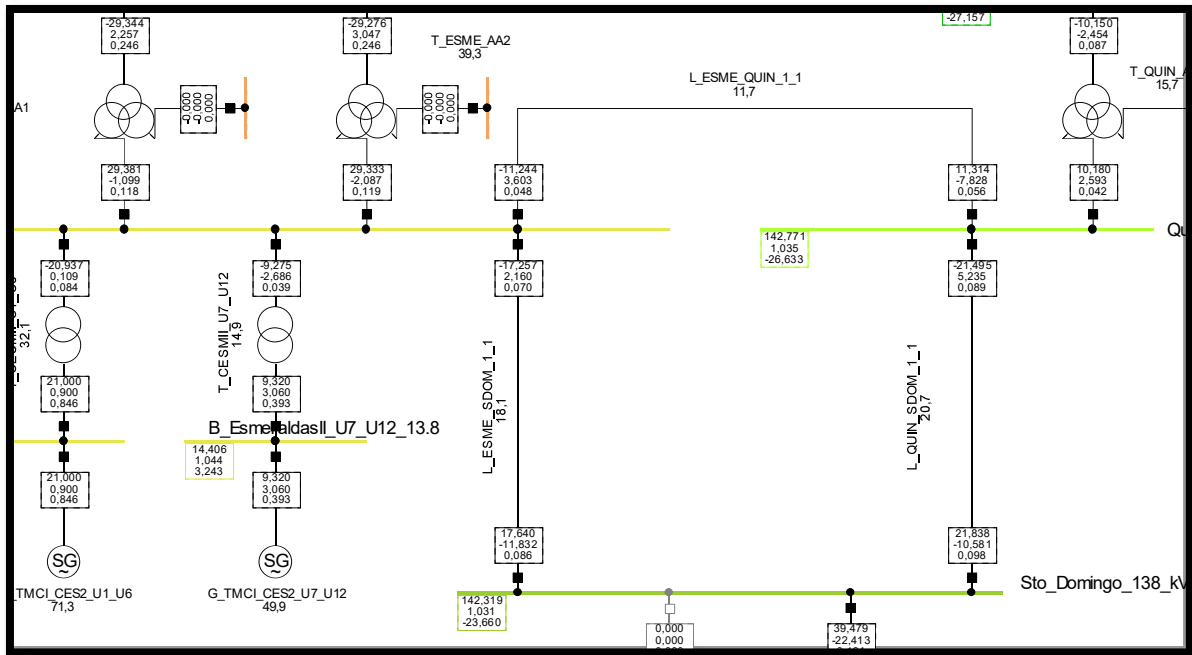


Figura 5.3. Resultados de flujo de potencia en red equivalente.

Luego de haber comprobado que la red equivalente responde de manera muy cercana a como lo hace el SNI, se procede a hacer un análisis de pequeña señal para poder observar los modos de oscilación del sistema estructurado. Estos modos de oscilación describen el comportamiento lineal del sistema mediante sus oscilaciones resonantes.

La importancia del análisis de pequeña señal es que permite verificar la estabilidad de los valores propios del sistema, ya que estos intervienen directamente sobre los modos de oscilación que pudieran llegarse a presentar. Los valores propios se consideran estables y con el suficiente amortiguamiento, si se encuentran en el semiplano imaginario. La Figura 5.4 presenta los resultados de este análisis donde todos sus valores se consideran estables al estar en color verde, por el contrario, si un valor fuese inestable se encontraría en rojo y se debería considerar mejorar las características de ese modo de oscilación.

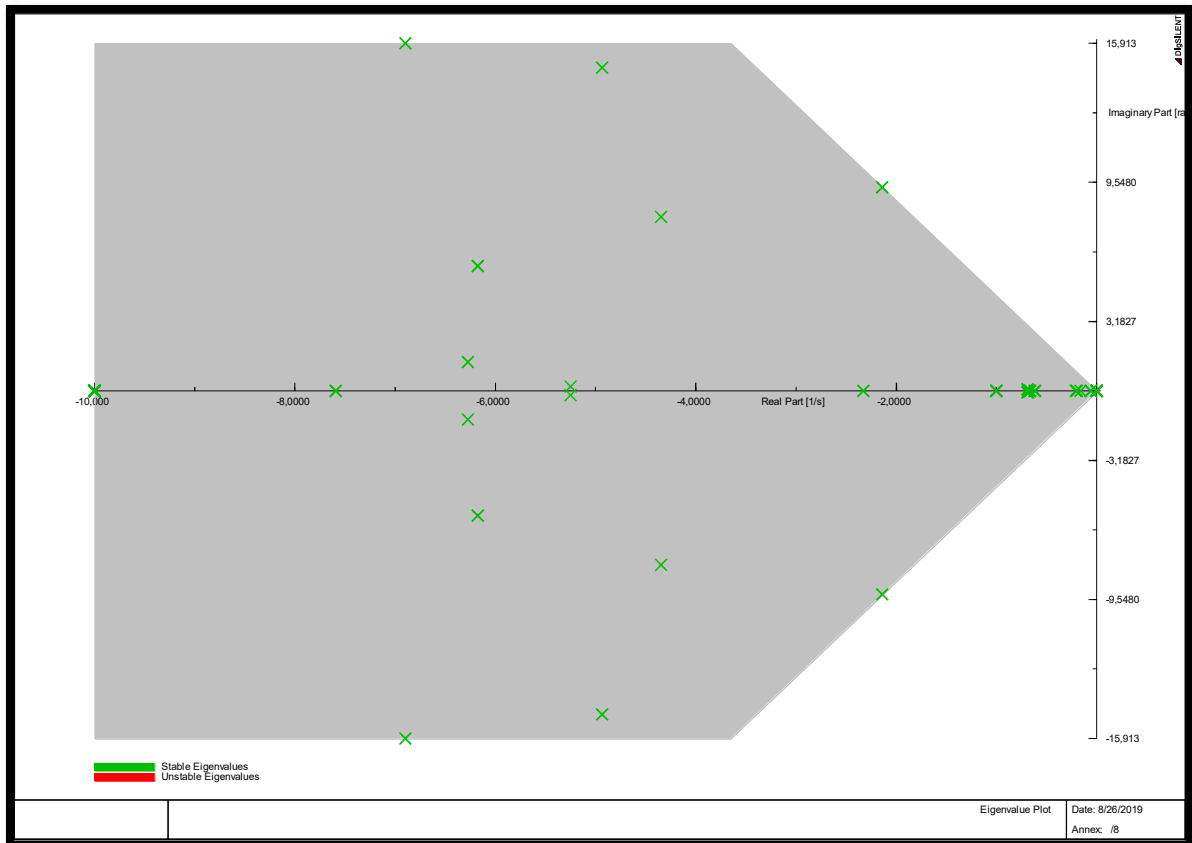


Figura 5.4. Resultados de modos de oscilación en red equivalente.

5.2 RESPUESTAS DE LOS SISTEMAS DE CONTROL

Una vez incorporados los sistemas de control a la red, es importante comprobar que se encuentran operando correctamente. Esto se logra probando los sistemas mediante las simulaciones de cambios o sin ninguna perturbación para poder observar sus repuestas en el tiempo como se muestra en las siguientes secciones.

5.2.1 PRUEBA DE ESTADO ESTABLE

Esta prueba es muy importante para poder comprobar que los sistemas de control han sido debidamente inicializados y parametrizados, ya que en estado estacionario y sin la presencia de perturbaciones se espera que los sistemas mantengan los valores de sus variables constantes e invariantes en el tiempo.

El tiempo recomendado de simulación para esta prueba es de 300 s, en este tiempo se debe constatar que las variaciones presentadas en las variables sean inferiores a 1×10^{-5}

Las Figura 5.5 y 5.6 muestran el comportamiento de las principales variables del AVR y GOV respectivamente.

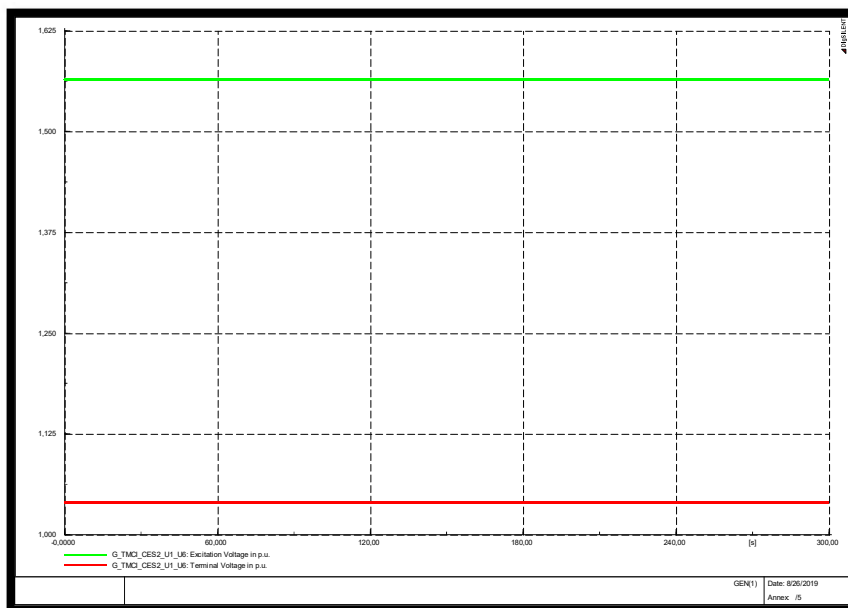


Figura 5.5. Resultados de estado estable para el AVR

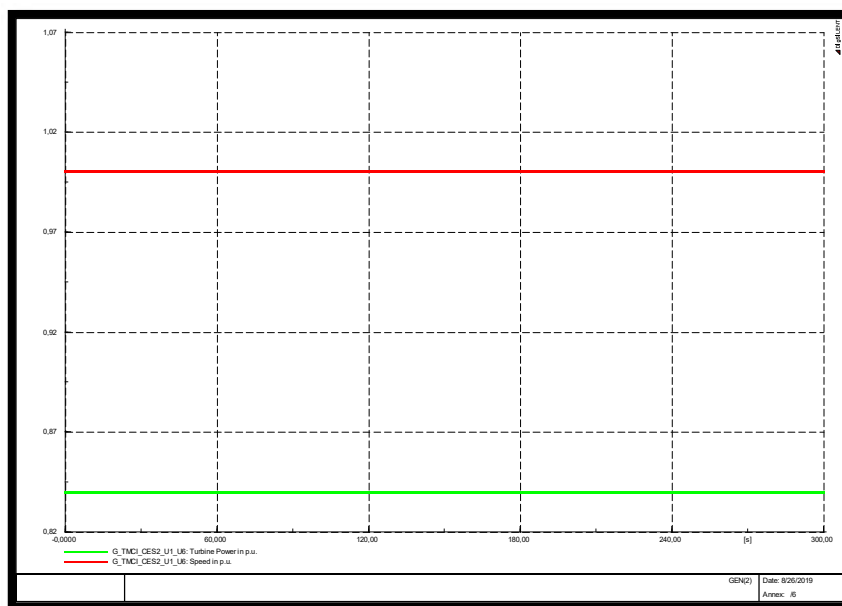


Figura 5.6. Resultados de estado estable para el GOV

5.2.2 PRUEBAS DE CONTROL DE VOLTAJE

Esta prueba consiste en subir de manera repentina en un escalón el valor de la referencia de voltaje del AVR, ya sea en más o menos 5% de su valor inicial. Se toma el valor de 5% en el paso de incremento o decremento, ya que generalmente estos son los límites de operación de los generadores, donde se busca comprobar que el voltaje terminal tienda a ese nuevo valor referencial con una respuesta amortiguada.

Las Figuras 5.7 y 5.8 comprueban la respuesta del sistema de excitación ante un aumento del 5% en el voltaje referencial y luego un decremento del 5% en el voltaje de referencia inicial respectivamente.

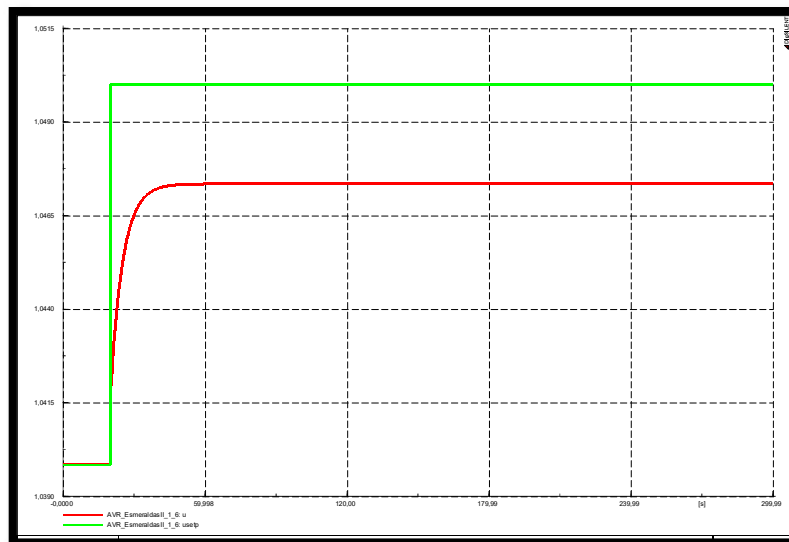


Figura 5.7. Respuesta AVR al aumento de 5% de voltaje referencial

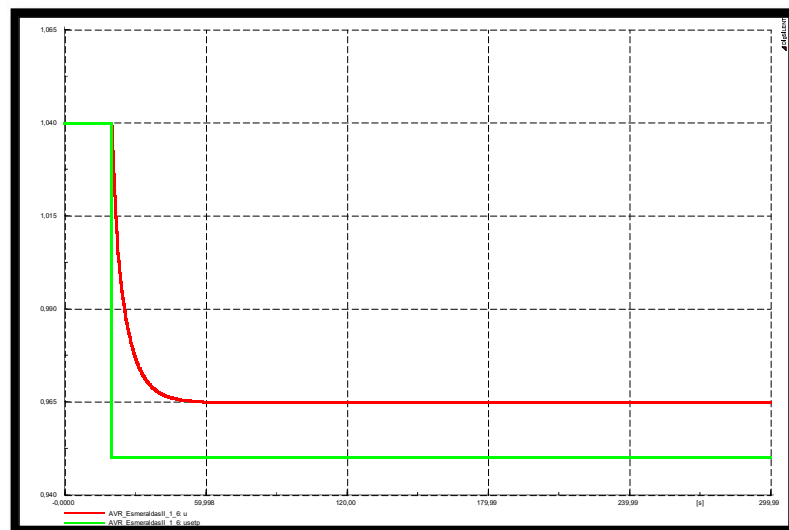


Figura 5.8. Respuesta AVR a la disminución de 5% de voltaje referencial

5.2.3 PRUEBAS DE CONTROL DE VELOCIDAD

Esta prueba consiste en subir de manera repentina a manera de escalón el valor de la referencia de velocidad del GOV, ya sea en más o menos 5% de su valor inicial. Se toma el valor de 5% en el paso de incremento o decremento, ya que permiten apreciar de buena manera los cambios de las variables sin exceder los límites de las máquinas, donde se busca comprobar que la velocidad de la máquina, así como la frecuencia del sistema tienden a ese aumentar o disminuir en la proporción del cambio de la referencia con una respuesta amortiguada.

Las Figuras 5.9 y 5.10 comprueban la respuesta del sistema de control de velocidad ante un aumento del 5% en la velocidad referencial y luego un decremento del 5% en la velocidad de referencia inicial respectivamente.

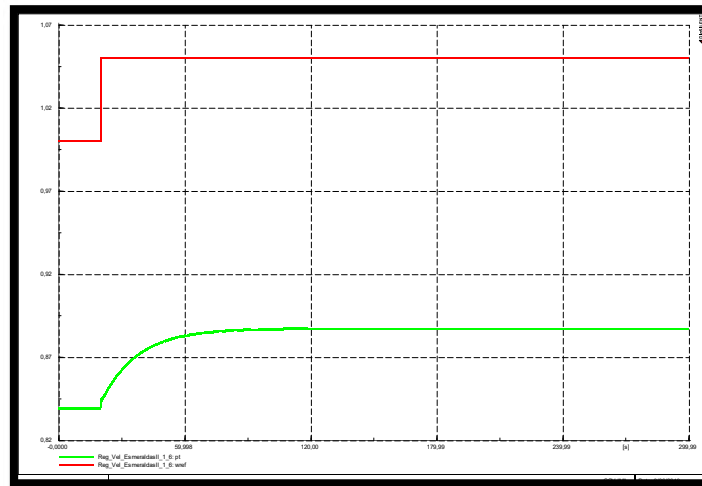


Figura 5.9. Respuesta GOV al aumento de 5% de velocidad referencial

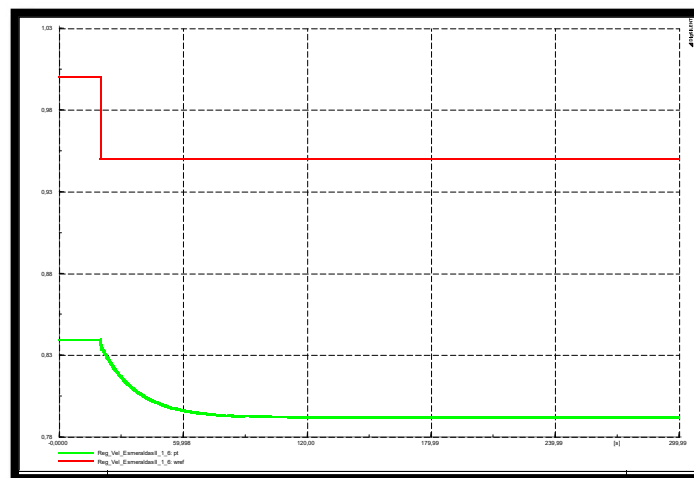


Figura 5.10. Respuesta GOV a la disminución de 5% de velocidad referencial

5.3 RESULTADOS DEL TRATAMIENTO DE DATOS

En esta sección consta el reporte donde se encuentra la información más relevante, así como el motivo o circunstancias que llevaron a que ocurra la falla en la zona de Santo Domingo – Esmeraldas, misma que fue recreada en la red equivalente estructurada, donde fallaron las fases B y C de la línea que une las subestaciones de Quininde y Santo Domingo, ambas con un nivel de voltaje de 138 kV.

Tabla 5.1. Información de Falla registrada.

EVENTO: DISPARAN LOS DISYUNTORES ASOCIADOS A LA L/T QUININDE - SANTO DOMINGO 138 KV.				
FECHA: 20 - Jun - 2016		HORA: 12:37		
CONDICIONES PRE FALLA				
FLUJO POR EL ELEMENTO FALLADO:	-22.3 + j 0.3 MVA	DATO SISTEMA NM	QUININDÉ	
VOLTAJE DE BARRA:	139.50 kV	DATO SISTEMA NM	QUININDÉ	
FLUJO POR EL ELEMENTO FALLADO:	27.9 - j 4.9 MVA	DATO SISTEMA NM	SANTO DOMINGO	
VOLTAJE DE BARRA:	139.30 kV	DATO SISTEMA NM	SANTO DOMINGO	
Grupo: OTROS		Causa: INCIDENTES POR CAUSA FUGAZ		
CORRIENTES DE FALLA				
SUBESTACION	PANEL	CORRIENTES		
		FASE A	FASE B	FASE C
QUININDÉ	SANTO DOMINGO 138 kV	0.122kA	0.607kA	0.702kA
SANTO DOMINGO	QUININDÉ 138 kV	0.126kA	2.362kA	2.257kA

A partir del reporte se puede obtener información sobre las condiciones de pre-falla y falla, así como los voltajes de la línea Quininde – Esmeraldas. La metodología explicada para el ajuste y tratamiento de datos es usada de la misma manera a como se la detalló, pudiendo implementarse para voltajes, corrientes o potencias que se encuentren registradas y almacenadas en los archivos tipo COMTRADE. Los resultados de cada fase una vez ajustados sus rangos e interpolados, se presentan a continuación:

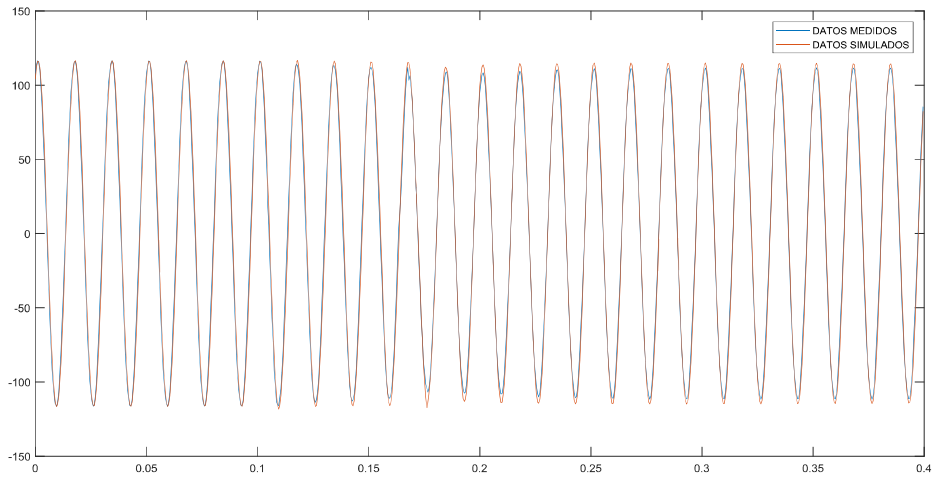


Figura 5.11. Datos ajustados de voltajes en la L/T Quinde-Esmeraldas fase “a”

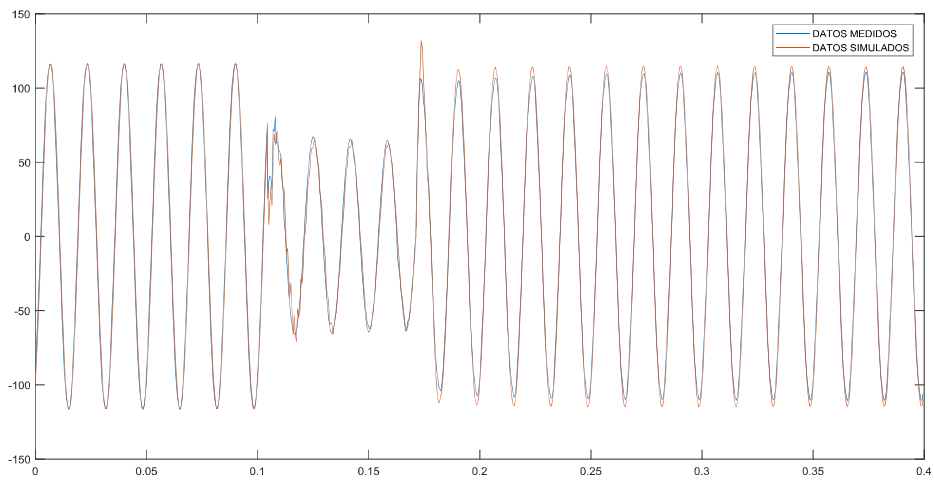


Figura 5.12. Datos ajustados de voltajes en la L/T Quinde-Esmeraldas fase “b”

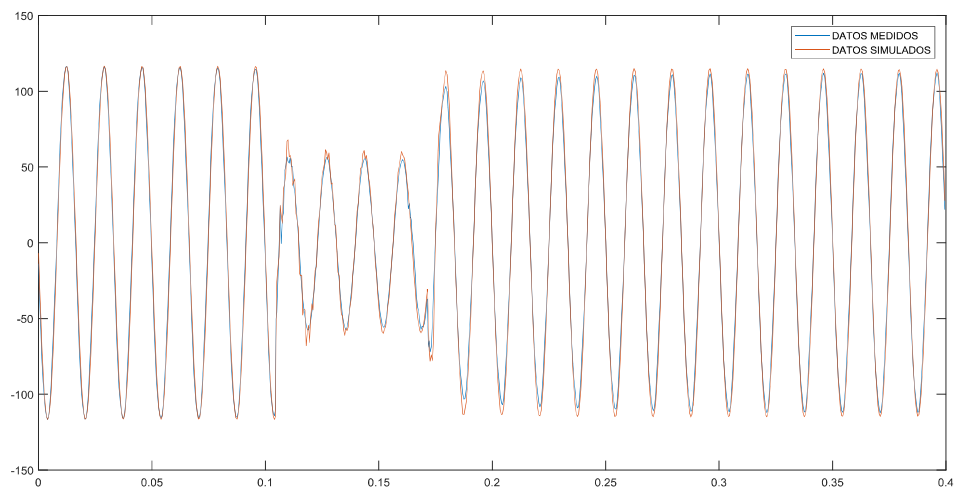


Figura 5.13. Datos ajustados de voltajes en la L/T Quinde-Esmeraldas fase “c”

5.4 RESULTADOS DE APLICACIÓN DEL ALGORITMO PSO

Esta sección contiene los resultados que son producto de la aplicación de toda la metodología detallada en el presente trabajo donde el algoritmo de enjambre de partículas fue usado para resolver dos problemas específicos: encontrar el momento exacto en el que ocurrió la falla, así como el tiempo de despeje de la misma y encontrar los parámetros de los AVR de las unidades de generación de la central térmica Esmeraldas II. Los resultados obtenidos en estos dos casos se presentarán y analizarán en las siguientes subsecciones de este capítulo.

Cabe recalcar que el DPL fue estructurado de tal manera que permita encontrar cualquier parámetro, valor o variable de los elementos que se encuentran dentro de la red equivalente estructurada mediante la aplicación del algoritmo de enjambre de partículas.

Las variables que serían modificadas de manera iterativa a fin de hallar los valores que mejor se ajusten a los datos de los que se tengan registro, pueden ser parámetros de elementos como: transformadores, líneas de transmisión, cargas, generadores, etc., valores de generación, carga o compensaciones y también se puede hallar el tipo o valor de variables de eventos que ocurran dentro del sistema como el caso de los tiempos de falla de corto-circuitos bifásicos.

Las características que deben tener estas variables es que su cambio tenga influencia en el resultado de voltajes, corrientes, potencias, etc. De cualquier nodo del sistema de donde también se tengan valores medidos en campo con los cuales se pueda realizar una comparación para proceder a minimizar su diferencia.

5.4.1 TIEMPOS DE OCURRENCIA Y DESPEJE DE LA FALLA

En este punto, lo que se trata de hallar son los tiempos exactos en que ocurre la falla bifásica y su posterior despeje para las fases “b” y “c” de la L/T que conecta las subestaciones de Quininde y Esmeraldas. Estos tiempos tienen mayor importancia y notoriedad en simulaciones EMT con respecto a simulaciones RMS, debido a que en simulaciones EMT afecta en qué punto de la onda ocurre una falla, ya que, la caída o elevación de voltaje producto de una perturbación será diferente si ocurre en un cruce por cero de la onda o si ocurre en un pico que puede ser positivo o negativo de la misma.

El proceso de búsqueda pudo haberse realizado a manera de prueba y error en programas computacionales como MATLAB que cuenta con herramientas visuales que permiten sobreponer en una ventana las gráficas de los datos simuladas y los datos medidos para

encontrar de manera visual los tiempos que ajustarían mejor estas curvas; aunque sería un proceso tedioso al tener que exportar los datos de Digsilent a Excel y posteriormente importarlos a MATLAB donde podrían compararse con los datos medidos de los archivos COMTRADE, y así las veces que se considere necesarias hasta hallar valores que visualmente parecerían correctos, pero sin tener la certeza de que el resultado hallado sea el idóneo.

El uso del algoritmo PSO desarrollado en DPL para hallar los tiempos en que ocurre y se despeja la falla tuvo dos propósitos:

- Obtener resultados que permitan apreciar de manera visual que al algoritmo funciona correctamente; en este caso minimizando la función objetivo y ajustando las curvas de mediciones y simulaciones.
- Encontrar los tiempos apropiados con un nivel de precisión mayor a lo que se lograría si se hiciera el trabajo de manera visual, en este caso hasta 4 decimales de precisión.

A continuación se muestran las gráficas que contienen los datos simulados y los datos medidos en campo de cada fase antes y después de encontrar los tiempos de falla y de despeje de falla.

Para la fase A:

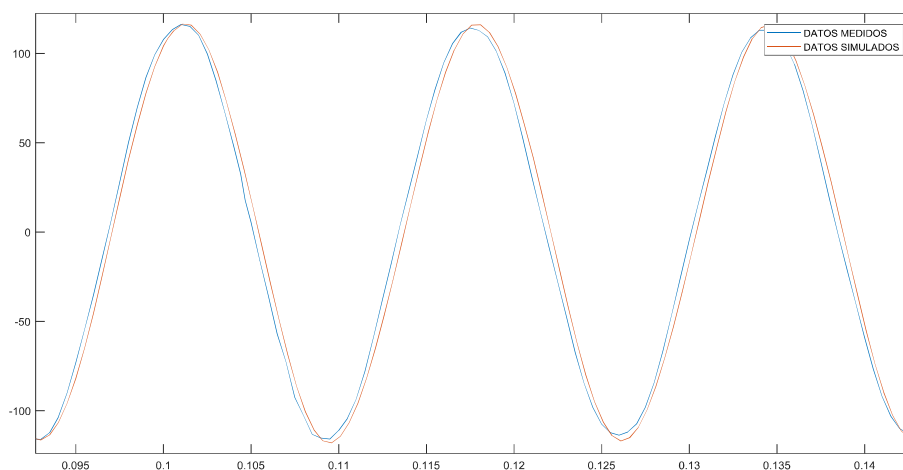


Figura 5.14. Momento de la falla en la fase “a” previo a sintonizar tiempos mediante PSO

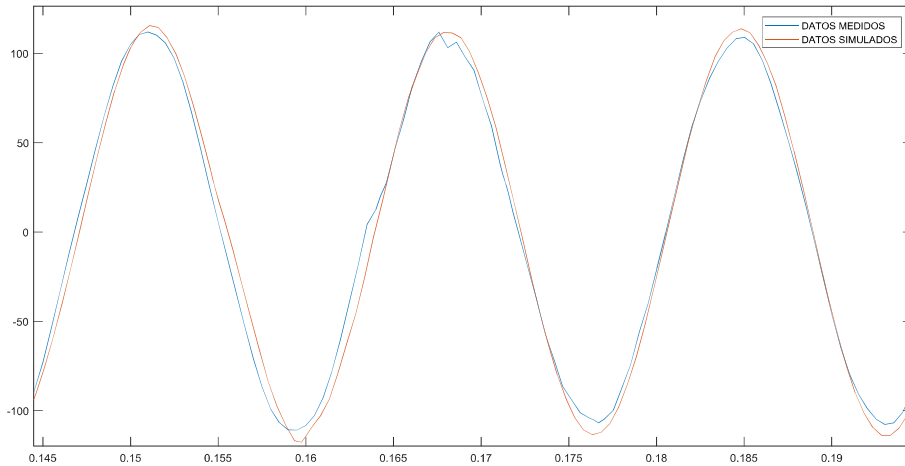


Figura 5.15. Momento de despeje de falla en la fase “a” previo a sintonizar tiempos mediante PSO

Para el caso de la fase “a” no se evidencia una diferencia que pueda ser significativa entre las curvas graficadas, esto se debe a que esta fase no sufre una perturbación, aunque si bien siente los efectos de las demás fases al ocurrir la falla, esto no es muy notorio como el caso del despeje de la misma donde la forma de la onda y su pico sufren un cambio abrupto que se puede apreciar visualmente en el segundo pico positivo de la Figura 5.15.

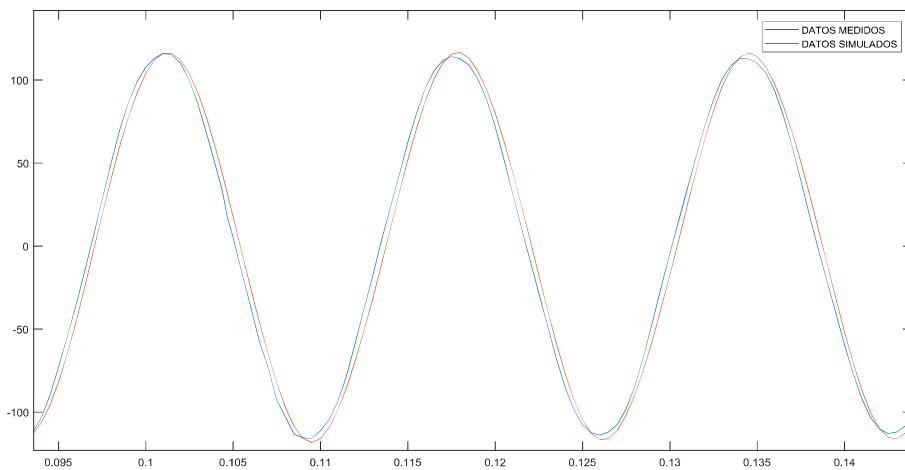


Figura 5.16. Momento de la falla en la fase “a” con tiempos sintonizados mediante PSO

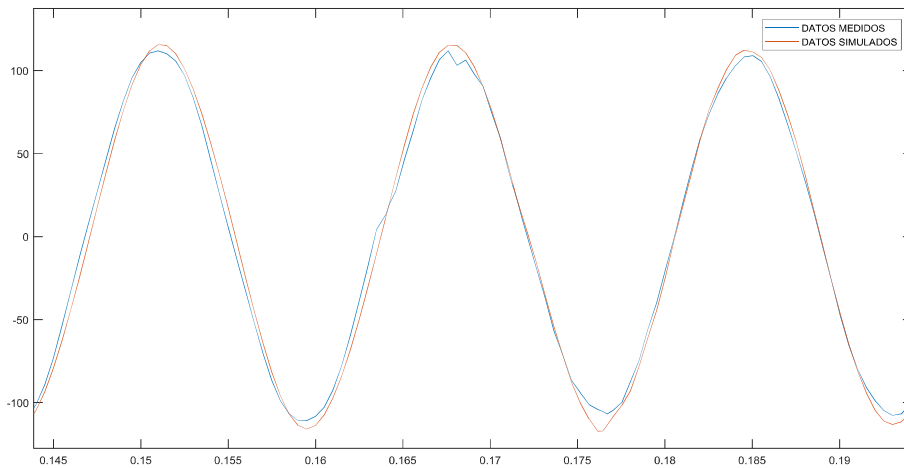


Figura 5.17. Momento de despeje de la falla en la fase “a” con tiempos sintonizados mediante PSO

Luego de encontrar los tiempos en que ocurrió y se despejó la falla para la fases “b” y “c” se observa que para la fase “a” los cambios no fueron significativos, debido principalmente a que la diferencia inicial tampoco lo fue. El resultado es más apreciable en el despeje de la falla donde el crecimiento y decremento de la onda coinciden de mejor manera entre las dos gráficas, así como el pico de la onda posterior al despeje que ahora se encuentra mejor alineado con respecto a la gráfica de mediciones.

Para la fase B:

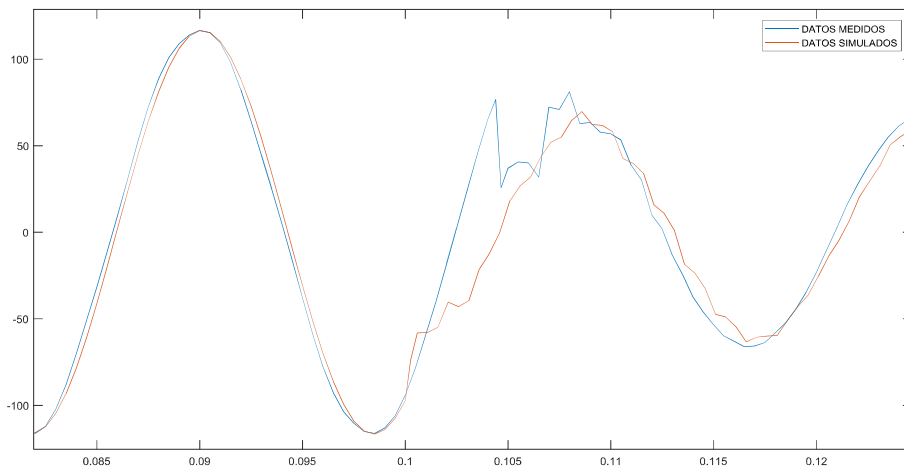


Figura 5.18. Momento de la falla en la fase “b” previo a sintonizar tiempos mediante PSO

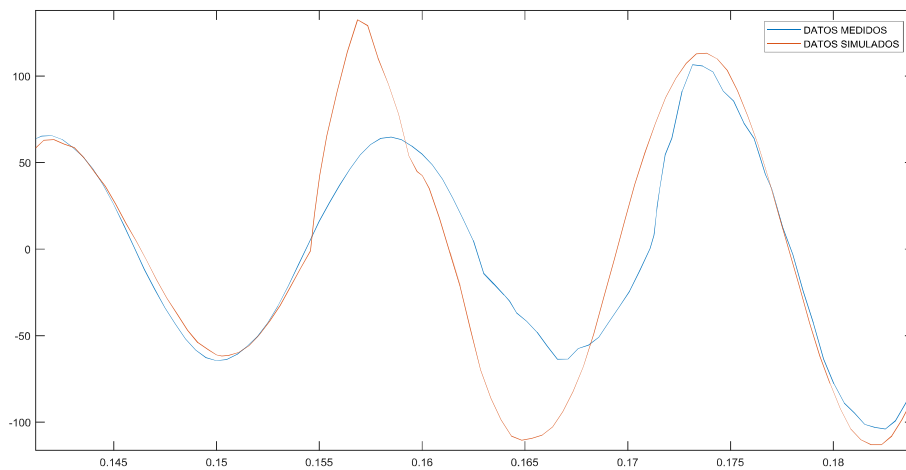


Figura 5.19. Momento de despeje de falla en la fase “b” previo a sintonizar tiempos mediante PSO

Para el caso de la fase “b” se observa que la falla sucede el momento en que la onda crece a su pico positivo, mientras que el despeje de la misma ocurre también en el crecimiento de la onda hacia su pico positivo pero luego de haber pasado su cruce por cero, es fácil apreciar la diferencia entre las dos curvas de las Figuras 5.18 y 5.19 ya que no guardan relación en forma ni en amplitud al ocurrir los eventos, por lo que es necesario ajustar los tiempos establecidos inicialmente.

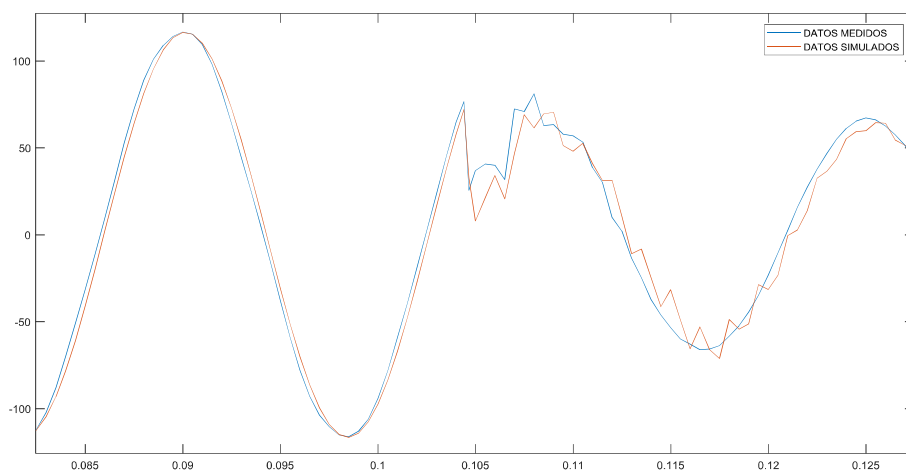


Figura 5.20. Momento de la falla en la fase “b” con tiempos sintonizados mediante PSO

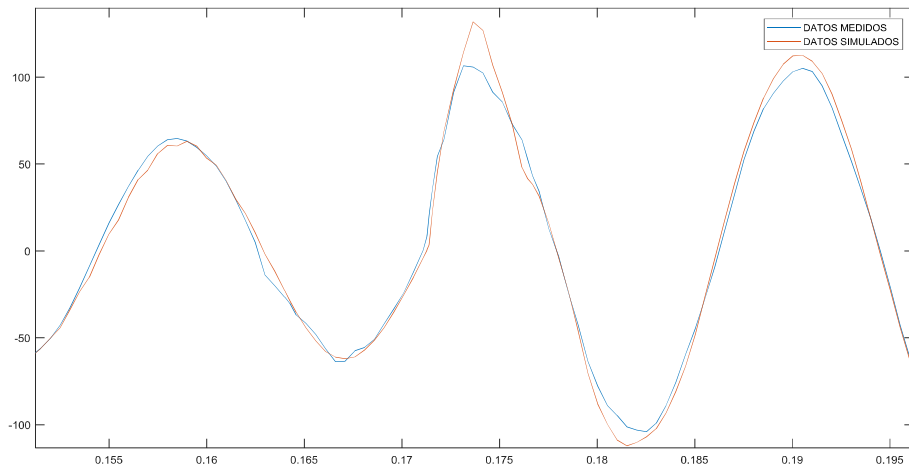


Figura 5.21. Momento de despeje de la falla en la fase “b” con tiempos sintonizados mediante PSO

Con los tiempos hallados mediante la aplicación del algoritmo PSO, se observa que para el momento en que ocurre la falla, que es antes de alcanzar el pico positivo, las gráficas guardan relación en su forma y amplitud con una caída de voltaje y posterior intento de recuperación de la forma de onda donde es visible que la gráfica de datos simulados tiene una forma más distorsionada que la gráfica de datos medidos. En el caso del despeje de falla la forma es muy parecida entre las dos gráficas con la diferencia de amplitud donde el pico de la onda en datos medidos es mayor que el pico de la onda en datos simulados; en los dos casos estas diferencias se producen por razones ajenas a los tiempos en que ocurre cada uno de los eventos, pudiendo establecerse como encontrados los mejores tiempos posibles.

Para la fase C:

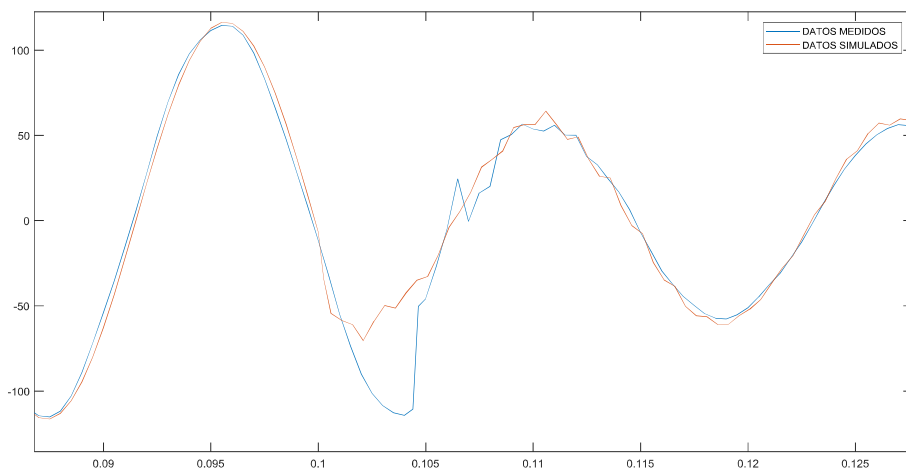


Figura 5.22. Momento de la falla en la fase “c” previo a sintonizar los tiempos mediante PSO

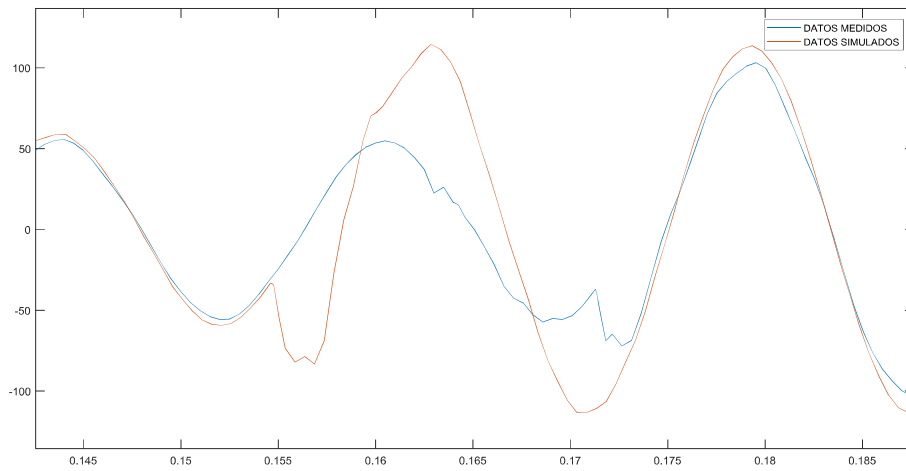


Figura 5.23. Momento de despeje de falla en la fase “c” previo a sintonizar tiempos mediante PSO

Para el caso de la fase “c” el momento en que ocurre la falla es muy cercano al pico negativo de la onda, mientras que el despeje de la falla ocurre el momento en que la onda comienza a decrecer de su pico negativo algunos ciclos después. El tiempo inicial considerado para la ocurrencia de la falla difiere apenas por una porción de ciclo de onda con respecto al tiempo hallado mediante el algoritmo PSO, mientras que para el despeje de la falla la diferencia es de casi un ciclo por lo que es importante hallar valores que disminuyan la diferencia entre estas gráficas.

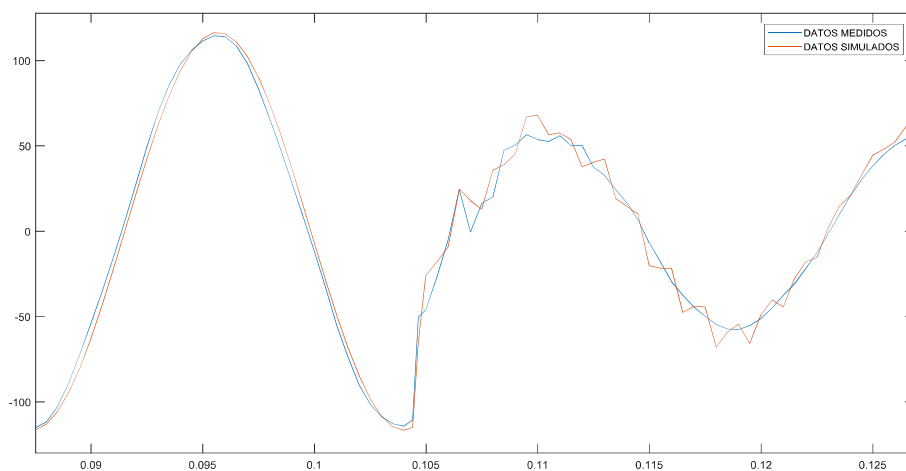


Figura 5.24. Momento de la falla en la fase “c” con tiempos sintonizados mediante PSO

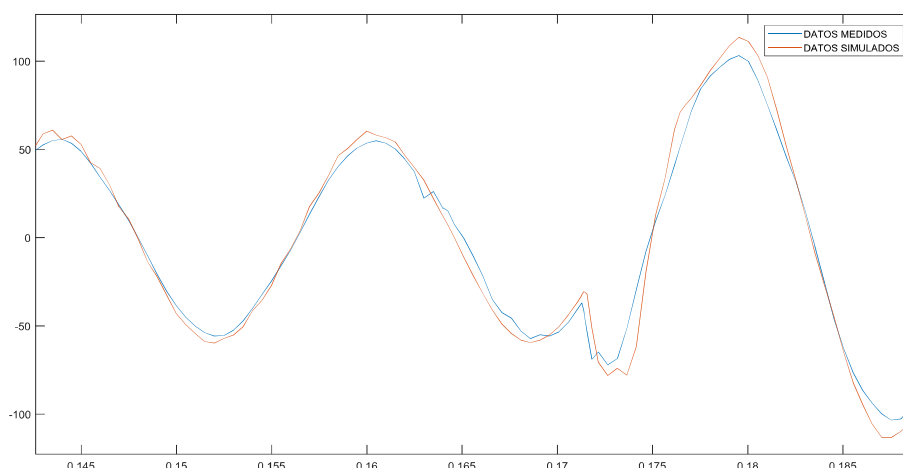


Figura 5.25. Momento de despeje de la falla en la fase “c” con tiempos sintonizados mediante PSO

Luego de aplicar el PSO, se encuentran valores que guardan la relación que se esperaría observar entre las dos gráficas que representan el mismo evento. Para el caso en que ocurre y se despeja la falla de la fase “c” las diferencias son las mismas a las de la fase “b” y se consideran tiempos idóneos al acercar lo más posible tanto la forma como amplitud de las ondas en las dos gráficas.

Los tiempos iniciales y los resultantes de aplicar el PSO se encuentran en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Comparación de tiempos antes y después de aplicar PSO

	Tiempo de falla [s]	Tiempo de despeje de falla [s]
Antes de aplicar PSO	0,1	0,15
Después de aplicar PSO	0,1045	0,169173

Los resultados de esta búsqueda se encuentran resumidos en el anexo D donde se muestra las mejores partículas de cada proceso automático para las partículas creadas, mientras que el proceso y resultados completos se encuentran en Anexo D digital.

5.4.2 PARÁMETROS DE LOS AVR

Para la sintonización de parámetros de los AVR en la central térmica Esmeraldas II se consideraron dos etapas, en la primera se buscan únicamente los parámetros de los bloques adelanto atraso, y de la ganancia estática del AVR, mientras que en la segunda etapa se buscan los límites superiores de los bloques principales del AVR.

Se considera usar dos etapas debido a que esto disminuye el número de variables que deben buscarse, es decir que, el espacio de búsqueda será menor en cuanto a las dimensiones en las que deban moverse las partículas creadas, disminuyendo también la complejidad del problema y dando mayor seguridad de convergencia del algoritmo.

Para cada ocasión en que se cambien las variables que el algoritmo deba buscar, se deberán realizar variaciones mínimas en el script del DPL, como las ubicaciones de las variables en los sistemas de control o los rangos en que deberán estar comprendidas dichas variables.

La razón por la que se realizaron dos etapas donde en cada una se consideran parámetros similares como la búsqueda de las variables principales de los bloques y posteriormente la búsqueda de los límites de los bloques, es que no habría mucho sentido ni respuesta acertada si se buscara estas variables por separado, ya que, en un sistema lineal o realimentado las variables interactúan en el orden que se encuentren los bloques dentro del sistema de control a fin de dar una salida del sistema, lo que implica que las variables no trabajan de forma independiente y dependen del valor del resto de variables para obtener una respuesta del sistema. Es por eso que primero se trabaja en la sintonización del sistema con los valores dentro de los bloques y después se sintonizan los límites de estos bloques que tienen menor influencia en la respuesta final del sistema, pero que de igual forma deben ser considerados para hallar todos los valores con los que se encuentra operando el equipo en la realidad.

Las Figuras 5.28, 5.29 y 5.30 muestran las gráficas resultantes de la aplicación de la metodología propuesta en este trabajo y permiten realizar una comparación de las curvas de los datos medidos y la curva de datos simulados de cada fase una vez ingresados los valores de los parámetros hallados mediante el algoritmo PSO a lo largo de todo el proceso de sintonización, y que dieron los mejores resultados en el modelo del sistema de control AVR de la central térmica Esmeraldas II.

Para la fase A:

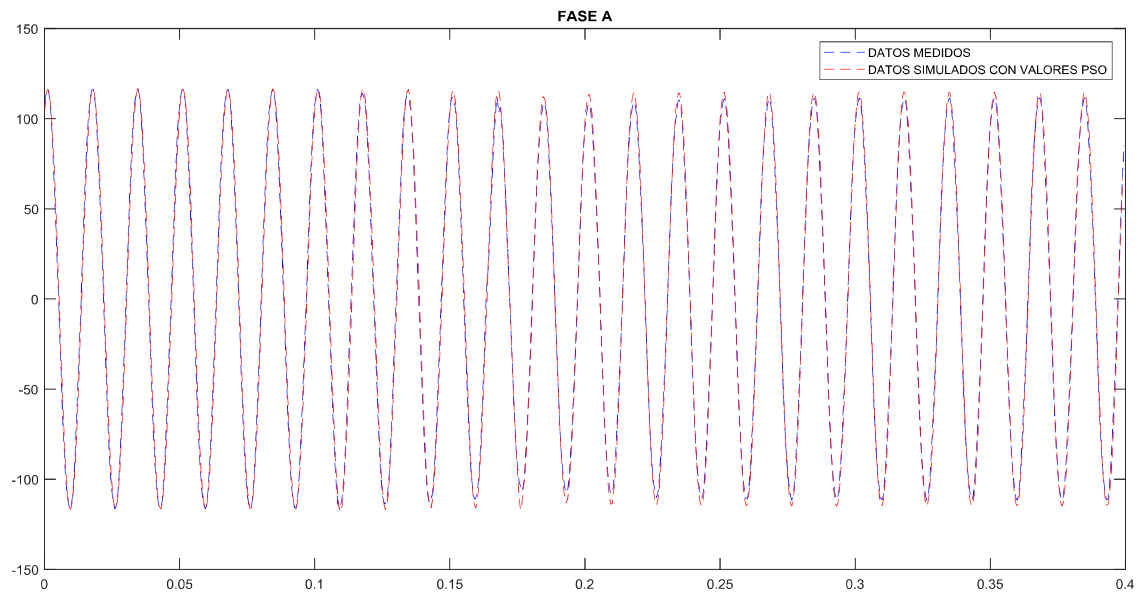


Figura 5.26. Curva de mediciones y curva de simulaciones usando los parámetros hallados en PSO de la fase "a".

Para la fase B:

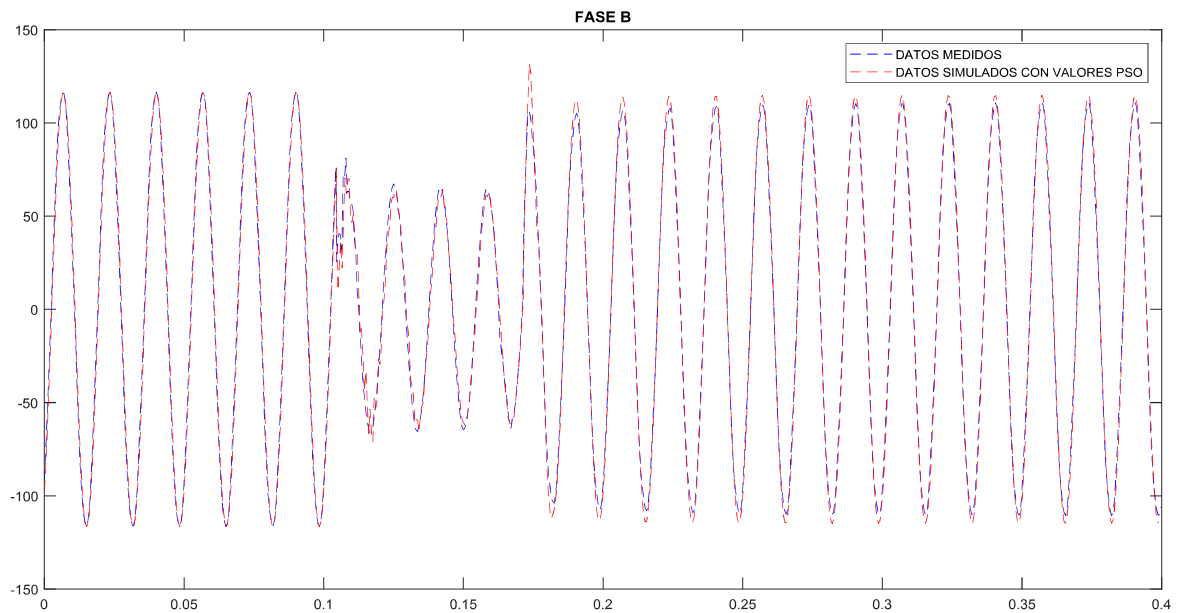


Figura 5.27. Curva de mediciones y curva de simulaciones usando los parámetros hallados en PSO de la fase "b".

Para la fase C:

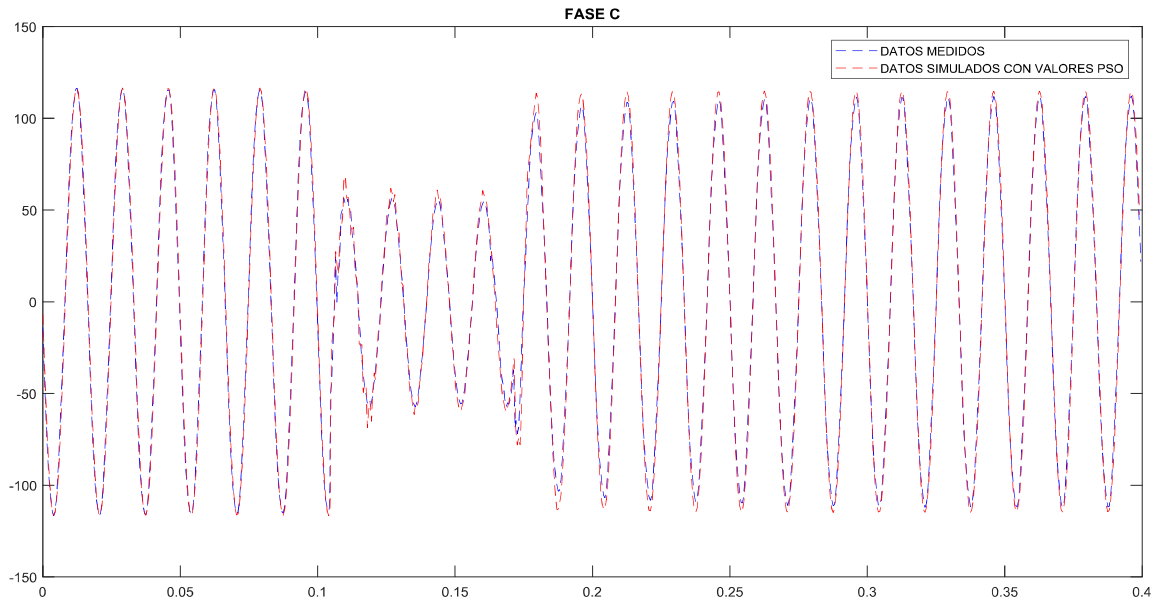


Figura 5.28. Curva de mediciones y curva de simulaciones usando los parámetros hallados en PSO de la fase "c".

Para poder apreciar de mejor manera como las curvas en rojo que representan los datos simulados con parámetros sintonizados asemejan su comportamiento con respecto a las curvas azules que representan los datos medidos y que son la referencia de sintonización, las siguientes figuras muestran un acercamiento del momento de ocurrencia y despeje de falla para las fases "b" y "c" de las Figuras 5.27 y 5.28 respectivamente.

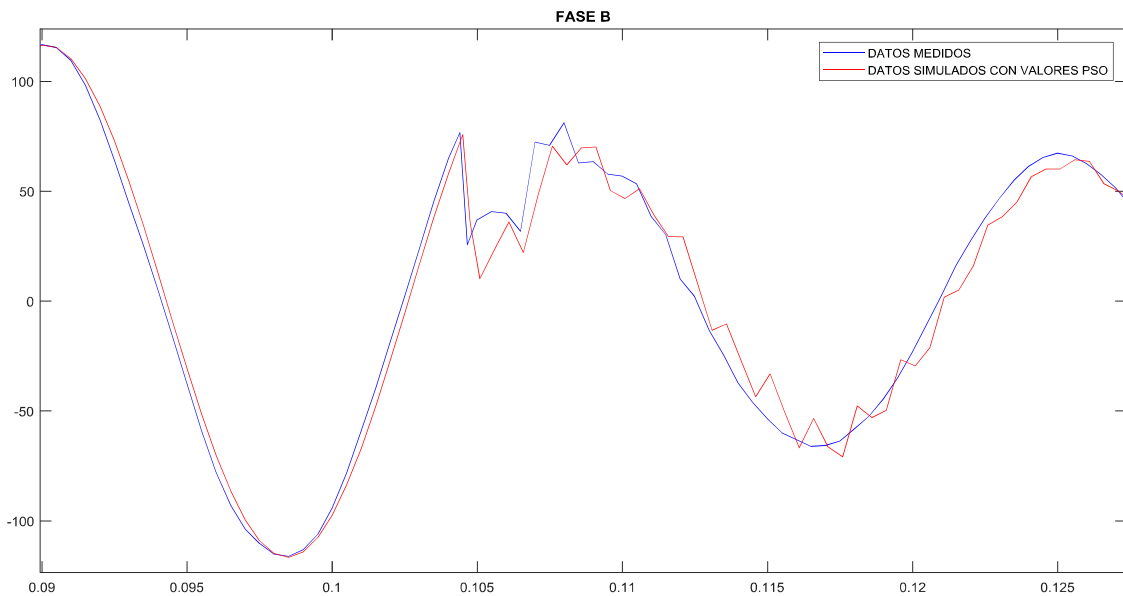


Figura 5.29. Momento de ocurrencia de la falla de la Figura 5.27 en la fase "b".

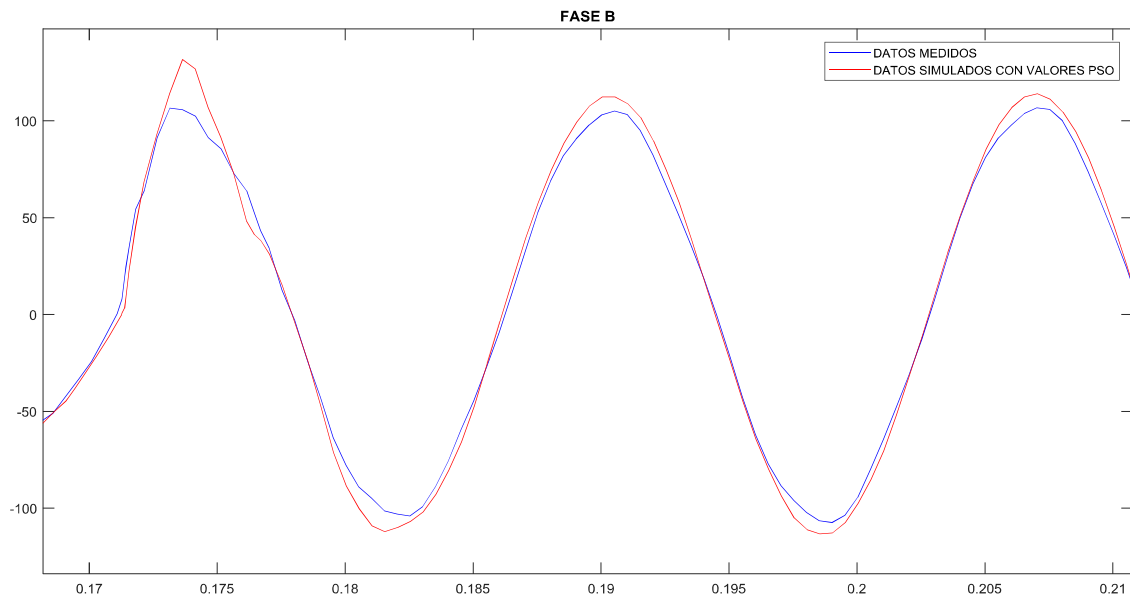


Figura 5.30. Momento de despeje de la falla de la Figura 5.27 en la fase “b”.

No se considera la fase “a” ya que sobre esta fase no ocurre ninguna falla ni despeje de la misma y lo único que siente es el efecto de la perturbación sobre las demás fases, por lo que sus cambios son mínimos y no representan un evento que pueda considerarse relevante.

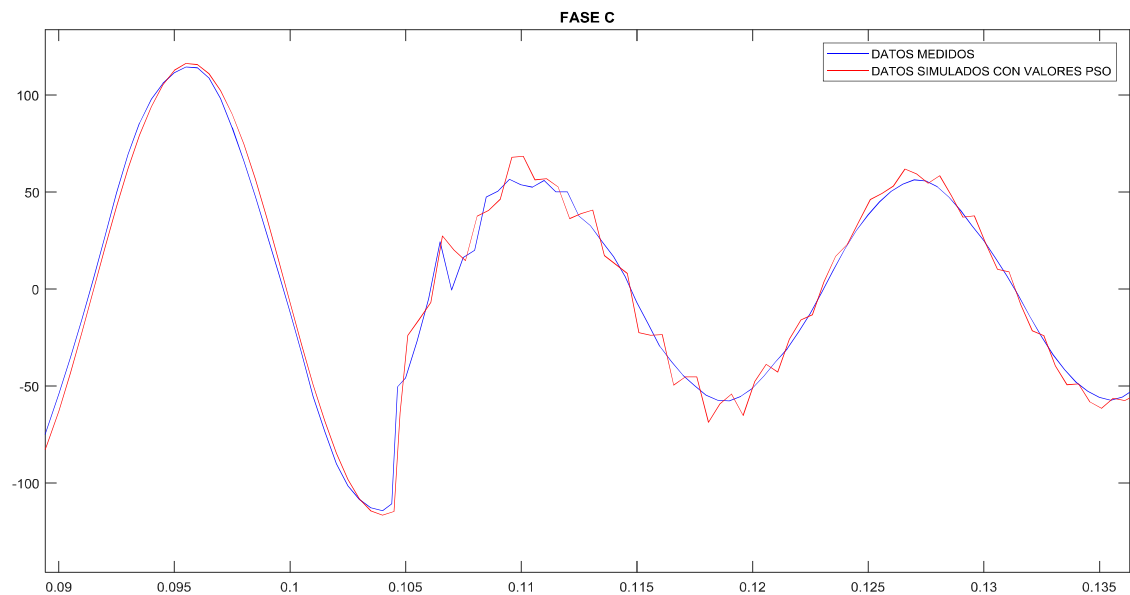


Figura 5.31. Momento de ocurrencia de la falla de la Figura 5.28 en la fase “c”.

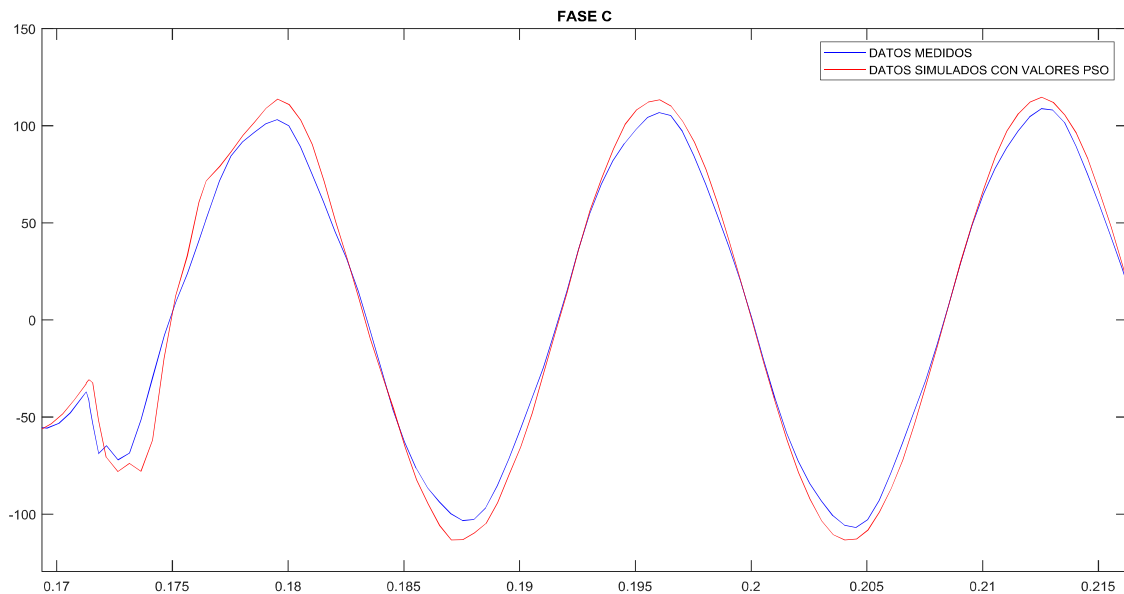


Figura 5.32. Momento de despeje de la falla de la Figura 5.28 en la fase “c”.

La Tabla 5.3 muestra los resultados de la aplicación del algoritmo PSO en la primera etapa, donde con los valores considerados inicialmente en la Tabla 4.7 para las variables de los bloques, el resultado de la función objetivo es de 123,535 724 403 en tanto que luego de ser aplicado el algoritmo la función objetivo pasa a ser de 119,929 432 013 con los nuevos valores hallados por el algoritmo.

Tabla 5.3. Resultados variables de bloques del AVR una vez aplicado PSO

Variable	Unidades	Valor Hallado	Descripción
KR	p.u.	99,981 743	Ganancia estática del AVR
TC2	s	0,02	Contante de tiempo del Lead-Lag 1
TB2	s	0,469 154	Contante de tiempo del Lead-Lag 2
TC1	s	0,012 3	Contante de tiempo del Lead-Lag 3
TB1	s	9,870 142	Contante de tiempo del Lead-Lag 4

La Tabla 5.4 muestra los resultados de la aplicación del algoritmo PSO en la segunda etapa, donde con los valores considerados inicialmente para los límites de los bloques el resultado de la función objetivo es de 119,929 432 013 y luego de ser aplicado el algoritmo la función objetivo pasa a ser de 118,110 006 187 con los nuevos valores hallados por el algoritmo.

Los resultados de estas dos etapas se encuentran resumidos en el anexo E donde se muestra las mejores partículas de cada proceso automático para las partículas creadas, mientras que el proceso y resultados completos se encuentran en Anexo E digital.

Tabla 5.4. Resultados de límites de bloques del AVR una vez aplicado PSO

Variable	Unidades	Valor Hallado	Descripción
Upmax	p.u.	1,5	Up+
Upmax_1	p.u.	2,351 752	Límite (Up+/KR/TC1*TB1)
Upmax_2	p.u.	1,556 372	Límite (Up+/KR)
Upmax_3	p.u.	1,502 122	Límite (Up+*Ut)
Limitier_max	p.u.	2,305 869	Limitador del valor máximo

Una consideración importante que se debe tomar en cuenta al momento de elegir las variables con las que trabajará el algoritmo, es que estas variables sean susceptibles a ser cambiadas o que no se conozca con certeza su valor pero sí el rango en el que se podrían encontrar. Existen parámetros que no pueden variar ya que representan características propias del equipo y por lo tanto no se toman en cuenta como variables, este es el caso de la constante de tiempo del filtro de medida “TR” y la constante de tiempo del convertidor de potencia y de la unidad de disparo “TS” cuyos valores vienen dados por el fabricante del equipo.

Se consideran como variables los valores de los bloques adelanto atraso, las ganancias estáticas, la influencia de señales eléctricas y/o provenientes de otros equipos, tensiones de los elementos, los límites de los bloques, etc. ya que su valor puede ser configurado, cambiado o tiene un rango en donde puede operar. Esto siempre y cuando el valor de las variables influya en la respuesta del sistema, ya que existen señales cuya ganancia es 0 por lo que no habría necesidad de considerarlas como es el caso de la influencia sobre el AVR de las potencias activas y reactivas.

El resultado final de la aplicación de la metodología, conjuntamente con el uso de la información que se presentó en el desarrollo de este trabajo, fueron los parámetros sintonizados del modelo del sistema de control AVR de la Figura 4.8 y cuyos valores de los parámetros ingresados en DlgSILENT PowerFactory fueron los que se encuentran en la Tabla 4.7. La Tabla 5.5 que se presenta a continuación contiene los valores iniciales y los valores sintonizados de los parámetros del AVR, para poder apreciar y comparar cuales parámetros fueron modificados y en qué medida por el algoritmo PSO el momento de su aplicación.

Tabla 5.5. Parámetros iniciales y sintonizados del modelo de AVR

Variable	Unidades	Valor Inicial	Valor Sintonizado	Descripción
TR	s	0,02	0,02	Constante de tiempo del filtro de la medida
TS	s	0,003	0,003	Constante del convertidor de potencia y de la unidad de disparo
KIR	p.u.	0	0	Influencia de la potencia reactiva
KIA	p.u.	0	0	Influencia de la potencia activa
KR	p.u.	10	99,981 743	Ganancia estática del AVR
TC2	s	0,02	0,02	Contante de tiempo del Lead-Lag 1
TB2	s	0,002	0,469 154	Contante de tiempo del Lead-Lag 2
TC1	s	0,1	0,012 300	Contante de tiempo del Lead-Lag 3
TB1	s	1	9,870 142	Contante de tiempo del Lead-Lag 4
Upmin	p.u.	0	0	Up-
Upmax	p.u.	2,5	1,5	Up+
Upmin_1	p.u.	0	0	Límite (Up-/KR/TC1*TB1)
Upmax_1	p.u.	2,5	2,351 752	Límite (Up+/KR/TC1*TB1)
Upmin_2	p.u.	0	0	Límite (Up-/KR)
Upmax_2	p.u.	0,25	1,556 372	Límite (Up+/KR)
Upmin_3	p.u.	0	0	Límite (Up-*Ut)
Upmax_3	p.u.	2,5	1,502 122	Límite (Up+*Ut)
Limiter_min	p.u.	0	0	Limitador del valor mínimo
Limiter_max	p.u.	2,5	2,305 869	Limitador del valor máximo

Los valores que se encuentran en rojo en la Tabla 5.5 representan los nuevos valores hallados mediante la aplicación de la metodología propuesta en el presente trabajo y que al momento serían los valores más confiables para ser usados en el modelo del sistema de control AVR, por haber partido de un modelo propuesto por fabricante y haber sintonizado sus parámetros con mediciones de campo para ajustar la respuesta del modelo establecido.

5.5 RESPUESTAS DEL SISTEMA DE CONTROL SINTONIZADO

Una vez aplicada la metodología y luego de haber encontrado los parámetros sintonizados del sistema de control AVR de la central termoeléctrica Esmeraldas II, se proceden a realizar pruebas que permitan observar y corroborar el correcto funcionamiento del sistema de control ante diversos tipos de eventos, haciendo énfasis en el análisis de las variables de los generadores sobre los que actúan los AVR, las variables internas del AVR y valores

de corrientes y voltaje de puntos cercanos a donde se produzca el evento según sea el caso.

Este análisis se lo realizará en el módulo RMS que tiene la ventaja de permitir simular grandes cantidades de tiempo para poder apreciar de mejor manera la respuesta del AVR ante alguna perturbación, y de igual forma resulta más sencillo apreciar las caídas o elevaciones en magnitudes de ciertas variables cuando se trabaja con valores medios cuadráticos que cuando se trabaja con valores instantáneos.

5.5.1 PRUEBA DE CORTO-CIRCUITO

Para este caso se ejecutará un corto-circuito trifásico en la L/T que conecta las subestaciones de Santo Domingo y Esmeraldas por ser las barras donde se conectan la red equivalente del sistema y la central termoeléctrica respectivamente. Se toma esta L/T debido a su importancia por ser un punto crítico del sistema equivalente al conectar directamente dos elementos sumamente importantes para el sistema estructurado como es la central de generación y el punto donde se representa el resto del SEP y también debido a su cercanía con la central y por ende con los sistemas de control, donde el evento que se simule tendrá más sensibilidad e influencia en las variables de los generadores y sus sistemas de control.

Se escogió un corto-circuito trifásico por ser el más representativo al involucrar las tres fases de la L/T, luego del cual 0,5 [s] después se abren los interruptores de la L/T para aislar la falla y despejarla, y finalmente pasado un segundo más se vuelven a cerrar los interruptores para que el SEP mediante sus sistemas de control intenten recuperar su estado de equilibrio en condiciones normales de operación en post-falla.

Las Figuras 5.33 y 5.34 muestran las variables principales provenientes del AVR que representan el voltaje de terminales y voltaje de referencia para la Figura 5.33 donde se aprecia los efectos de la perturbación y de cómo antes de 20 segundos luego del despeje de la misma el voltaje vuelve a alcanzar su valor de pre-falla; el voltaje de salida del AVR y que representa la respuesta de este sistema de control ante la perturbación se muestra en la Figura 5.34 en donde se puede observar como oscila durante la desconexión de la L/T y alcanza un valor poco mayor al que tenía en pre-falla; esta variable "uerrs" es el voltaje de excitación que actúa directamente en el generador.

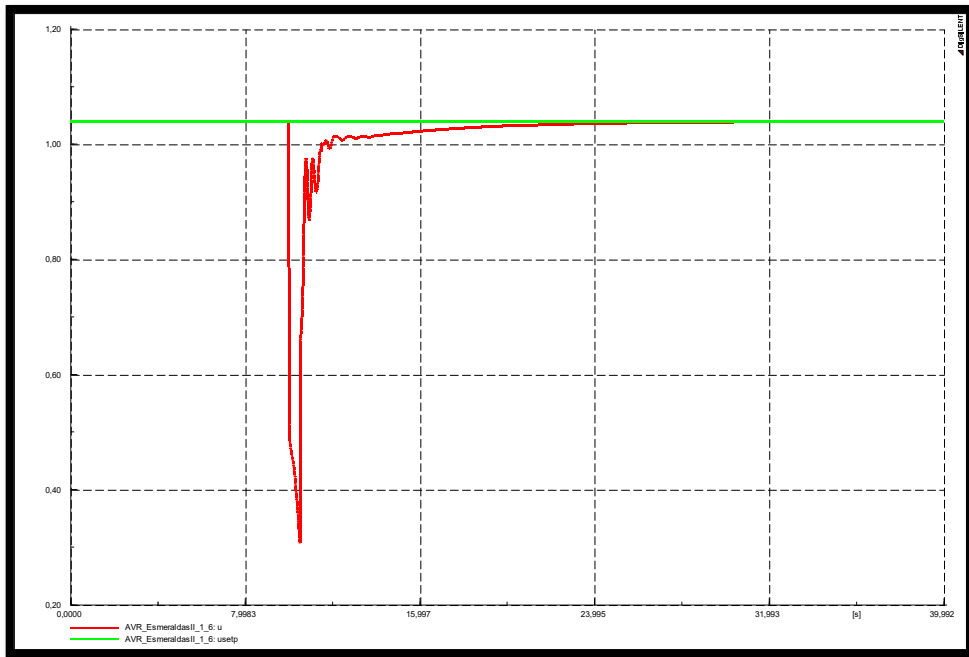


Figura 5.33. Voltaje de entrada y voltaje de referencia del AVR

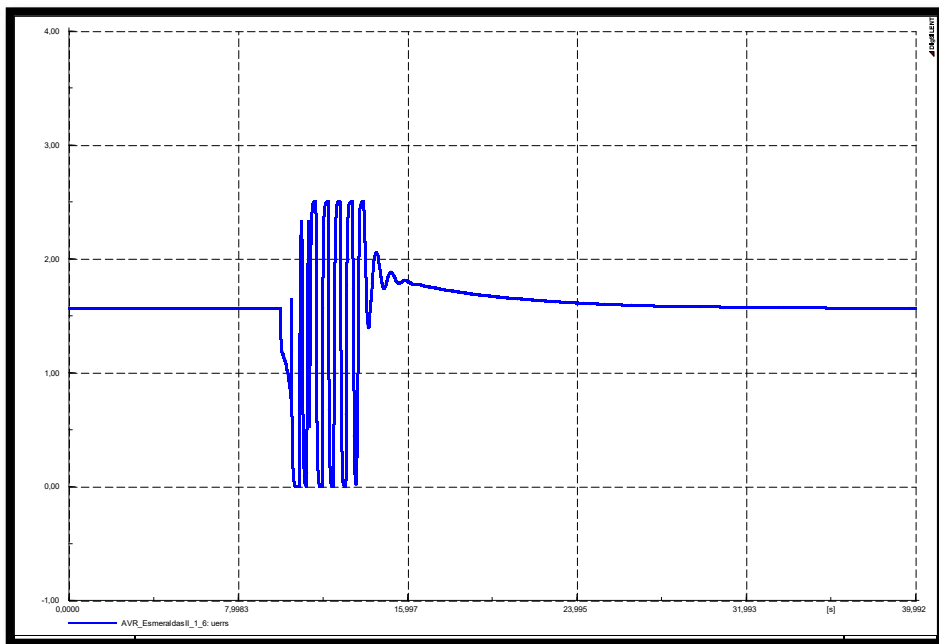


Figura 5.34. Señal de salida del AVR

La Figura 5.35 muestra como el voltaje en terminales del generador cae abruptamente al ocurrir la falla, luego de lo cual se recupera rápidamente al despejarse dicha falla donde su valor oscila por unos segundos y luego su crecimiento es casi lineal hasta recuperar su valor inicial; la potencia de la turbina apenas oscila en su valor al sentir la perturbación

en la L/T, pero no en una medida que pueda ser considerable por ser su respuesta mas lenta al tratarse del equipo mecánico del generador.

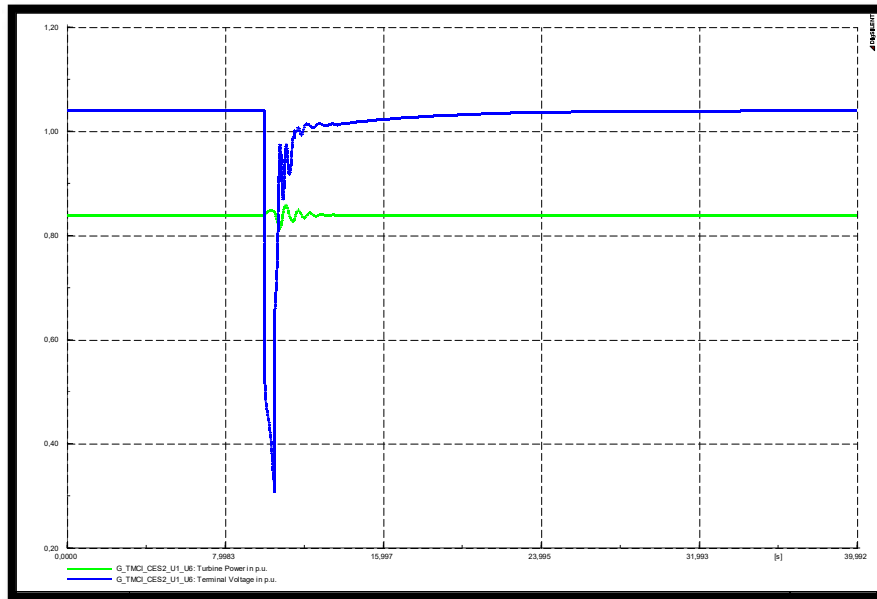


Figura 5.35. Voltaje de terminales y potencia de la turbina del generador

La Figura 5.36 muestra el comportamiento de las potencias activa y reactiva a la salida del generador que oscilan con valores elevados y considerables el momento de la falla por las descompensaciones que sufre el sistema en el flujo normal de la energía durante el evento, además de los aportes que pudieran producirse a dicha falla por los elementos del SEP.

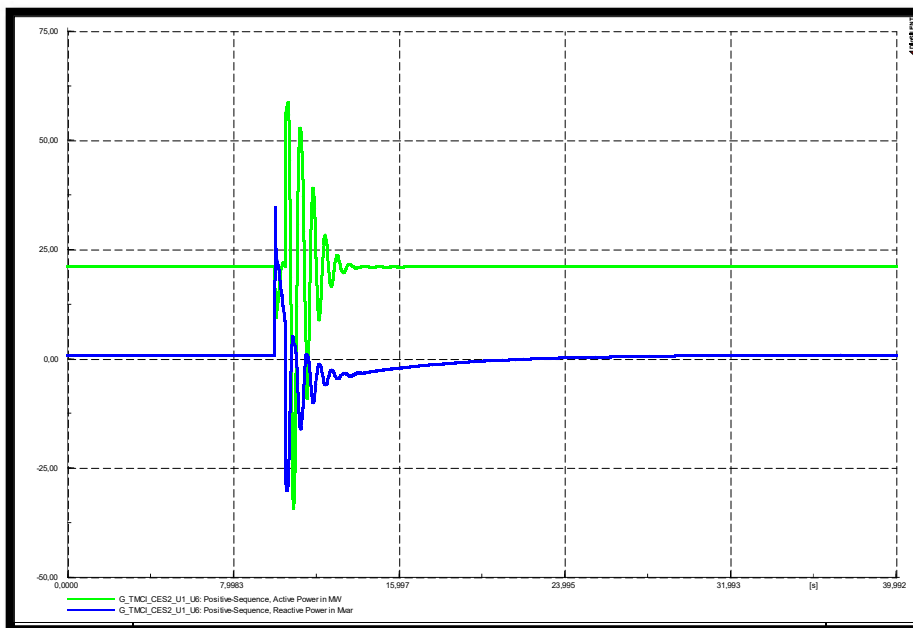


Figura 5.36. Potencia Activa y Potencia Reactiva entregada por el generador

La Figura 5.37 muestra un comportamiento parecido que las demás variables pero en el caso de la potencia eléctrica y la corriente de excitación donde el pico es más pronunciado y amplio, seguido de una oscilación amortiguada.

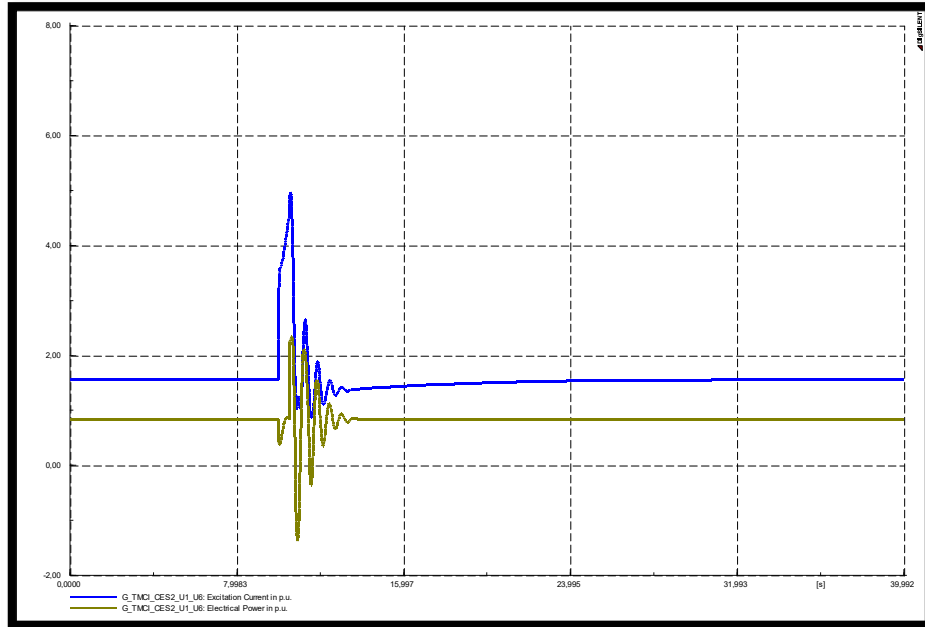


Figura 5.37. Potencia Eléctrica y Corriente de Excitación del generador

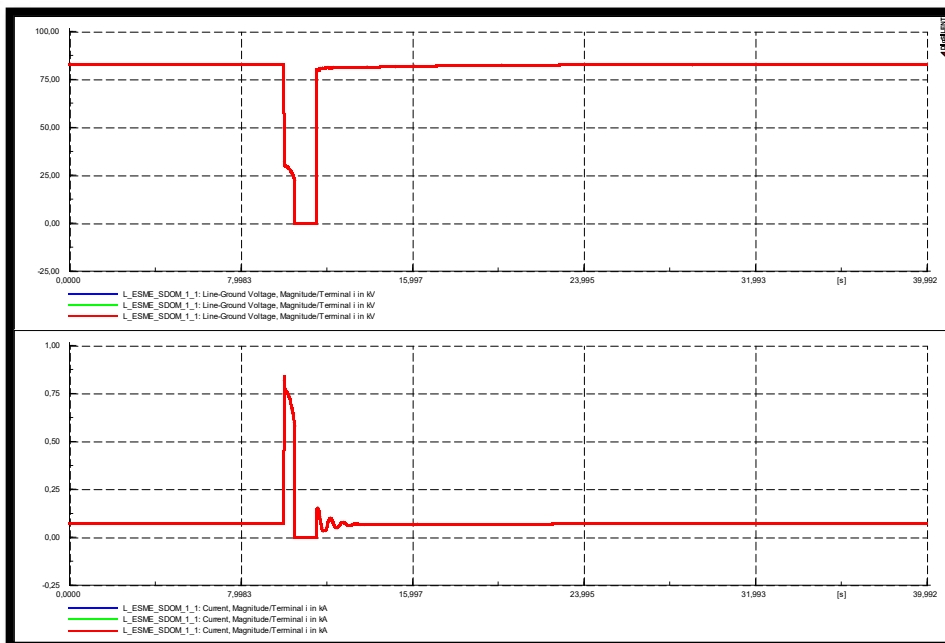


Figura 5.38. Voltaje y Corriente de la L/T en la que ocurre la perturbación.

La Figura 5.38 muestra los valores de voltaje y corriente en un extremo de la L/T donde se aprecia que se vuelven momentáneamente cero al desconectarse la línea y no existir energía que circule por la misma hasta reconectarla donde recupera rápidamente sus valores de pre-falla, es evidente el momento de la falla donde los voltajes caen rápidamente mientras la corriente crece hasta el instante en que se abren los interruptores de la L/T.

5.5.2 PRUEBA DE RECHAZO DE CARGA

Una prueba importante para ver el efecto del AVR ante una variación o evento en el sistema es realizar un cambio en las cargas conectadas, ya que los voltajes, potencias y otras variables se ven afectadas al cambiar la carga que se alimenta en el SEP y que causará una alteración en el estado de generación de las centrales que se encuentren operando.

En este caso se realiza la desconexión de la carga más importante que se encuentra conectada en la barra de Esmeraldas a 69 [kV], esto a los 10 [s] de iniciada la simulación y que da como resultado las siguientes figuras que se muestran a continuación de las variables más importantes como se presentó en el caso de la prueba de corto-circuito.

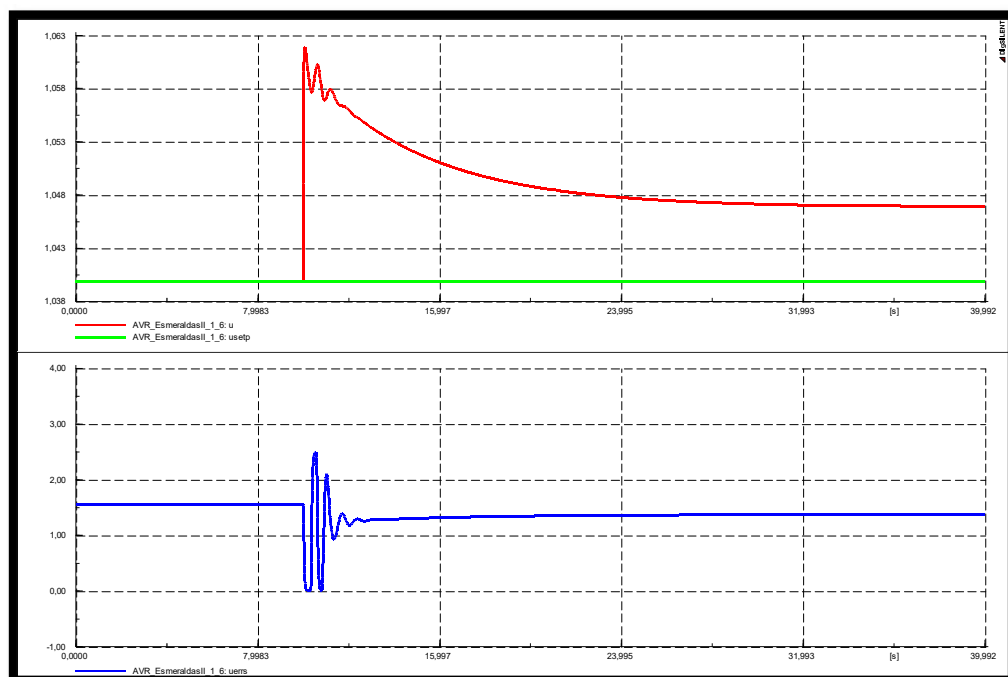


Figura 5.39. Voltaje de terminales, voltaje de referencia y salida del AVR.

La Figura 5.39 muestra como el voltaje terminal crece con respecto al voltaje de referencia y se estabiliza en un valor mayor al que tenía en pre-falla, mientras que el voltaje de

excitación oscila por el repentino cambio en la carga por un par de segundos y se estabiliza rápidamente en un nuevo valor que es menor al inicial.

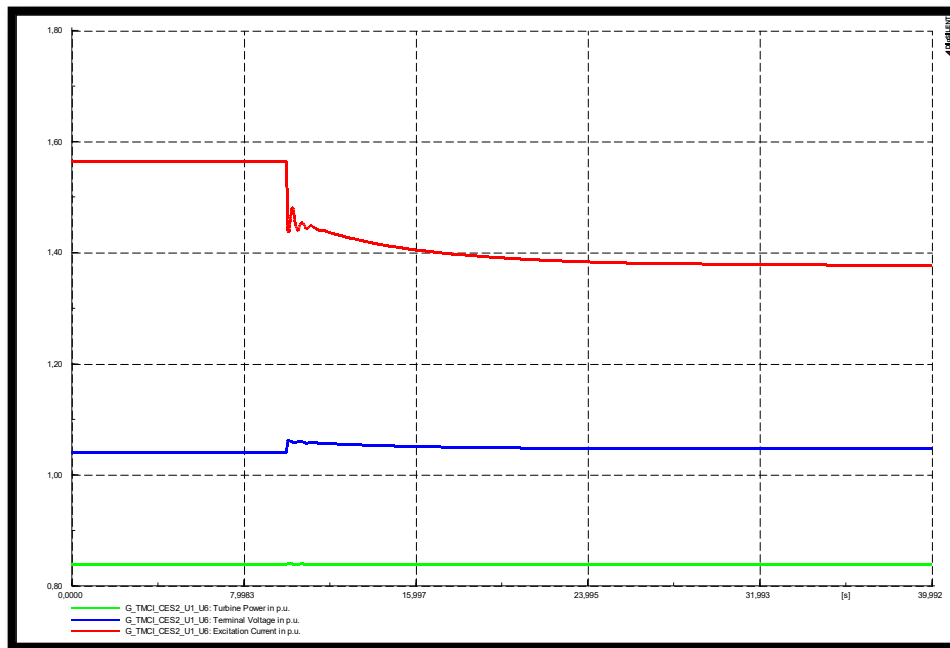


Figura 5.40. Voltaje terminal, corriente de excitación y potencia de turbina del generador.

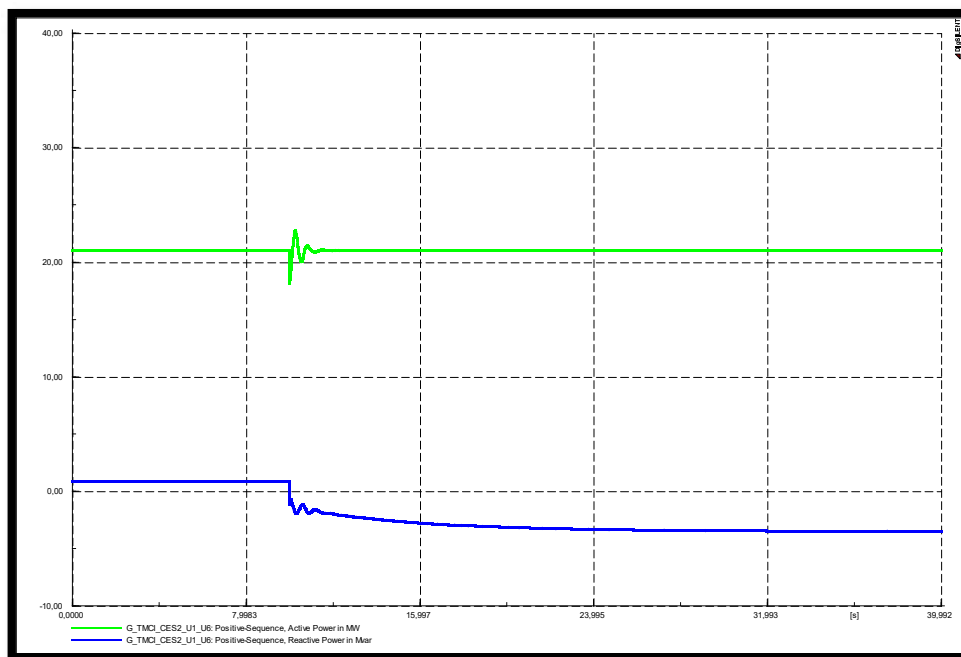


Figura 5.41. Potencia activa y potencia reactiva entregada por el generador.

Las Figuras 5.40 y 5.41 permiten observar como las variables pasan de un valor a uno nuevo con una oscilación menor debido al cambio abrupto en el estado del sistema, pero

que se estabiliza rápidamente en respuesta de un escalón de carga. El cambio más importante es el de la potencia reactiva que ahora en lugar de ser entregado es absorbido por la máquina de generación.

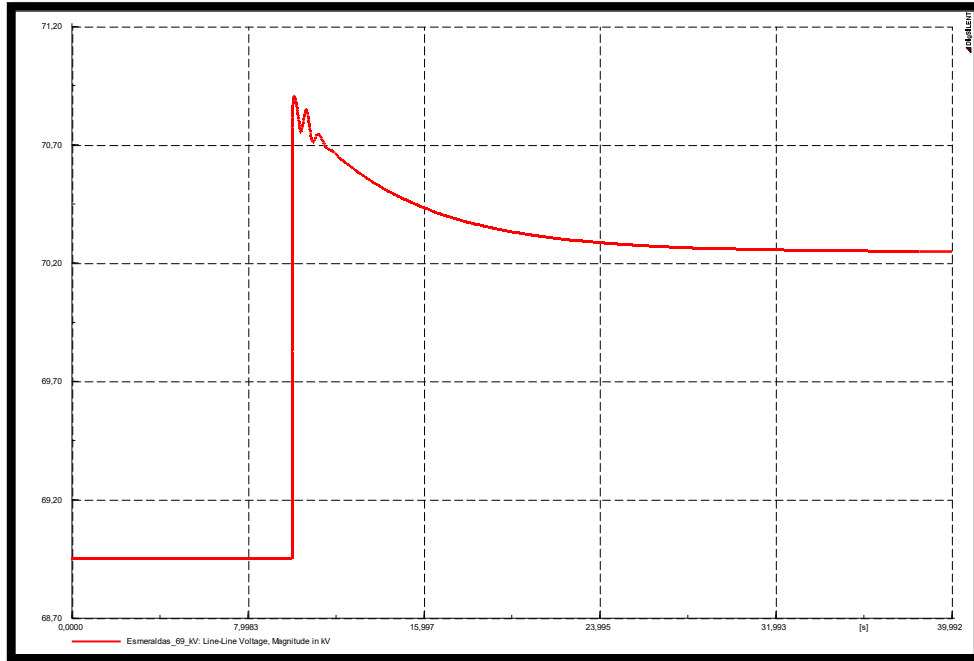


Figura 5.42. Voltaje de la barra Esmeraldas 69 [kV].

A diferencia del caso anterior de prueba de corto-circuito el sistema ahora busca un nuevo punto de operación diferente al inicial por haber cambiado el estado propio del sistema, en este caso los voltajes tienden a subir un porcentaje por la pérdida de carga que se debe abastecer, donde el pico inicial oscila no en gran medida y por un periodo corto de tiempo y luego desciende a su nuevo valor en cada uno de los nodos del sistema como se muestra en la Figura 5.42 para el caso de la barra donde se encontraba la carga que fue desconectada.

La rápida estabilización, pocas oscilaciones, y el encontrar puntos de operación que permiten mantener el sistema dentro de márgenes aceptables es la evidencia del correcto funcionamiento de los sistemas de control que se encuentran operando en la central termoeléctrica Esmeraldas II, y que brinda confianza en los resultados del modelo desarrollado en este trabajo e implementado en DIgSILENT PowerFactory.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

La aplicación del algoritmo meta-heurístico de enjambre de partículas (PSO), en base de la metodología propuesta en el presente trabajo permitió validar los modelos empleados para estructurar la red equivalente del SNI y sintonizar los parámetros de los modelos matemáticos del sistema de control AVR de la central térmica Esmeraldas II usando datos de mediciones de un evento ocurrido en el área de influencia eléctrica de la central.

Para la aplicación de la metodología detallada en el presente trabajo la central sobre la que se vaya a realizar la sintonización de sus modelos debe tener ciertas características como: estar conectada de manera radial al resto del sistema (lo cual ocurre en la mayoría de centrales de generación) a fin de poder considerar la isla eléctrica sobre la que se establecerá una red equivalente para el resto del sistema, que los eventos registrados ocurran en un punto entre la central y el nodo donde se colocará la red equivalente y que se cuenten con equipos de medición que registren los eventos que se produzcan en el área de influencia de la central y estén ubicados en lugares lo más cercanos posible a la misma.

La metodología del presente trabajo fue estructurada de tal manera que permita sintonizar los parámetros no solo del modelo del sistema de control AVR, sino de cualquier modelo matemático del cual se puedan ajustar sus variables, e incluso encontrar valores de parámetros de elementos que se encuentren en el sistema de potencia o eventos que ocurran en el mismo. Esto dependerá del tipo de información con la que se cuente y las posibilidades que brinde la herramienta computacional que se use para aplicar la metodología.

La diferencia reducida entre los valores medidos y los simulados representa un valor menor al 5% debido a que el error en las medidas es mayormente causado por el estado propio del sistema, ya que para recrear sus condiciones exactas se debía contar con una gran cantidad de información, misma que resulta muy complicado obtener ya que valores como cargas, generaciones, compensaciones, son valores dinámicos que varían constantemente. Es por ello que el ajuste de los modelos del AVR reduce una porción y no la totalidad de la función objetivo planteada debido a que también se necesita datos de un periodo considerable de tiempo para que los sistemas puedan responder ante cualquier eventualidad.

La sintonización de parámetros que se planteen realizar dependerá en gran medida del tipo de datos o información con que se cuente, ya que, para el caso de sistemas de control como el PSS o GOV, su respuesta es apreciable en simulaciones RMS, donde cuentan con el suficiente tipo de actuar ante variaciones, mientras que para simulaciones EMT el análisis post-falla se enfocará en cómo se comporta cada ciclo de onda por un periodo corto de tiempo luego de la perturbación mientras el sistema busca estabilizarse en un nuevo punto de operación. Es por ello que para futuras aplicaciones del trabajo resultaría más conveniente usar datos RMS donde se apreciaría de mejor manera las respuestas de los sistemas de control, y donde el cambio en sus parámetros tendría efectos más notorios que en cortos periodos de tiempo luego de alguna perturbación.

Existe una gran cantidad de algoritmos que permiten realizar el trabajo de sintonización de parámetros y optimización de problemas, la diferencia radica en el comportamiento y características que cada uno tiene al momento de resolver un problema, en este sentido algunos pueden ser más o menos idóneos dependiendo del espacio de búsqueda, los requerimientos computacionales o el tipo de problema que se plantea. Es por ello que se escogió el algoritmo PSO debido a que equilibra el costo computacional requerido, con una búsqueda exhaustiva que procura no estancarse en óptimos locales

6.2 RECOMENDACIONES

En lo posible se debe usar información actualizada y proveniente de fuentes confiables para estructurar la red equivalente con todos sus elementos, porque esto permitirá asegurar que las diferencias iniciales entre los datos obtenidos en mediciones y la información producto de las simulaciones no sea tan desproporcionada debido a la modelación misma del sistema.

Se recomienda el uso de otros algoritmos de optimización a fin de resolver el mismo problema y comparar sus resultados con los del algoritmo planteado en el presente trabajo con el objetivo de determinar si existen mejoras en las soluciones o encontrar algoritmos que se adapten de mejor manera a este tipo de problemas.

Considerar en el algoritmo valores adecuados para las simulaciones, ya que un gasto computacional más grande no asegura encontrar mejores resultados, esto especialmente para las partículas creadas y las generaciones de las mismas.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] L. Rodríguez, Análisis de estabilidad de tensión considerando sistemas de monitoreo de área amplia y características de cargas mixtas, Tesis Doctoral, Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Ingenierías Eléctrica, Electrónica, Física, y Ciencias de la Computación , Pereira, Colombia, 2004.
- [2] M.J. Gibbard, P. Pourbeik, D.J. Vowles, *Small-Signal Stability, Control and Dynamic Performance of Power Systems*, University of Adelaide press, 2015.
- [3] G. Palacios, Guía para modelado de estabilidad en Sistemas de Potencia, Tesis previa a la obtención del Título de Ingeniero Eléctrico, Universidad La Salle, Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Eléctrica, Bogota D.C., Colombia, 2017.
- [4] P. Kundur, N. J.Balu y M. G. Lauby, *Power System Stability and Control*, vol. 7, McGraw – Hill, New York, USA, 1994.
- [5] P.M. Anderson, A. A. Fouad, *Power System Control and Stability*, 1st ed, vol. 1 Piscataway, N.J., USA, John Wiley & Sons, 2008, cap.1.
- [6] G. Enríquez, *Análisis Moderno de Sistemas Eléctricos de potencia*, 1era Edición, Editorial LIMUSA, México, 1997, pp. 231.
- [7] P. Kundur ; J. Paserba ; V. Ajarapu ; G. Andersson ; A. Bose ; C. Cañizares ; N. Hatziargyriou ; D. Hill ; A. Stankovic ; C. Taylor ; T. Van Cutsem ; V. Vittal, "Definition and Classification of Power System Stability IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions," IEEE Trans. Power Syst., vol. 19, no. 3, pp. 1387–1401, Aug. 2004.
- [8] B. K. Kumar, *Power System Stability and Control*, Indian Institute of Technology Madras, National Programme on Technology Enhanced Learning, 2004.
- [9] W. S. Zimmermann, S. Hopp, M. Bondeur y D. N.Chen, "Transient stability study of the Hsin Yu Co-Generation Plant in Hsin-Chu Science Based Industrial Park in Taiwan", *In Conf. Power Engineering Society*, Singapur, Singapur, Jan. 23-27, 2000. pp. 2384 - 2389.

- [10] A. Greenwood y A. Selzer, *Electrical Transients in Power Systems*, Second Edition. Ed. John Wiley and Sons, INC. New York, USA, 1990.
- [11] A. L. Shenkman, *Transient Analysis of Electric Power Circuits Handbook*, Ed. Springer. Netherlands. 2005.
- [12] L. VAN DER SLUIS, *Transients in Power Systems*, Ed. John Wiley and Sons, England. 2001.
- [13] *DlgSILENT PowerFactory User Manual*, DlgSILENT GmbH, Gomaringen, Germany February, 2018.
- [14] L. Montalvo, Análisis de transitorios Electromagnéticos en la Energización de Elementos de Subtransmisión Utilizando el Programa DlgSILENT Power Factory, Tesis previa a la obtención del Título de Ingeniero Eléctrico, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica ,Quito, Agosto, 2010.
- [15] D. Santoliva, Redes Equivalentes De Sistemas Eléctricos De Potencia Para Estudios De Flujos De Carga Y Análisis De Contingencias, Tesis previa a la obtención del Título de Ingeniero Eléctrico, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica ,Quito, Mayo, 1983.
- [16] J. Rosales, Determinación de parámetros de regulador de tensión, regulador de velocidad y pss de unidades generadoras de central hidroeléctrica carena, Memoria para optar al Título De Ingeniero Civil Eléctrico, Universidad de Chile, Facultad De Ciencias Físicas Y Matemáticas Departamento De Ingeniería Eléctrica ,Santiago de Chile, Chile, 2016.
- [17] B. C. Kuo, *Sistemas de Control Automático*, Séptima Edición, Prentice Hall Hispanoamericana, México, 1996.
- [18] K. Ogata, *Ingeniería de Control Moderna*, Quinta Edición, Pearson Educación, Minnesota, USA, 2010.
- [19] *IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies*, IEEE Std 4215-2005, Revis. IEEE Std 4215-1992, 2006, pp. 1–85.
- [20] M. ULLAURI, Estructuración de una base de datos del S.N.I. Ecuatoriano en DlgSILENT Power Factory 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, Ecuador, 2015.

- [21] *Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas*, Intermediate Technology Development Group, ITDG-Perú, , Lima-Perú, 1995, pp. 30-58
- [22] *IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies*, IEEE Std 421.5-1992, IEEE Power and Energy Society. Abril, 2006.
- [23] N.Martins, y L.T.Lima, "Determination of Suitable Locations for Power System Stabilizers and Static VAR Compensators for Damping Electromechanical Oscillations in Large Scale Power Systems", *in Conf. Power Industry Computer-Application*, May. 1989, pp. 74-82.
- [24] F.Armendáriz y D. Panchi, Sintonización de los estabilizadores de sistemas de potencia del sistema nacional interconectado ecuatoriano – aplicación y comparación de métodos heurísticos en ambiente multimáquina, Tesis previa a la obtención del Título de Ingeniero Eléctrico, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Quito, Ecuador, 2017
- [25] R. Cruz, Modelamiento, Simulación y Sintonización del sistemas de protecciones eléctricas de la red de sub-transmisión de la provincia de Manabí, Tesis previa a la obtención del Título de Ingeniero Eléctrico, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Quito, Ecuador, 2018.
- [26] G. Cano, Estabilizadores De Sistemas Electricos De Potencia PSSs, Monografía como requisito para optar el titulo de Ingeniera Electricista, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Medellin, Colombia, 2009
- [27] L. Arcos e I. Flores, Análisis De Estabilidad Transitorio Del Sistema Nacional Interconectado Del Ecuador, Tesis previa a la obtención del Título de Ingeniero Eléctrico, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Quito, Ecuador, Enero, 2007.
- [28] W.L. Winston, J. B. Guelberg, "Investigación de Operaciones, Aplicaciones y Algoritmos", Grupo Editorial Iberoamericana, 1994.
- [29] 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 electricos de potencia, Universidad ANNA, Facultad de Ingeniería eléctrica y Electrónica, Chennai, India, Diciembre, 2011.

- [30] A. Kendell y K. E. Atkinson, *An introduction to numerical analysis*, 2da Ed., Cap. 8-9, John Wiley and Sons, USA, 1988.
- [31] N.P. Loomba, *Linear Programming: An introductory analysis*, McGraw-Hill, New York, USA, 1964.
- [32] O. Suarez, "Una aproximación a la heurística y metaheurísticas", INGE@ UAN- Tendencias en la Ingeniería, vol. 1, no 2, 2013.
- [33] D. MORILLO, L. MORENO y J. DÍAZ. "Metodologías analíticas y heurísticas para la solución del Problema de Programación de Tareas con Recursos Restringidos (RCPSP)": 2da Rev., Ingeniería y Ciencia, vol. 10, no 20, 2014, pp. 203-227.
- [34] YIN, Peng-Yeng; WANG, Jing-Yu. *A particle swarm optimization approach to the nonlinear resource allocation problem*, Applied mathematics and computation, Ed. Board, vol. 183, no 1, p. 232-242, 2006.
- [35] Y. Del Valle, G. K. Venayagamoorthy, S. Mohagheghi, J. C. Hernandez y R. G. Harley, "Particle swarm optimization: basic concepts, variants and applications in power systems". *IEEE Transactions on evolutionary computation*, vol 12, no 2, 2008, pp. 171-195.
- [36] B. Hassan y H. Takashi, *Intelligent automatic generation control*, CRC Press Taylor & Francis Group, University of Kurdistan, Kumamoto University, 2011.
- [37] J. SAN ISIDRO, "Proceso de Validación de Modelos de Simulación", Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, Madrid, España, Informes Técnicos, CIEMAT, 1998.
- [38] *IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies*, IEEE Std 421.5, (Revision of IEEE Std 421.5-1992), 2005
- [39] *2301D-ST Digital Electronic Load Sharing & Speed Control for Small Steam Turbines. Installation and Operation Manual*, Woodward, Collins CO, USA, 2011.
- [40] *Application of Fault and Disturbance Recording Devices for Protective System Analysis*,.IEEE Power System Relaying Committee Special Publication 87 TH 0195-8-PWR, 1987.

[41] *IEEE Standard Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for Power Systems*, IEEE Std C37.111-1999, 1999.

ANEXOS

ANEXO A. Información de los generadores de la central térmica Esmeraldas II

ANEXO B. Diagrama de Bloques AVR de la central térmica Esmeraldas II

ANEXO C. Algoritmo de Optimización de Enjambre de Partículas (PSO) desarrollado en Lenguaje DPL.

ANEXO D. Resultados de aplicar PSO para hallar los tiempos en que ocurre y se despeja la falla.

ANEXO E. Resultados de aplicar PSO para sintonizar los parámetros de los sistemas de control del AVR de la central térmica Esmeraldas II.

ANEXO A

Información de los generadores de la central térmica Esmeraldas II

1 PERFORMANCE DATA (Calculated values)

TYPE

Type designation: AMG 1120MP12 DSE

RATINGS

Output:	9823	kVA	Direction of rotation (Facing drive end):	CCW
Duty:	S1		Weight:	29000 kg
Voltage:	13800	V	Inertia:	3010 kgm ²
Current:	411	A	Protection by enclosure:	IP23
Power factor:	0,85		Cooling method:	IC0A1
Frequency:	60	Hz	Mounting arrangement:	IM1101
Speed:	600	rpm		
Overspeed:	720	rpm		

STANDARDS

Applicable standard:	IEC
Marine classification:	See notes
Hazardous area classification:	None
Temperature rise stator / rotor:	F/F
Insulation class:	F

ENVIRONMENTAL CONDITIONS (max. values)

Ambient temperature min/max:	5 / 50	°C	Altitude:	1000	masl
Coolant temperature:		°C			

ASSUMED DATA

Driving equipment:	Not Specified
Appr. mec. power:	8605 KW

EFFICIENCY in %, not guaranteed values

	load:	110 %	100 %	75 %	50 %	25 %
Efficiency @ power factor 0,85	97,00	97,05	97,02	96,54	94,44	
Efficiency @ power factor 1,00	97,73	97,74	97,66	97,22	95,39	

REACTANCES in %

XD (U):	178,7	XD' (S):	34,4	XQ'' (S):	24,0	X0 (U):	13,5
XQ (U):	91,9	XD'' (S):	21,3	X2 (S):	22,6	XP (S):	28,4
X1 (U):	17,0	(S) = Saturated value, (U) = Unsaturated value					

TIME CONSTANTS (SEC.) AT 75 °C

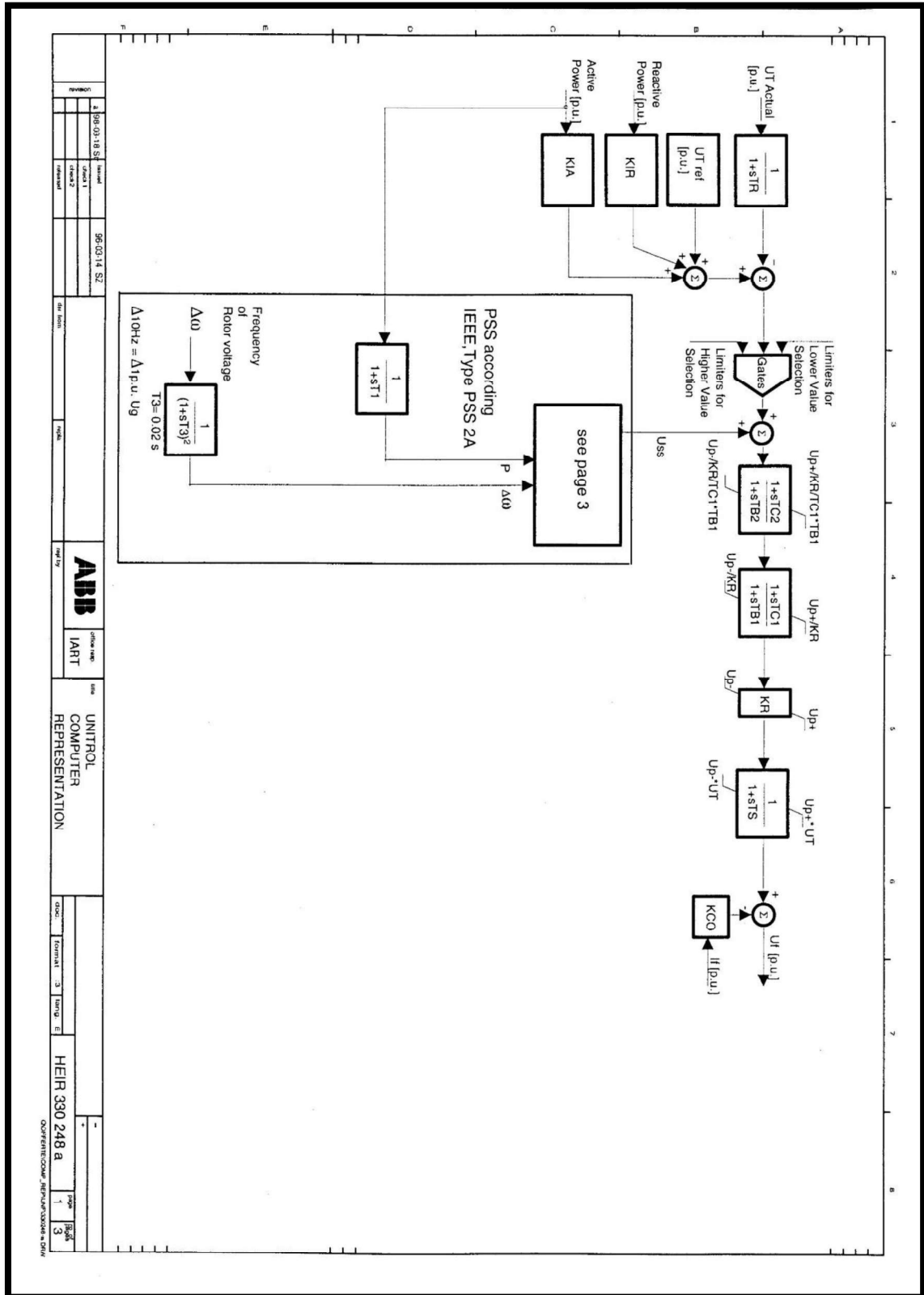
TD0':	5,910	TD':	1,250	TQ0'':	0,0774	TA:	0,102
TD0'':	0,02275	TD'':	0,01417	TQ'':	0,0222		

ABB	ABB Oy / Motors and Generators	Document identification	Lang.	Rev. ind.	Sheet
		3AFP 35536401	en	C	2

TEMPLATE: TECHNICALSPECIFICATION.DOT; FILENAME: DG_SQLGLOVE_3553HG401_ASDOC_3553HG_401_C_TECHSPEC.DOC; PRINTDATE: 6/7/2012 11:14:00 AM; SAVEDATE: 6/7/2012 11:11:00 AM

ANEXO B

Diagrama de Bloques AVR de la central térmica Esmeraldas II.



96-03-13 SZ	96-03-14 SZ	ABB	UNITROL COMPUTER REPRESENTATION	HEIR 330 248 A
96-03-13 SZ	96-03-14 SZ	ABB	UNITROL COMPUTER REPRESENTATION	HEIR 330 248 A
96-03-13 SZ	96-03-14 SZ	ABB	UNITROL COMPUTER REPRESENTATION	HEIR 330 248 A

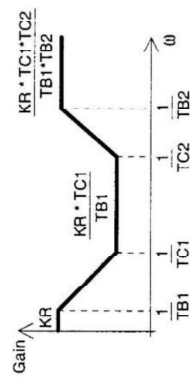
AVR-Settings

Parameter	Description	Units	Range	Proposed setting	Commissioning
TR	Measuring filter time constant	s	0.02	0.02	0.02
TS	Power converter and firing unit time constant	s	0.003	0.003	0.003
KR	Influence of reactive power	p.u.	-0.2...+0.2		
KIA	Influence of active power	p.u.	-0.2...+0.2		
KR	Static gain of AVR	p.u.	10...1000		
TC2, (Tb)	Lead-lag Stages time constant	s	0.02...2		
TB2	Lead-lag Stages time constant	s	(Vp/Vm)*TC2		
TC1, (Ta)	Lead-lag Stages time constant	s	0.01...10		
TB1	Lead-lag Stages time constant	s	(KFAVp)*TC1		
(Vp)	Proportional gain of AVR	p.u.	1...300		
Up	Up / UFG	p.u.			
Up	0.95...UpH	p.u.			
Up	Excitation system ceiling voltage	v			
UFG	No-load air gap field voltage	v			
UT	Generator terminal voltage	v			
UT ref	Reference value of generator terminal voltage	p.u.	0.9...1.1		
KCO	Voltage drop due to thyristors commutation	p.u.			

Reference to parameters

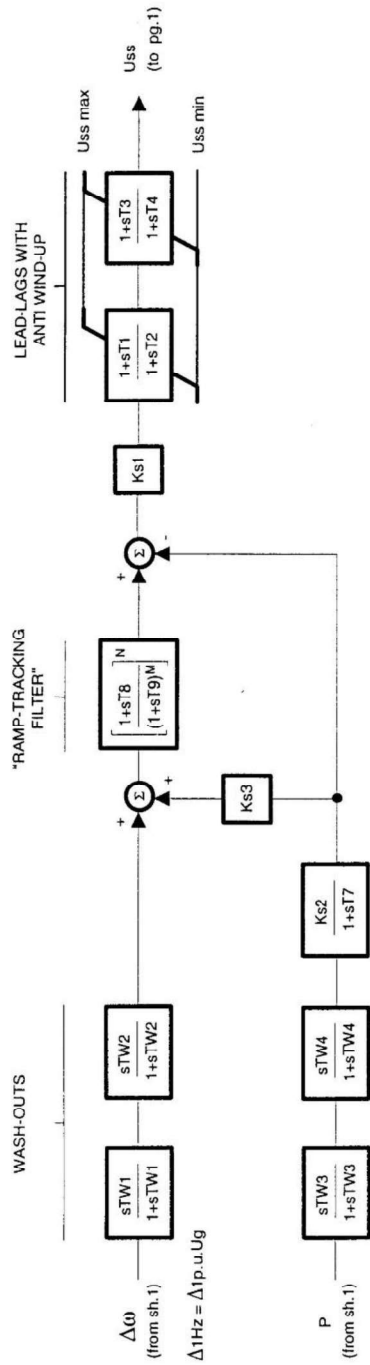
KR = DC_GAIN_AVR (1917)
 (KR*TC1)/TB1 = P_GAIN_AVR (1919)
 (KR*TC1*TC2)/(TB1*TB2) = HF_GAIN_AVR (1918)
 TB1 = (DC_GAIN_AVR/P_GAIN_AVR)*TC1
 TB2 = (P_GAIN_AVR/HF_GAIN_AVR)*TC2
 TC1 = TA1 (1920)
 TC2 = TB1 (1923)
 Up+ = CEILING FACTOR A (1916)
 KIR = Q DROOP/COMPENS (1909)
 KIA = P DROOP/COMPENS (1910)

Bode-Plot for AVR
(without measuring filter and gate control unit)



# 97-03-18-S4	Issued	97-03-05 BK	Unit	Item	Reviz.
Revision	check 1				
	check 2				
	revised				
ABB			ABB		
office resp.			IART		
title			UNITROL COMPUTER REPRESENTATION		
doc.			format: 3 lang: E		
HEIR 330 248 a			page 2 of 3		

Representation according to IEEE Model Type PSS 2A (Vol. IEEE Std.421.5-1992)



$\Delta 2p.u. (MVA) = \Delta 1p.u.Ug (at Ks1=1K)$

PSS-Settings

Parameter	Description	Units	Range	Proposed setting	Commissioning
Δf_0	Freq. deviation: fg intern to fg nom.	1/s	$\Delta 10Hz = \Delta 1p.u.Ug$		
P	Generator active power (related to MVA)	p.u.	$\Delta 2p.u. = \Delta 1p.u.Ug$		
Uss	Correcting Variable PSS	%	+/- p.u.Ug		
Uss max	Upper Limitation of Corr. Var. PSS	%	0.0006, 1p.u.Ug		
Uss min	Lower Limitation of Corr. Var. PSS	%	0.0006, 1p.u.Ug		
TW1, TW2	Wash-outs $\Delta \omega$ -signal	s	0.0, 1.65		
TW3, TW4	Wash-outs P-signal	s	0.0, 1.65		
T1, T3	Lead-lag Parameter	s	0.0, 0.0002, 12,8		
T2, T4	Lead-lag Parameter	s	0.0, 0.00008, 51,2		
KS1, KS3	Amplification factors	p.u.	0.0, 0.002, 128		
T7	Parameter P-filter	s	0.0, 1.65		
T8	Parameter "Ramp-Tracking Filter"	s	0.0, 0.0002, 12,8		
T9	Parameter "Ramp-Tracking Filter"	s	0.0, 0.0008, 51,2		
M	Integer of Filter-degree	i	2,5		
N	Integer of Filter-degree	i	1(opt.2)		

97-03-18 Sh	97-03-05 BK	UNITROL	COMPUTER REPRESENTATION	HEIR 330 248 a	page 3 of 3
check 1	check 2	checked	date	doc	format
97-03-18 Sh	97-03-05 BK	UNITROL	COMPUTER REPRESENTATION	HEIR 330 248 a	page 3 of 3

ANEXO C

Algoritmo de Optimización de Enjambre de Partículas (PSO) desarrollado en Lenguaje DPL.

```
!---PSO PARA SINTONIZACIÓN DE SISTEMAS DE CONTROL DE CENTRALES DE GENERACION-----
```

```
!-----WASHINGTON STALYN ALAVREZ ORBE-----
```

```
!DEFINICION DE VARIABLES
```

```
int i, j, k, ij, n, l, crt, Ncol, Nlin,ab, NcolA;  
double v_m,v_s,dife,dife_2, var, var1, varT, rnd, err, err1, err2,copia;  
double UpdateSpeed, ix, iy, z, a, b, c, c1, x, w, rnd1, valor;  
string str;
```

```
!INICIO DEL PROGRAMA
```

```
ClearOutputWindow();
```

```
n = nr_SisCon*y; !Definicion del vector tamaño de número de partículas en base al número de  
parametros de cada sistema de control
```

```
!INICIALIZACION DE MATRICES
```

```
Pop.Init (m, n);  
Particle.Init(1, n);  
Speeds.Init (m, n);  
UpdatedSpeeds.Init(m, n);  
Fobj.Init(1, m);  
PopFobj.Init(m, n+1);  
BestParticle.Init(nr_gen, n+1);  
GBest.Init(1, n+1);  
OptimoGlobal.Init(1, n+1);  
Clone.Init(m, n);  
PBest.Init(m, n);
```

```

Evolution.Init(nr_gen, n+1);
EvolucionA.Init(nr_automatas, n+1);
V_Simu.Init(Nlin ,Ncol);
V_Medi.Init(Nlin ,Ncol);
Dif_V.Init(Nlin,3);
Dif_2.Init(Nlin,3);
ERR_i.Init(1,3);

```

!FIN INICIO MTX

!LEER VALORES DE VOLTAJES DE FALLAS Y ALMACENARLOS EN UNA MATRIZ

```

xlStart();
xlOpenWorkbook('C:\Users\SEP_9\Desktop\VALORES\RESULTADOS-MATLAB-2018-OK');
for (j = 1; j <= FILAS; j = j+1){
    for (k = 1; k <= COLUMNAS; k = k+1){
        xlGetValue(k,j,valor);
        V_Medi.Set (j,k,valor);
    }
}
xlCloseWorkbook();
xlTerminate();

```

!FIN LEER DATOS DE CAMPO Y ALMACENARLOS EN MATRIZ V_Medi

!!

!!!!!!!!!!!! INICIA PROCESO ITERATIVO AUTOMATICO!!!!!!!!!!!!

!!

```

for (ab = 1; ab <= nr_automatas; ab = ab+1){
    printf('%s', '');
    printf('%s', '');
    printf('%s', '*****');
    printf('%s %d', 'EMPIEZA PROCESO AUOMATICO # =', ab);
}

```

```
printf('%s', '*****');
```

!SETEO DE LIMITES, GANACIAS Y CONSTANTES EN LA MATRIZ POP

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

! EN CASO DE CAMBIAR NUMERO DE PARAMETROS CAMBIAR EL 4 DE MATRIZ CLONADA Y EL 2 DE LAS Bs

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

!Carga los valores de los AVR's en la primera fila de Pop

```
copia=AVR_1:KR;
Pop.Set (1,1,copia);
copia=AVR_1:TC1;
Pop.Set (1,2,copia);
copia=AVR_1:TC2;
Pop.Set (1,3,copia);
copia=AVR_1:TB1;
Pop.Set (1,4,copia);
copia=AVR_1:TB2;
Pop.Set (1,5,copia);
copia=AVR_1:Limiter_max;
Pop.Set (1,6,copia);
copia=AVR_1:Upmax_1;
Pop.Set (1,7,copia);
copia=AVR_1:Upmax_2;
Pop.Set (1,8,copia);
copia=AVR_1:Upmax;
Pop.Set (1,9,copia);
copia=AVR_1:Upmax_3;
Pop.Set (1,10,copia);
```

!Genera valores aleatorios desde la segunda particula

```

for (i = 1; i <= n; i = i+1){
    for (j = 2; j <= m; j = j+1){
        rnd = Random(low_time_ALL, upper_time_ALL);
        Pop.Set (j, i, rnd);
    }
}
for (i = 1; i <= n; i = i+y){
    for (j = 2; j <= m; j = j+1){
        rnd = Random(low_gain_LIM, upper_gain_LIM);
        rnd = round(rnd);
        Pop.Set (j, i, rnd);
    }
}

for (i = 2; i <= n; i = i+y){
    for (j = 2; j <= m; j = j+1){
        rnd = Random(low_time_C1, upper_time_C1);
        Pop.Set (j, i, rnd);
    }
}

for (i = 3; i <= n; i = i+y){
    for (j = 2; j <= m; j = j+1){
        rnd = Random(low_time_C2, upper_time_C2);
        Pop.Set (j, i, rnd);
    }
}

for (i = 3; i <= n; i = i+y){
    for (j = 2; j <= m; j = j+1){
        for (k = 1; k <= 2; k = k+1){
            rnd = Random(low_time_B, upper_time_B);
            Pop.Set (j, i+k, rnd);
        }
    }
}

```

```
}  
}
```

!FIN DE SETEO DE LIMITES, GANACIAS Y CONSTANTES EN LA MATRIZ POP

!SETEAR VELOCIDADES DE LOS VECTORES

```
for (i = 1; i <= m; i = i+1){  
  for (j = 1; j <= n; j = j+1){  
    rnd = Random();  
    rnd1 = Random ();  
    if (rnd1 < 0.5) {  
      Speeds.Set (i, j, -rnd);  
    }  
    else {  
      Speeds.Set (i, j, rnd);  
    }  
  }  
}
```

!FIN SETEAR VELOCIDADES DE LOS VECTORES

```
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!  
!!!!!!!!!!!!!!PROCESO ITERATIVO GENERACIONAL!!!!!!!!!!!!  
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
```

```
for (ij = 1; ij <= nr_gen; ij = ij+1){  
  printf('%s', '');  
  printf('%s %d', 'INICIA GENERACION =', ij);
```

!TOMAR UNA PARTICULA PARA PRUEBA

```
for (j = 1; j <= m; j = j+1){  
    for (k = 1; k <= n; k = k+1){  
        a = Pop.Get (j, k);  
        Particle.Set (1,k, a);  
    }  
}
```

!FIN PARTICULA PRUEBA

!CARGAR LAS PARTICULAS EN LA INTERFAZ DE SISTEMAS DE CONTROL

!CORRE CONDICIONES INICIALES Y UNA SIMULACION EMT

```
AVR_1:KR = Particle.Get(1,1);  
AVR_1:TC1 = Particle.Get(1,2);  
AVR_1:TC2 = Particle.Get(1,3);  
AVR_1:TB1 = Particle.Get(1,4);  
AVR_1:TB2 = Particle.Get(1,5);  
AVR_1:Limiter_max = Particle.Get(1,6);  
AVR_1:Upmax_1 = Particle.Get(1,7);  
AVR_1:Upmax_2 = Particle.Get(1,8);  
AVR_1:Upmax = Particle.Get(1,9);  
AVR_1:Upmax_3 = Particle.Get(1,10);
```

```
AVR_2:KR = Particle.Get(1,1);  
AVR_2:TC1 = Particle.Get(1,2);  
AVR_2:TC2 = Particle.Get(1,3);  
AVR_2:TB1 = Particle.Get(1,4);  
AVR_2:TB2 = Particle.Get(1,5);  
AVR_2:Limiter_max = Particle.Get(1,6);  
AVR_2:Upmax_1 = Particle.Get(1,7);  
AVR_2:Upmax_2 = Particle.Get(1,8);  
AVR_2:Upmax = Particle.Get(1,9);  
AVR_2:Upmax_3 = Particle.Get(1,10);
```



```
EchoOff();
LDF.Execute();
INICIAL.Execute();
CORRER.Execute();
EchoOn();
```

```
!FINAL CARGAR LAS PARTICULAS EN LA INTERFAZ DE SISTEMAS DE CONTROL
!FIN DE CORRER LA SIMULACION EMT
```

```
!LEER VALORES PROPIOS DE RESULTADOS FILE Y ESCRIBIR EN LA MTX V_Simu
```

```
LoadResData(RESULTADOS);
Ncol = ResNvars(RESULTADOS);
Nlin = ResNval(RESULTADOS,0);
! printf('Ncol=%d Nlin=%d', Ncol, Nlin);
ix = 0;
while (ix < Nlin) {
    iy = 0;
    !GetResData(x, RESULTADOS, ix);
    !str = sprintf('%f =', x);
    while (iy < Ncol) {
        GetResData(x, RESULTADOS, ix, iy);
        V_Simu.Set(ix+1, iy+1, x);
        !str = sprintf('%s %8.5f ', str, x);
        iy += 1;
    }
    !printf('%s', str);
    ix += 1;
}
```

```
!FIN LEER VALORES PROPIOS DE RESULTADOS FILE Y ESCRIBIR EN LA MTX V_Simu
```

!OBTENER LAS DIFERENCIAS ENTRE VALORES REALES Y SIMULADOS PARA CADA PUNTO EN MATRIZ
DIF_V

```
for (i = 1; i <= Ncol; i = i+1){  
    for (k = 1; k <= Nlin; k = k+1){  
        v_m = V_Medi.Get (k,i+1);  
        v_s = V_Simu.Get (k,i);  
        dife= v_m-v_s;  
        Dif_V.Set (k,i,dife);  
    }  
}
```

!CALCULAR EL CUADRADO DE LAS DIFERENCIAS ENTRE VALORES REALES Y SIMULADOS EN Dif_2

```
for (i = 1; i <= Ncol; i = i+1){  
    for (k = 1; k <= Nlin; k = k+1){  
        dife = Dif_V.Get (k,i);  
        dife_2 = dife*dife;  
        Dif_2.Set (k,i,dife_2);  
    }  
}
```

!CALCULAR EL ERROR PROMEDIO DE CADA FASE AL SUMAR EL ERROR DE CADA PUNTO Y DIVIDIRLO
PARA EL NUMERO DE PUNTOS ALMACENADO EN LA MATRIZ ERR_i

```
for (i = 1; i <= Ncol; i = i+1){  
    err = 0;  
    err1 = 0;  
    for (k = 1; k <= Nlin; k = k+1){  
        err = Dif_2.Get (k,i);  
        err1 = err + err1;  
    }  
    err2 = err1/Nlin;  
    ERR_i.Set(1,i,err2);  
}
```

```
}
```

!EVALUACION DE CADA PARTICULA EN BASE A LA FUNCION OBJETIVO (Fobj vector)

```
for (i = 1; i <= 3; i = i+1){
```

```
    J1 = ERR_i.Get (1,i);
```

```
    J = J + J1;
```

```
}
```

```
printf('%s %d ... %s %d => %s %5.15f', 'Para la Generacion =', ij, ' con las Particulas =', j, ' la  
Función Objetivo es =', J);
```

```
Fobj.Set(1, j, J);
```

```
J1 = 0;
```

```
J = 0;
```

!FIN EVALUACION DE CADA PARTICUALA (Fobj vector)

```
} !DE TOMAR UNA PARTCILA DE CADA PARAMETRO
```

!SELECCION DE LA MEJOR PARTICULA

```
for (i = 1; i <= m; i = i+1){
```

```
    for (k = 1; k <= n; k = k+1){
```

```
        var = Pop.Get(i, k);
```

```
        PopFobj.Set(i, k, var);
```

```
    }
```

```
}
```

```
for (i = 1; i <= m; i = i+1){
```

```
    var = Fobj.Get(1, i);
```

```
    PopFobj.Set(i, n+1, var);
```

```
}
```

```
!PBest PRIMERA ITERACION
```

```
if (ij = 1){  
    for (i = 1; i <= m; i = i+1){  
        for (k = 1; k <= n+1; k = k+1){  
            var = PopFobj.Get(i, k);  
            PBest.Set(i, k, var);  
        }  
    }  
}
```

```
! !FIN PBest PRIMERA ITERACION
```

```
!ACTUALIZACION PBest
```

```
for (i = 1; i <= m; i = i+1){  
    var = PopFobj.Get(i, n+1);  
    var1 = PBest.Get(i, n+1);  
    if (var < var1){  
        for (k = 1; k <= n+1; k = k+1){  
            z = PopFobj.Get(i, k);  
            PBest.Set(i, k, z);  
        }  
    }  
}
```

```
!FIN ACTUALIZACION PBest
```

```
PopFobj.SortToColumn(n+1);  
for (k = 1; k <= n+1; k = k+1){  
    var = PopFobj.Get(1, k);  
    BestParticle.Set(ij, k, var);  
}
```

```
}
```

! !FIN SELECCION DE LA MEJOR PARTICULA

! EMPIEZA PROCESO DE ELITISMO

```
Ncol = BestParticle.NCol();
```

```
if (ij <= 1){
```

```
    for (i = 1; i <= Ncol; i = i+1){
```

```
        var = PopFobj.Get(1, i);
```

```
        GBest.Set(1, i, var);
```

```
    }
```

```
}
```

```
if (ij > 1){
```

```
    a = PopFobj.Get(1, Ncol);
```

```
    c = GBest.Get(1, Ncol);
```

```
    if (a < c){
```

```
        for (i = 1; i <= Ncol; i = i+1){
```

```
            var = PopFobj.Get(1, i);
```

```
            GBest.Set(1, i, var);
```

```
        }
```

```
    }
```

```
}
```

```
rnd = Random(1, m);
```

```
rnd = round(rnd);
```

```
for (k = 1; k <= n; k = k+1){
```

```
    var = GBest.Get(1, k);
```

```
    Pop.Set(rnd, k, var);
```

```
}
```

```
for (k = 1; k <= Ncol; k = k+1){
```

```
    var = GBest.Get(1, k);
```

```
    Evolution.Set(ij, k, var);
```

```
}
```

!FIN PROCESO DE ELITISMO

!CALCULO DE LAS NUEVAS VELOCIDADES DE LAS PARTICULAS

```
w = wmax - ((wmax - wmin)*ij)/nr_gen;
```

```
c1 = cmax - ((cmax - cmin)*ij)/nr_gen;
```

```
for (i = 1; i <= m; i = i+1){
```

```
    for (k = 1; k <= n; k = k+1){
```

```
        var = Speeds.Get(i, k);
```

```
        a = w*var;
```

```
        var = PBest.Get(i, k);
```

```
        var1 = Pop.Get(i, k);
```

```
        rnd = Random();
```

```
        b = c1*rnd*(var - var1);
```

```
        var = GBest.Get(1, k);
```

```
        rnd1 = Random();
```

```
        c = c2*rnd1*(var - var1);
```

```
        UpdateSpeed = a + b + c;
```

```
        UpdatedSpeeds.Set(i, k, UpdateSpeed);
```

```
    }
```

```
}
```

!FIN CALCULO DE LAS NUEVAS VELOCIDADES DE LAS PARTICULAS

!CALCULO DE LAS NUEVAS POSICIONES DE LAS PARTICULAS

```
for (i = 1; i <= m; i = i+1){
```

```
    for (k = 1; k <= n; k = k+1){
```

```
        a = Pop.Get(i, k);
```

```
        b = UpdatedSpeeds.Get(i, k);
```

```
        c = a + b;
```

```
        Pop.Set(i, k, c);
```

```
    }
```

```
}
```

!FIN CALCULO DE LAS NUEVAS POSICIONES DE LAS PARTICULAS

!COMIENZO PARA REEMPLAZAR Speeds=UpdatedSpeeds

```
for (i = 1; i <= m; i = i+1){  
    for (k = 1; k <= n; k = k+1){  
        a = UpdatedSpeeds.Get(i, k);  
        Speeds.Set(i, k, a);  
    }  
}
```

!FIN Speeds=UpdatedSpeeds

!COMIENZA COMPROBACION QUE LAS NUEVAS PARTICULAS ESTN DENTRO DE SUS RANGOS

!COMPROBAR QUE "KR" SE ENCUENTRE DENTRO DE LOS LIMITES

```
for (i = 1; i <= m; i = i+1){  
    for (k = 1; k <= n; k = k+y){  
        a = Pop.Get(i, k);  
        if (a < low_gain_LIM){  
            Pop.Set (i, k, low_gain_LIM);  
        }  
        if (a > upper_gain_LIM){  
            Pop.Set (i, k, upper_gain_LIM);  
        }  
    }  
}
```

!COMPROBAR QUE "TC1" SE ENCUENTRE DENTRO DE LOS LIMITES

```
for (i = 1; i <= m; i = i+1){  
    for (k = 2; k <= n; k = k+y){  
        a = Pop.Get(i, k);  
        if (a < low_time_C1){  
            Pop.Set (i, k, low_time_C1);  
        }  
    }  
}
```

```

    }
    if (a > upper_time_C1){
        Pop.Set (i, k, upper_time_C1);
    }
}
}

```

!COMPROBAR QUE "TC2" SE ENCUENTRE DENTRO DE LOS LIMITES

```

for (i = 1; i <= m; i = i+1){
    for (k = 3; k <= n; k = k+y){
        a = Pop.Get(i, k);
        if (a < low_time_C2){
            Pop.Set (i, k, low_time_C2);
        }
        if (a > upper_time_C2){
            Pop.Set (i, k, upper_time_C2);
        }
    }
}
}

```

!COMPROBAR QUE "B1" y "B2" SE ENCUENTRE DENTRO DE LOS LIMITES

```

for (i = 1; i <= m; i = i+1){
    for (k = 3; k <= n; k = k+y){
        for (l = 1; l <= 2; l = l+1){
            a = Pop.Get(i, k+l);
            if (a < low_time_B){
                Pop.Set (i, k+l, low_time_B);
            }
            if (a > upper_time_B){
                Pop.Set (i, k+l, upper_time_B);
            }
        }
    }
}
}

```



```
}  
}
```

!CLONAR MATRIZ Pop

```
for (i = 1; i <= m; i = i+1){  
  for (k = 1; k <= n; k = k+1){  
    a = Pop.Get(i, k);  
    Clone.Set (i, k, a);  
  }  
}
```

!TERMINA CLONACION DE MATRIZ Pop

!COMPROBRAR QUE TODOS LOS LIMITES SUPERIORES ESTEN DENTRO DE LOS RANGOS

```
for (i = 1; i <= m; i = i+1){  
  for (k = 1; k <= n; k = k+1){  
    b = Pop.Get(i, k);  
    if (b < low_time_ALL){  
      Pop.Set (i, k, low_time_ALL);  
    }  
    if (b > upper_time_ALL){  
      Pop.Set (i, k, upper_time_ALL);  
    }  
  }  
}
```

```
for (i = 1; i <= m; i = i+1){  
  for (k = 1; k <= n; k = k+y){  
    for (l = 0; l <= 4; l = l+1){  
      a = Clone.Get(i, k+l);  
      Pop.Set (i, k+l, a);  
    }  
  }  
}
```

```

    }
  }
}

```

!FINALIZA COMPROBACION QUE LAS NUEVAS PARTICULAS ESTN DENTRO DE SUS RANGOS

} !FIN DE PROCESO GENERACIONES ITERATIVAS

!!INICIO DEL REPORTE DE GENERACIONES

```

printf('%s', "");
printf('%s', "");
printf('%s %i %s', '*****TERMINADO PROCESO GENERACIONAL #', ab, '*****');
printf('%s', "");
printf('%s', "");
printf('%s', 'La Evolucion de la funcion objetivo fue:');
printf('%s', "");
Ncol = Evolution.NCol();
for (i = 1; i <= nr_gen; i = i+1){
    var = Evolution.Get(i, Ncol);
    printf('%5.15f', var);
}
printf('%s', "");
printf('%s', 'Los parametros Optimos para este conjunto de Generaciones fueron:');
printf('%s', "");
for (k = 1; k <= nr_SisCon; k = k+1){
    printf('%s %d %s', 'SISTEMAS DE CONTROL #', k, '=');
    a = 1+y*(k-1);
    b = a+y-1;
    for (i = a; i <= b; i = i+1){
        var = GBest.Get(1, i);
        printf('%s %f', ' ', var);
    }
}

```



```

printf('%s', 'Las minimas funciones objetivo de cada Proceso Automático fueron:');
printf('%s', "");

Ncol = Evolution.NCol();
for (i = 1; i <= nr_automatas; i = i+1){
    var = EvolucionA.Get(i, Ncol);
    printf('%s %d %s %10.15f', 'Para el Proceso Automático', i, 'el minimo fue', var);
}
printf('%s', "");
printf('%s', 'Los parametros Optimos Globales son:');
printf('%s', "");
for (k = 1; k <= nr_SisCon; k = k+1){
    printf('%s %d %s', 'SISTEMAS DE CONTROL #', k, '=');
    a = 1+y*(k-1);
    b = a+y-1;
    for (i = a; i <= b; i = i+1){
        var = OptimoGlobal.Get(1, i);
        printf('%s %f', ' ', var);
    }
    varT = OptimoGlobal.Get(1, Ncol);
    printf('%s %5.15f', 'Cuyo valor de Función Objetivo es: ', varT);
}

```

! TERMINA REPORTE DEL PROCESO COMPLETO AUTOMATICO

!CARGAR LOS PARAMETROS OPTIMOS ENCONTRADOS EN LOS SISTEMAS DE CONTROL PARA SIMULACIONES Y COMPROBACIONES

```

for (k = 1; k <= n; k = k+1){
    a = OptimoGlobal.Get (1, k);
    Particle.Set (1,k, a);
}

```

```
AVR_1:KR = Particle.Get(1,1);
AVR_1:TC1 = Particle.Get(1,2);
AVR_1:TC2 = Particle.Get(1,3);
AVR_1:TB1 = Particle.Get(1,4);
AVR_1:TB2 = Particle.Get(1,5);
AVR_1:Limiter_max = Particle.Get(1,6);
AVR_1:Upmax_1 = Particle.Get(1,7);
AVR_1:Upmax_2 = Particle.Get(1,8);
AVR_1:Upmax = Particle.Get(1,9);
AVR_1:Upmax_3 = Particle.Get(1,10);
```

```
AVR_2:KR = Particle.Get(1,1);
AVR_2:TC1 = Particle.Get(1,2);
AVR_2:TC2 = Particle.Get(1,3);
AVR_2:TB1 = Particle.Get(1,4);
AVR_2:TB2 = Particle.Get(1,5);
AVR_2:Limiter_max = Particle.Get(1,6);
AVR_2:Upmax_1 = Particle.Get(1,7);
AVR_2:Upmax_2 = Particle.Get(1,8);
AVR_2:Upmax = Particle.Get(1,9);
AVR_2:Upmax_3 = Particle.Get(1,10);
```

```
LDF.Execute();
INICIAL.Execute();
CORRER.Execute();
```

!FIN DE LA SIMULACION EMT CON LOS PARMETROS OPTIMOS

!FIN DEL PROGRAMA

ANEXO D

Resultados de aplicar PSO para hallar los tiempos en que ocurre y se despeja la falla.

*****TERMINADO PROCESO GENERACIONAL # 1 *****

La Evolucion de la funcion objetivo fue:

164,004798470759084
164,004798470759084
164,004798470759084
164,004798470759084
164,004798470759084
164,004798470759084
164,004798470759084
164,004798470759084
158,439889299886858
135,160582043490081
135,160582043490081
135,160582043490081
135,160582043490081
135,160582043490081
135,160582043490081
135,160582043490081
135,160582043490081
135,160582043490081
135,160582043490081
134,064245418316062
134,064245418316062
134,064245418316062
134,064245418316062
130,055018699909169
130,055018699909169
130,055018699909169
130,055018699909169
130,055018699909169
129,610634658114805
129,610634658114805
129,610634658114805
129,610634658114805
129,610634658114805
129,610634658114805
129,610634658114805
129,610634658114805
129,610634658114805

119.929437989542834
119.929437989542834
119.929437989542834
119.929437989542834
119.929437989542834
119.929437989542834
119.929437989542834
119.929437989542834
119.929437989542834
119.929437989542834
119.929437989542834
119.929437851980992
119.929437851980992
119.929437851980992
119.929437851980992
119.929437851980992
119.929437851980992
119.929437851980992
119.929437851980992
119.929437851980992
119.929437851980992
119.929432013748567
119.929432013748567
119.929432013748567
119.929432013748567
119.929432013748567
119.929432013748567
119.929432013748567
119.929432013748567
119.929432013748567
119.929432013748567
119.929432013748567

<3 <3 <3 PROCESO DE OPTIMIZACION TERMINADO <3 <3 <3

Los parametros Optimos para este conjunto de Generaciones fueron:

SISTEMAS DE CONTROL # 1 =

99.981743

0.012300

0.020000

9.870142

0.469154

Cuyo valor de Función Objetivo es: 119.929432013748567

*****TERMINADO PROCESO GENERACIONAL # 26 *****

-PARA LOS LÍMITES DE LOS BLOQUES DEL AVR

EMPIEZA PROCESO AUTOMATICO # = 23

La Evolucion de la funcion objetivo fue:

118.157250625734790

118.157250625734790

118.157250625734790

118.157250625734790

118.157250625734790

118.157250625734790

118.157250625734790

118.157250625734790

118.157250625734790

118.157250625734790

118.157250625734790

118.157250625734790

118.157250625734790

118.157250625734790

118.114443111874706
118.114443111874706
118.114443111874706
118.114443111874706
118.114443111874706
118.114443111874706
118.114443111874706
118.114443111874706
118.114443111874706
118.114443111874706
118.114443111874706
118.114443111874706
118.114443111874706
118.114443111874706
118.114443111874706
118.114443111874706
118.114443111874706
118.114443111874706
118.114443111874706
118.113915382776796
118.113407543146110
118.110942401156478
118.110942401156478
118.110942401156478
118.110942401156478
118.110562556844314
118.110240686468003
118.110240686468003
118.110235905230468
118.110213208048563
118.110061758769746
118.110061758769746
118.110061758769746
118.110061758769746
118.110061758769746
118.110061758769746
118.110061758769746
118.110061758769746
118.110061758769746
118.110053695003842
118.110049571351141
118.110030710886278
118.110025609281962
118.110018138603095
118.110018138603095
118.110018138603095
118.110013689481889
118.110013689481889
118.110011510447606

118.110006187022833
118.110006187022833
118.110006187022833
118.110006187022833

<3 <3 <3 PROCESO DE OPTIMIZACION TERMINADO <3 <3 <3

Los parametros Optimos para este conjunto de Generaciones fueron:

SISTEMAS DE CONTROL # 1 =

2.480233
2.351752
2.500000
1.500000
1.502122

Cuyo valor de Función Objetivo es: 118.110006187022833

*****TERMINADO PROCESO GENERACIONAL # 23 *****

ORDEN DE EMPASTADO