

**APLICACIÓN DEL CONTROL INTELIGENTE EN EL
AMORTIGUAMIENTO DE OSCILACIONES USANDO
FACTS (STATCOM Y SVC)**

ANDREA BEDOYA LONDOÑO

**Tesis presentada como requisito para optar al título de la
Maestría en Ingeniería Eléctrica**

**Director:
ALFONSO ALZATE GÓMEZ M.Sc.**

**Pereira
2014**

**APLICACIÓN DEL CONTROL INTELIGENTE EN EL AMORTIGUAMIENTO
DE OSCILACIONES USANDO FACTS (STATCOM Y SVC)**

ANDREA BEDOYA LONDOÑO

Tesis de Maestría en Ingeniería Eléctrica

Director:

ALFONSO ALZATE GÓMEZ M.Sc.

**Universidad Tecnológica de Pereira
Facultad de Ingenierías
Programa de Ingeniería Eléctrica
Línea de investigación en Electrónica de Potencia
Pereira
2014**

Tabla de contenido

Índice de tablas	I
Índice de figuras	II
RESUMEN	V

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN	1
1.1. Planteamiento del problema	2
1.2. Objetivo de la tesis	3
1.2.1. Objetivo general	3
1.2.2. Objetivos específicos	3
1.3. Justificación	3
1.4. Estado del arte	5
1.4.1. Antecedentes	5
1.4.2. Sistemas Flexibles de Transmisión de CA – (FACTS)	6
1.4.3. Control inteligente de los dispositivos FACTS	10
1.5. Estructura de la tesis	11

Capítulo 2

MODELADO DEL SVC Y DEL STATCOM	13
2.1. Modelado de las características dinámicas del SVC	15
2.2. Modelado de las características dinámicas del STATCOM	19

Capítulo 3

CONTROL LÓGICO DIFUSO	26
3.1. Tipos de controladores difusos	27
3.2. Métodos de diseño de un controlador difuso	28
3.2.1. Diseño heurístico	28
3.2.2. Control difuso análogo a un PID	29

Capítulo 4

DESARROLLO DEL CONTROLADOR DE OSCILACIONES DEL STATCOM	30
4.1. Mecanismo de control del STATCOM	30

4.2. Implementación del control difuso del STATCOM, en MATLAB	31
4.3. Resultados de la implementación del control del STATCOM	37

Capítulo 5

DESARROLLO DEL CONTROLADOR DE OSCILACIONES DEL SVC	44
5.1. Mecanismo de control del SVC	44
5.1.1. Cálculo de los parámetros del POD utilizando el método de compensación de fase.	45
5.1.2. Diseño del control PI	47
5.2. Implementación del control difuso del SVC en MATLAB	49
5.3. Resultados de la implementación del control del SVC	51

Capítulo 6

AJUSTE DEL CONTROL DE OSCILACIONES DE TIPO DIFUSO DEL STATCOM Y DEL SVC, CON AG	56
6.1. Algoritmos genéticos (AG)	56
6.2. Estructura del algoritmo genético	57
6.3. Ajuste del controlador de oscilaciones de tipo difuso del STATCOM con AG	60
6.4. Resultados de la implementación del controlador difuso del STATCOM, ajustado con AG	62
6.5. Ajuste del controlador de oscilaciones de tipo difuso del SVC con AG	64
6.6. Resultados de la implementación del controlador difuso del SVC, ajustado con AG	66

Capítulo 7

AJUSTE DEL CONTROLADOR DE OSCILACIONES DE TIPO DIFUSO DEL STATCOM Y DEL SVC, CON PSO	69
7.1. Algoritmo de optimización por cúmulo de partículas (PSO)	69
7.1.1. Descripción del Algoritmo PSO	70
7.2. Ajuste del controlador de oscilaciones de tipo difuso del STATCOM con PSO	73
7.3. Resultados de la implementación del controlador de oscilaciones de tipo difuso del STATCOM, ajustado con PSO	74
7.4. Ajuste del controlador de oscilaciones de tipo difuso del SVC con PSO	77
7.5. Resultados de la implementación del controlador de oscilaciones de tipo difuso del SVC, ajustado con PSO	74

Capítulo 8

AJUSTE DEL CONTROLADOR DE OSCILACIONES DE TIPO DIFUSO DEL STATCOM Y DEL SVC, CON COA	80
8.1. Algoritmo de optimización caótica (COA)	80

8.1.1. Fundamentos de los sistemas caóticos.....	80
8.1.2. Estructura y descripción del algoritmo de optimización caótica.....	81
8.2. Ajuste del controlador de oscilaciones de tipo difuso del STATCOM, con COA.....	85
8.3. Resultados de simulación del controlador de oscilaciones de tipo difuso del STATCOM, ajustado con COA.....	86
8.4. Ajuste del controlador de oscilaciones de tipo difuso del SVC, con COA.....	88
8.5. Resultados de simulación del controlador de oscilaciones de tipo difuso del SVC, ajustado con COA.....	89

Capítulo 9

COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL STATCOM Y DEL SVC CON LOS DIFERENTES CONTROLES.....	92
9.1. Comparación de resultados de los métodos de ajuste del controlador de oscilaciones de tipo difuso del STATCOM.....	92
9.2. Comparación de resultados de los métodos de ajuste del controlador de oscilaciones de tipo difuso del SVC.....	93

Conclusiones, contribuciones y recomendaciones para trabajos futuros

Conclusiones.....	96
Contribuciones.....	97
Recomendaciones para trabajos futuros.....	97
BIBLIOGRAFÍA.....	98
APÉNDICE A.....	100
Lista de Símbolos.....	100
APÉNDICE B.....	102
Constantes de linealización del modelo Heffron-Phillips del sistema SMIB.....	102
APÉNDICE C.....	103
Constantes de linealización del sistema SMIB con STATCOM.....	103

Índice de tablas

Tabla 1. Reglas de Ziegler-Nichols.....	32
Tabla 2. Base de Reglas Difusas STATCOM.....	35
Tabla 3. Valores propios del sistema SMIB con STATCOM en condición de baja carga.....	37
Tabla 4. Parámetros de respuesta del sistema SMIB con STATCOM y control difuso, en baja carga.....	38
Tabla 5. Valores propios del sistema SMIB con STATCOM en condición de operación nominal.....	40
Tabla 6. Parámetros de respuesta del sistema SMIB con STATCOM y control difuso, condición nominal ...	41
Tabla 7. Valores propios del sistema SMIB con STATCOM en condición de sobrecarga.....	41
Tabla 8. Parámetros de respuesta del sistema SMIB con STATCOM y control difuso, en sobrecarga	42
Tabla 9. Base de Reglas Difusas SVC	50
Tabla 10. Valores propios del sistema SMIB con SVC en condición de baja carga	51
Tabla 11. Parámetros de respuesta del sistema SMIB con SVC y control difuso, en baja carga	52
Tabla 12. Valores propios del sistema SMIB con SVC en condición nominal	53
Tabla 13. Parámetros de respuesta del sistema SMIB con SVC y control difuso, en operación nominal.....	54
Tabla 14. Valores propios del sistema SMIB con SVC en condición de sobrecarga	54
Tabla 15. Parámetros de respuesta del sistema SMIB con SVC y control difuso, en sobrecarga.....	55
Tabla 16. Ganancias del control difuso del STATCOM ajustado con AG	61
Tabla 17. Parámetros de respuesta V_t del sistema SMIB con STATCOM y AG, en condición nominal	62
Tabla 18. Parámetros de respuesta V_t del sistema SMIB con STATCOM y AG, en sobrecarga.....	63
Tabla 19. Ganancias del control difuso del SVC ajustado con AG.....	65
Tabla 20. Parámetros de respuesta V_t del sistema SMIB con SVC y AG, en condición nominal.....	66
Tabla 21. Parámetros de respuesta V_t del sistema SMIB con SVC y AG, en sobrecarga	67
Tabla 22. Ganancias del control difuso del STATCOM ajustado con PSO	73
Tabla 23. Parámetros de respuesta V_t del sistema SMIB con STATCOM y PSO, en condición nominal	75
Tabla 24. Parámetros de respuesta V_t del sistema SMIB con STATCOM y PSO, en sobrecarga.....	76
Tabla 25. Ganancias del control difuso del SVC ajustado con PSO.....	77
Tabla 26. Parámetros de respuesta V_t del sistema SMIB con SVC y PSO, en condición nominal.....	78
Tabla 27. Parámetros de respuesta V_t del sistema SMIB con SVC y PSO, en sobrecarga	79
Tabla 28. Ganancias del control difuso del STATCOM ajustado con COA.....	85
Tabla 29. Parámetros de respuesta V_t del sistema SMIB con STATCOM y COA, en condición nominal.....	87
Tabla 30. Parámetros de respuesta V_t del sistema SMIB con STATCOM y COA, en sobrecarga	88
Tabla 31. Ganancias del control difuso del SVC ajustado con COA	89
Tabla 32. Parámetros de respuesta V_t del sistema SMIB con SVC y COA, en condición nominal	90
Tabla 33. Parámetros de respuesta V_t del sistema SMIB con SVC y COA, en sobrecarga.....	91
Tabla 34. Comparación métodos de ajuste del controlador de oscilaciones del STATCOM.....	92
Tabla 35. Comparación métodos de ajuste del controlador de oscilaciones del SVC	94

Índice de figuras

Figura 1: Condensador Serie Conmutado por Tiristor (TSSC).....	6
Figura 2: Condensador Serie Controlado por Tiristor (TCSC)	7
Figura 3: Compensador Serie de VAR Estático (SSVC).....	7
Figura 4: Reactor Controlado por Tiristor (TCR).....	7
Figura 5: Condensador Controlado por Tiristor (TSC)	7
Figura 6: Compensador de VAR Estático (SVC).....	8
Figura 7: Condensador Serie Controlado por Conmutación Forzada (FCSC).....	8
Figura 8: Compensador Serie Sincrónico Estático (SSSC).....	9
Figura 9: Compensador de VAR Estático Avanzado (STATCOM).....	9
Figura 10: Controlador de Flujo de Potencia Interlínea (IPFC).....	10
Figura 11: Controlador Unificado de Flujo de Potencia (UPFC).....	10
Figura 12: Sistema SMIB.....	13
Figura 13: Modelo linealizado del sistema SMIB.Heffron-Phillips.....	14
Figura 14: SMIB con SVC.....	15
Figura 15: Modelo del SVC planteado	16
Figura 16: Modelo linealizado del sistema SMIB con SVC.....	19
Figura 17: Circuito equivalente del STATCOM.....	20
Figura 18: STATCOM instalado en un sistema SMIB.....	20
Figura 19: Modelo linealizado del sistema SMIB con STATCOM.....	25
Figura 20: Estructura general del control difuso.....	27
Figura 21: Estructura controlador difuso PID.....	27
Figura 22: Sistema SMIB con STATCOM y lazos Control.....	30
Figura 23: (a) Regulador de tensión DC con control PI, (b) Regulador de tensión DC con control difuso	31
Figura 24: Regulador de tensión AC con Control de amortiguación de oscilaciones.....	31
Figura 25: Función de Transferencia del SMIB con STATCOM.....	32
Figura 26: Respuesta con máxima acción proporcional.	32
Figura 27: Estructura Controlador difuso PI.....	33
Figura 28: Funciones de pertenencia del regulador de tensión DC.....	34
Figura 29: Funciones de pertenencia del regulador de tensión AC	34
Figura 30: Base de reglas difusas	35
Figura 31: Sistema SMIB con STATCOM y reguladores de tensión	36
Figura 32: Regulador de tensión DC con Control Difuso, implementado en Simulink.....	36
Figura 33: Regulador de tensión AC con Control Difuso como POD, implementado en Simulink.....	36
Figura 34: Respuesta de V_t en baja carga, ante un aumento del 10% en la tensión de referencia.....	38
Figura 35: Respuesta de P_e en baja carga ante un aumento del 10% en la tensión de referencia	39
Figura 36: Respuesta de V_t en baja carga ante un aumento del 1.5% en la Potencia mecánica	39
Figura 37: Respuesta de P_e en baja carga ante un aumento del 1.5% en la Potencia mecánica	40
Figura 38: Respuesta de V_t en carga nominal ante un aumento del 10% en la tensión de referencia.....	40
Figura 39: Respuesta de P_e en carga nominal ante un aumento del 1.5% en la Potencia mecánica	41

<i>Figura 40: Respuesta de V_t en sobrecarga ante un aumento del 10% en la tensión de referencia</i>	42
<i>Figura 41: Respuesta de P_e en sobrecarga ante un aumento del 1.5% en la Potencia mecánica</i>	43
<i>Figura 42: Controlador POD</i>	44
<i>Figura 43: Sistema SMIB con SVC y Control</i>	45
<i>Figura 44: Diagrama de bode del sistema con la ganancia ajustada</i>	46
<i>Figura 45: Diagrama de bode del sistema no compensado</i>	46
<i>Figura 46: Modelo Heffron Phillips con SVC y POD</i>	48
<i>Figura 47: Esquema SVC con Control Difuso</i>	49
<i>Figura 48: Funciones de pertenencia del control difuso del SVC</i>	50
<i>Figura 49: Base de reglas difusas del control del SVC</i>	51
<i>Figura 50: Respuesta de V_t en baja carga ante un aumento del 10% en la tensión de referencia</i>	52
<i>Figura 51: Respuesta de P_e en baja carga ante un aumento del 1.5% en la Potencia mecánica</i>	53
<i>Figura 52: Respuesta de V_t en carga nominal ante un aumento del 10% en la tensión de referencia</i>	53
<i>Figura 53: Respuesta de P_e en carga nominal ante un aumento del 1.5% en la Potencia mecánica</i>	54
<i>Figura 54: Respuesta de V_t en sobrecarga ante un aumento del 10% en la tensión de referencia</i>	55
<i>Figura 55: Respuesta de P_e en sobrecarga ante un aumento del 1.5% en la Potencia mecánica</i>	55
<i>Figura 56: Esquema del control basado en algoritmos genéticos</i>	56
<i>Figura 57: Diagrama de flujo del algoritmo genético simple</i>	59
<i>Figura 58: Modelo del regulador de tensión AC del STATCOM con la función ITSE</i>	60
<i>Figura 59: Respuestas de V_t sin STATCOM, con STATCOM+FUZZY y FUZZY +AG, en operación nominal ante un aumento del 10% en la tensión de referencia</i>	62
<i>Figura 60: Respuestas de P_e sin STATCOM, con STATCOM+FUZZY y FUZZY +AG, en carga nominal ante un aumento del 1.5% en la Potencia mecánica</i>	62
<i>Figura 61: Respuestas de V_t sin STATCOM, con STATCOM+FUZZY y FUZZY +AG, en sobrecarga ante un aumento del 10% en la tensión de referencia</i>	63
<i>Figura 62: Respuestas de P_e sin STATCOM, con STATCOM+FUZZY y FUZZY +AG, en sobrecarga ante un aumento del 1.5% en la Potencia mecánica</i>	64
<i>Figura 63: Modelo del control difuso PI del SVC con la función ITSE</i>	65
<i>Figura 64: Respuestas de V_t sin SVC, con SVC+FUZZY y FUZZY +AG, en operación nominal ante un aumento del 10% en la tensión de referencia</i>	66
<i>Figura 65: Respuestas de P_e sin SVC, con SVC+FUZZY y FUZZY +AG, en operación nominal ante un aumento del 1.5% en la Potencia mecánica</i>	66
<i>Figura 66: Respuestas de V_t sin SVC, con SVC+FUZZY y FUZZY +AG, en sobrecarga ante un aumento del 10% en la tensión de referencia</i>	67
<i>Figura 67: Respuestas de P_e sin SVC, con SVC+FUZZY y FUZZY +AG, en sobrecarga ante un aumento del 1.5% en la Potencia mecánica</i>	68
<i>Figura 68: V_t sin STATCOM, V_t con STATCOM +FUZZY y FUZZY +PSO, en operación nominal y ante un aumento del 10% en la tensión de referencia</i>	74
<i>Figura 69: P_e sin STATCOM, P_e con STATCOM +FUZZY y FUZZY +PSO, en operación nominal y ante un aumento del 1.5% en la Potencia mecánica</i>	75
<i>Figura 70: V_t sin STATCOM, V_t con STATCOM +FUZZY y FUZZY +PSO, en sobrecarga y ante un aumento del 10% en la tensión de referencia</i>	75
<i>Figura 71: P_e sin STATCOM, P_e con STATCOM +FUZZY y FUZZY +PSO, en sobrecarga y ante un aumento del 1.5% en la Potencia mecánica</i>	76
<i>Figura 72: V_t sin SVC, V_t con SVC+FUZZY y FUZZY +PSO, en operación nominal y ante un aumento del 10% en la tensión de referencia</i>	78
<i>Figura 73: P_e sin SVC, P_e con SVC+FUZZY y FUZZY +PSO, en operación nominal y ante un aumento del 1.5% en la potencia mecánica</i>	78

<i>Figura 74: V_t sin SVC, V_t con SVC+FUZZY y FUZZY +PSO, en sobrecarga y ante un aumento del 10% en la tensión de referencia.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 75: P_e sin SVC, P_e con SVC+FUZZY y FUZZY +PSO, en sobrecarga y ante un aumento del 1.5% en la potencia mecánica</i>	<i>79</i>
<i>Figura 76: Diagrama de flujo del algoritmo COA.</i>	<i>84</i>
<i>Figura 77: V_t sin STATCOM, V_t con STATCOM+FUZZY y FUZZY +COA, en operación nominal y ante un aumento del 10% en la tensión de referencia</i>	<i>87</i>
<i>Figura 78: P_e sin STATCOM, P_e con STATCOM +FUZZY y FUZZY +COA, en operación nominal y ante un aumento del 1.5% en la potencia mecánica.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 79: V_t sin STATCOM, V_t con STATCOM +FUZZY y FUZZY +COA, en sobrecarga y ante un aumento del 10% en la tensión de referencia.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 80: P_e sin STATCOM, P_e con STATCOM +FUZZY y FUZZY +COA, en sobrecarga y ante un aumento del 1.5% en la potencia mecánica</i>	<i>88</i>
<i>Figura 81: V_t sin SVC, V_t con SVC, +FUZZY y FUZZY +COA, en carga nominal y ante un aumento del 10% en la tensión de referencia.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 82: P_e sin SVC, P_e con SVC +FUZZY y FUZZY +COA, en carga nominal y ante un aumento del 10% en la tensión de referencia.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 83: V_t sin SVC, V_t con SVC +FUZZY y FUZZY +COA, en sobrecarga y ante un aumento del 10% en la tensión de referencia.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 84: P_e sin SVC, P_e con SVC+FUZZY y FUZZY +COA, en sobrecarga y ante un aumento del 1.5% en la potencia mecánica</i>	<i>91</i>
<i>Figura 85: Respuestas para V_t en condiciones de operación (a) nominal (b) sobrecarga. STATCOM con FUZZY, AG, PSO y COA, ante un aumento del 10% en la tensión de referencia</i>	<i>93</i>
<i>Figura 86: Respuestas para ω en condiciones de operación (a) nominal (b) sobrecarga. STATCOM con FUZZY, AG, PSO y COA, ante un aumento del 1.5% en la potencia mecánica</i>	<i>93</i>
<i>Figura 87: Respuestas para V_t en condiciones de operación (a) nominal (b) sobrecarga. SVC con FUZZY, AG, PSO y COA, ante un aumento del 10% en la tensión de referencia.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 88: Respuestas para ω en condiciones de operación (a) nominal (b) sobrecarga. SVC con FUZZY, AG, PSO y COA, ante un aumento del 1.5% en la potencia mecánica</i>	<i>94</i>
<i>Figura 89: Respuesta en condición de operación nominal para V_t del STATCOM con FUZZY, AG, PSO y COA, ante diferentes perturbaciones en la tensión de referencia.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 90: Respuestas en condición de operación nominal de (a) Velocidad del rotor ω (b) Potencia eléctrica P_e, del STATCOM con FUZZY, AG, PSO y COA. Ante diferentes perturbaciones en la potencia mecánica.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 91: Respuesta en condición de operación nominal para V_t del SVC con FUZZY, AG, PSO y COA, ante diferentes perturbaciones en la tensión de referencia.</i>	<i>95</i>
<i>Figura 92: Respuestas en condición de operación nominal de (a) Velocidad del rotor ω (b) Potencia eléctrica P_e, del SVC con FUZZY, AG, PSO y COA. Ante diferentes perturbaciones en la potencia mecánica.</i>	<i>95</i>

RESUMEN

En este trabajo se describe el desarrollo de un controlador de oscilaciones, tanto para el STATCOM como para el SVC, usando algunos métodos de control inteligente. Se presenta el desarrollo de un controlador difuso sintonizado con técnicas de optimización, tales como, AG, PSO y COA como una opción moderna que permite encontrar los mejores parámetros del control difuso aplicado a los dispositivos FACTS (STATCOM Y SVC), con el fin de lograr amortiguar las oscilaciones del sistema de potencia y con ello garantizar su operación dentro de un rango de estabilidad adecuada.

En primer lugar se propone el desarrollo del modelo de las características dinámicas del STATCOM y del SVC. Posteriormente, se diseña el controlador de oscilaciones de tipo difuso, para el STATCOM y para el SVC, haciendo su ajuste de ganancias de manera heurística. Luego, se usan las técnicas de optimización (AG, PSO y COA) para realizar nuevamente la sintonización de las ganancias del controlador difuso, con el fin de incrementar el amortiguamiento de las oscilaciones en el sistema de prueba.

Los métodos propuestos se prueban en un sistema SMIB con los dispositivos STATCOM y SVC incluidos independientemente.

Finalmente, con la ayuda de todos los datos recopilados, se formulan las conclusiones pertinentes, de las cuales, se hace énfasis en los aspectos más relevantes encontrados durante la investigación, se mencionan las desventajas o inconvenientes encontrados en la misma y se realizan recomendaciones para trabajos futuros.

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

El crecimiento de los sistemas eléctricos de potencia (SEP's) ha mostrado tanto limitantes técnicas como de operación, que hacen que las líneas de transmisión se carguen cerca a sus límites de estabilidad y se produzca un aumento en la aparición de las oscilaciones de baja frecuencia que impiden abastecer la demanda bajo condiciones de seguridad, calidad, estabilidad y confiabilidad [3,5]. Estas oscilaciones se presentan de modo local, modo interárea, modo interplanta, o modo control.

En el pasado la amortiguación de oscilaciones del SEP estaba a cargo de los estabilizadores PSS, sin embargo, se ha informado sobre algunos efectos oscilatorios de las condiciones de operación que el PSS no puede amortiguar [10,33]. Como consecuencia de esto, se acentúa el desarrollo de la industria electrónica, con dispositivos de transmisión flexible de corriente alterna (FACTS) que no sólo logran una disminución de pérdidas, sino también la amortiguación de las oscilaciones [1].

Dentro de este surgimiento de los dispositivos FACTS, se han estudiado el STATCOM y el SVC, que pueden ser utilizados para aumentar la flexibilidad y controlabilidad de operación, y para mejorar la estabilidad y la utilización de los sistemas existentes [2,6]. Estos estudios abarcan el uso y control del SVC (Static Var Compensator), y del STATCOM (Static synchronous Compensator) en amortiguamiento de oscilaciones.

Un control auxiliar comúnmente utilizado en los dispositivos FACTS, es el PI (proporcional integral); pero a pesar de la facilidad y la simplicidad de su diseño, su operación pierde valor cuando las condiciones del sistema varían extensamente o cuando ocurren grandes perturbaciones, por este motivo el control PI no es conveniente para el control de los dispositivos FACTS [3,4].

Por lo anterior, muchas técnicas de optimización modernas y de control inteligente de los dispositivos FACTS se han ido desarrollando, tales como: redes neuronales, sistemas de lógica difusa, algoritmos genéticos, optimización por enjambre de partículas y el templado simulado. Las aplicaciones de estas técnicas para algunos problemas en SEP's han entregado resultados promisorios, como se evidencia en los artículos [8, 59, 60, 69].

El control basado en lógica difusa es atractivo, ya que no requiere de un modelo matemático del sistema en estudio y puede cubrir una amplia gama de condiciones de operación, además es simple de implementar [6].

Al combinar la lógica difusa con otras técnicas de control y optimización, como los algoritmos genéticos, se logran encontrar los mejores parámetros del controlador o la mejor topología de la red, obteniendo un control más robusto.

En este trabajo se presenta el diseño de controles difusos para los dispositivos STATCOM y SVC instalados en el sistema de prueba SMIB, de manera independiente; sintonizando las ganancias de cada controlador de forma heurística y por medio de AG, PSO y COA. Esto con el fin de distinguir la mejor respuesta a partir de los resultados de simulación.

1.1. Planteamiento del problema

Uno de los principales problemas presentados en los sistemas eléctricos de potencia (SEP's) se debe a su crecimiento, dado que presenta limitantes técnicas y de operación, que hacen que las líneas de transmisión se carguen cerca de sus límites térmicos y de estabilidad, provocando desbalances que causan oscilaciones. Estas oscilaciones pueden permanecer y crecer causando la separación del sistema si no se tiene un amortiguamiento adecuado. Cuando las oscilaciones presentes en el sistema no son amortiguadas se pierde el equilibrio y no se logran recuperar las características de régimen permanente, exponiendo a los sistemas a niveles de inestabilidad e impidiendo abastecer la demanda bajo condiciones de seguridad, calidad, estabilidad y confiabilidad [6].

Como consecuencia de la exposición a niveles de inestabilidad y a las limitaciones de utilización de equipos basados en elementos electromecánicos, y debido a que los SEP's están en constante desarrollo, se hace cada vez más necesaria la implementación de dispositivos y equipos que sustenten, optimicen, controlen y regulen la estructura de los sistemas eléctricos de potencia [33]. Por tanto, se profundiza el desarrollo de la Electrónica de Potencia, dando surgimiento a los Sistemas Flexibles de Transmisión en Corriente Alterna (FACTS) [19].

Los dispositivos FACTS tienen toda la capacidad que se necesita en los sistemas eléctricos de potencia para afrontar las constantes perturbaciones [19]. La característica principal de los FACTS es la capacidad que tienen para modificar los parámetros del sistema, lo que a su vez permite controlar el flujo de potencia. Además ofrecen oportunidades para regular la transmisión de corriente alterna (CA), incrementando o disminuyendo el flujo de potencia en líneas específicas y respondiendo de manera rápida a los problemas de estabilidad. A parte de su función principal, que logra una disminución de pérdidas, se aprovecha su capacidad de amortiguación de oscilaciones por medio de una componente auxiliar POD (Power Oscillation Damping) [6,19].

Algunas técnicas de optimización y de control inteligente aplicados a los SEP's se han ido desarrollando, tales como: redes neuronales, sistemas de lógica difusa, algoritmo genético, cúmulo de partículas, algoritmo de optimización caótica y templado simulado. Sin embargo, las aplicaciones combinadas de estas técnicas en problemas relacionados con los dispositivos FACTS, solo en los últimos años han comenzado a recibir atención por parte de los investigadores [10].

Por lo anterior, se evidencia la necesidad de desarrollar métodos de control inteligente en el amortiguamiento de oscilaciones de los SEP's usando dispositivos FACTS (STATCOM y SVC).

1.2. Objetivo de la tesis

1.2.1. Objetivo general

Aplicar algunos métodos de control inteligente en el amortiguamiento de oscilaciones usando FACTS (STATCOM y SVC).

1.2.2. Objetivos específicos

- Realizar un estudio de las características dinámicas del STATCOM y SVC.
- Modelar las características dinámicas del STATCOM y del SVC.
- Desarrollar un controlador de oscilaciones (POD) convencional PI, para el sistema SMIB con STATCOM y SVC incluidos.
- Desarrollar un controlador de oscilaciones (POD) de tipo difuso para el sistema SMIB con STATCOM y SVC incluidos.
- Desarrollar un ajuste con AG (Algoritmos Genéticos) del controlador de oscilaciones de tipo difuso del STATCOM y SVC.
- Desarrollar un ajuste del controlador de oscilaciones de tipo difuso con PSO (Particle Swarm Optimization).
- Desarrollar un ajuste con COA (algoritmo de optimización caótica) del controlador de oscilaciones de tipo difuso del STATCOM y SVC.
- Comparar las respuestas de los controles estudiados.

1.3. Justificación

Con el desarrollo de la industria electrónica y de los dispositivos FACTS, se ha dirigido el camino hacia un enfoque nuevo y más versátil para controlar los SEP's de una manera deseada [4]. Los dispositivos FACTS ofrecen una serie de capacidades notables tales como compensación de potencia reactiva, regulación de voltaje, control de flujo de potencia, amortiguación de oscilaciones y control de los parámetros de transmisión. Los FACTS no solo son un controlador de alta potencia, sino un conjunto de controladores que pueden aplicarse individualmente o colectivamente para controlar estos parámetros [4, 6]. Sin embargo, la principal desventaja de los dispositivos FACTS, es el elevado costo comparado con la compensación reactiva tradicional.

En este trabajo se emplean dos tipos de dispositivos FACTS, el STATCOM y el SVC, para el control de oscilaciones del sistema de prueba.

Pertinencia y viabilidad

Uno de los primeros métodos estudiados, de control de oscilaciones, es el de compensación de fase que se desarrolla como un controlador adicional de amortiguación para los dispositivos FACTS

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

(STATCOM y SVC), pero solo son adecuados para una gama limitada de condiciones de funcionamiento [8].

Otro tipo de controlador auxiliar comúnmente utilizado en el control del STATCOM y del SVC, es el PI (proporcional integral), ya que no es necesario construir un modelo matemático para su diseño. Pero a pesar de la facilidad y simplicidad de éste, su operación pierde valor cuando las condiciones del sistema varían extensamente o cuando ocurren grandes perturbaciones, por lo tanto el control PI no es conveniente para el control de los dispositivos FACTS [3,4].

Según lo anteriormente nombrado y debido a la importancia de amortiguar las oscilaciones en los sistemas de potencia cuando las cargas son numerosas, los métodos clásicos de control no pueden ser utilizados. Por esta razón, la lógica difusa ha sido usada como sistema de control para la amortiguación de oscilaciones, ya que su respuesta es rápida, amortigua las oscilaciones de baja frecuencia y mejora la estabilidad del SEP [8,9].

La lógica difusa ofrece un enfoque de modelo libre para el control del STATCOM y del SVC y puede ser eficaz en todo el rango de operación del sistema de potencia. El enfoque de la lógica difusa permite que los conocimientos adquiridos a partir de experiencias se incorporen al esquema de control como un conjunto de reglas lingüísticas y funciones de pertenencia [9].

Un gran número de sistemas con diferentes arquitecturas basadas en lógica difusa han sido el objeto de investigación para mejorar aún más el controlador difuso de los modelos de procesos de desempeño complejo. Estos sistemas incluyen los sistemas neuro-difusos, los sistemas adaptativos difusos y la auto-organización de los sistemas difusos [1].

Impacto

Al incluir los dispositivos FACTS en los SEP's se logra la disminución de pérdidas y la amortiguación de oscilaciones, por medio de una componente de control auxiliar [19]. La implementación y el uso de metodologías de control inteligente (control auxiliar) en los FACTS, permite que el SEP se adapte a múltiples tipos de problemas, y además, proporciona un medio para enfrentar situaciones complejas y dinámicas de una manera más sencilla, mitigando los problemas de inestabilidad [6,20]. Por otra parte, al combinar algunas técnicas de control inteligente y optimización, se busca obtener un controlador de oscilaciones de desempeño robusto para los dispositivos STATCOM y SVC.

El estudio de los sistemas de transmisión flexible de CA (FACTS) es fundamental para generar avances en el grupo de investigación de Electrónica de Potencia de la UTP. Este estudio hace que el desarrollo de metodologías de control inteligente aplicadas al control de compensadores FACTS sea un tema que permita generar trabajos reflejados en tesis y artículos de revistas que aporten avances a la línea de FACTS del grupo de investigación.

1.4. Estado del arte

1.4.1. Antecedentes

Los compensadores estáticos de VAR's, han sido utilizados desde los años 70. De hecho, fueron utilizados por primera vez en el control de un sistema de transmisión de C.A. en 1978 en un proyecto conjunto de EPRI y la Minnesota Power and Light [19]. Esto dio origen a la filosofía de los sistemas de transmisión flexibles de C.A. (FACTS), desarrollada a finales de los 80s, la cual tiene como objetivo el uso de dispositivos basados en tiristores para controlar el flujo de potencia en una línea de transmisión, que permite utilizar las líneas cerca de sus límites térmicos y/o forzar los flujos de potencia por rutas determinadas. Debido a la rapidez en su operación, estos dispositivos también pueden ser utilizados para controlar problemas dinámicos del sistema [12]. Cabe anotar que el concepto de FACTS se introdujo a la comunidad técnica en 1988 por Hingonari [19].

Los dispositivos FACTS han sido utilizados para proporcionar amortiguación de oscilaciones del sistema de potencia. El SVC es uno de los dispositivos FACTS que con una señal suplementaria de control de tensión puede mejorar efectivamente la amortiguación de las oscilaciones y la estabilidad del sistema de potencia [21]. La evolución del SVC es el STATCOM, que se basa en el principio de funcionamiento de un inversor de voltaje, generando un voltaje de CA controlable, de modo que la diferencia de tensión a través de la reactancia produce intercambio de potencia activa y reactiva entre el STATCOM y la red de transmisión [22].

En el control y modelado de los dispositivos FACTS se han utilizado algunas técnicas de control inteligente como lógica difusa, algoritmos genéticos, redes neuronales, y enjambre de partículas.

El control difuso se introdujo a comienzos de los años 70 como un intento para diseñar controladores para sistemas que son estructuralmente difíciles de modelar, debido a su naturaleza no lineal y otras complejidades en la obtención del modelo. A finales de los 70, los ingenieros daneses Lauritz Meter Hombland y Jens-Jurgen Ostergaard desarrollan el primer sistema de Control Difuso comercial, destinado a una planta de cemento.

En 1974, el británico Ebrahim Mamdani, demuestra la aplicabilidad de la lógica difusa en el campo de control. Desarrolla el primer sistema de control difuso práctico: la regulación de un motor de vapor.

En 1986, Yamakawa publica "Fuzzy Controller Hardware System". Desarrollando controladores difusos en circuitos integrados.

Durante los últimos años, los sistemas de control con lógica difusa se han venido consolidando como una herramienta útil para tratar y modelar sistemas complejos y no lineales, y así han sido incorporados en un gran número de productos y procesos de electrónica de potencia.

Algunas herramientas tradicionales del control clásico se han combinado con técnicas de control inteligente (como PSO), para el diseño y la sintonización de controles de dispositivos FACTS en sistemas de potencia.

En 2012 se publica el documento llamado "PSO-based Self-Tuning PI Control for STATCOM" [59], en el que se plantea el PSO como método de auto-sintonización del control PI para el STATCOM. Las respuestas del sistema del control PI auto-sintonizado con PSO se comparan con las del controlador PI de ganancia fija, donde los resultados muestran la eficacia del control auto-sintonizado con PSO.

En 2012 es publicado el artículo “STATCOM Control using a PSO-Based IP Controller” [60], en este artículo se propone un control IP (Integral Proporcional) para el STATCOM, cuyos parámetros son configurados usando Particle Swarm Optimization (PSO). Para demostrar la capacidad del control IP con PSO, se compara con el control de tipo PI clásico; presentando mejor desempeño el control IP que el clásico PI.

1.4.2. Sistemas Flexibles de Transmisión de CA – (FACTS)

La IEEE define el término FACTS como: “Sistema de transmisión de corriente alterna que incorpora controladores estáticos basados en electrónica de potencia para mejorar la controlabilidad e incrementar la capacidad de transferencia de potencia.” [19].

Los dispositivos FACTS permiten el control de potencia activa y reactiva en los Sistemas de Transmisión. Concretamente, el logro de menores pérdidas y disminución de congestiones [30].

El uso de equipos FACTS puede traer otras consecuencias beneficiosas tales como mejora en la estabilidad de la red, menores costos de producción de energía y cumplimiento de requerimientos contractuales mediante el control de los flujos de potencia en la red [31].

Clasificación de los dispositivos FACTS

Los dispositivos FACTS se clasifican en dos tipos:

- a) De primera generación.
- b) De segunda Generación.

a. Dispositivos FACTS de primera generación.

Son aquellos dispositivos que tienen control sobre una sola variable del sistema. La primera generación utiliza tiristores y se comportan como elementos pasivos (bobinas, reactancia o transformadores) controlados.

Estos se dividen en dispositivos de compensación serie y dispositivos de compensación en derivación.

Los dispositivos de primera generación, de compensación serie son:

- *Condensador Serie Conmutado por Tiristor (TSSC)*: Consiste en un arreglo de condensadores en serie con la línea, cada uno con un interruptor en paralelo, determinando que el grado de compensación varíe sólo entre valores discretos

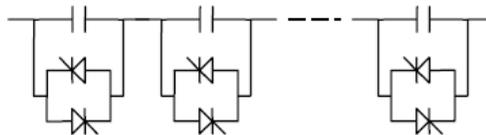


Figura 1: Condensador Serie Conmutado por Tiristor (TSSC)

- *Condensador Serie Controlado por Tiristor (TCSC)*: Consiste en un condensador en serie con la línea y en paralelo con un reactor controlado por un tiristor. Controlando el ángulo de encendido del tiristor se puede modificar la impedancia efectiva del reactor en paralelo.

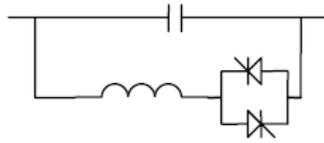


Figura 2: Condensador Serie Controlado por Tiristor (TCSC)

- *Compensador Serie de VAR Estático (SSVC)*: Consiste en un arreglo de compensadores en serie con la línea (TSSC, TCSC o FCSC), manejados por un controlador con una estrategia de control específica, típicamente mantener un flujo determinado de potencia activa por una línea [4].

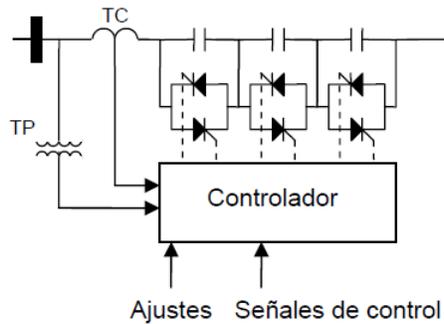


Figura 3: Compensador Serie de VAR Estático (SSVC)

Los dispositivos de primera generación, de compensación en derivación son:

- *Reactor Controlado por Tiristor (TCR)*: Consiste en un reactor paralelo de inductancia fija en serie con un interruptor bidireccional con tiristor.



Figura 4: Reactor Controlado por Tiristor (TCR)

- *Condensador Controlado por Tiristor (TSC)*: Consiste en un condensador paralelo de capacidad fija en serie con un interruptor bidireccional con tiristor y una inductancia para limitar sobrecorrientes.



Figura 5: Condensador Controlado por Tiristor (TSC)

- *Compensador de VAR Estático (SVC)*: Consiste en un arreglo de compensadores en paralelo, usualmente tanto TCR's como TSC's, de manera de contar con la posibilidad de realizar compensación capacitiva o inductiva.

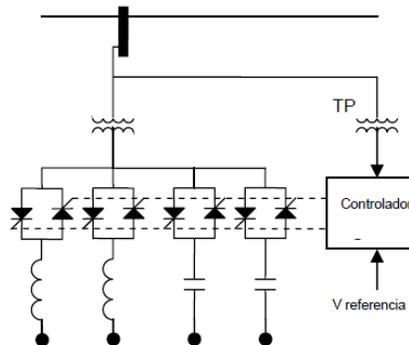


Figura 6: *Compensador de VAR Estático (SVC)*

b. Dispositivos FACTS de segunda generación.

Los dispositivos FACTS de segunda generación están basados en convertidores de fuentes de voltaje, VSC (Voltage Source Converters), cuyas capacidades de control, funcionalidad, y versatilidad en la interacción con el sistema, son más sofisticadas que los FACTS de primera generación. Además, están compuestos por semiconductores con encendido y apagado controlado (GTOs, MCTs, IGBTs, IGCTs). No obstante, los dispositivos de esta segunda generación son más complejos y costosos.

Atendiendo al modo de conexión a la red, los dispositivos FACTS se pueden dividir en compensadores serie-serie, ó compensadores serie-derivación. Esta clasificación es independiente de la anterior y existen, por ejemplo, compensadores derivación y serie tanto en la primera como en la segunda generación de FACTS.

Dispositivos serie de segunda generación:

- *Condensador Serie Controlado por Conmutación Forzada (FCSC)*: Consiste en un condensador serie de capacidad fija en paralelo con un interruptor de conmutación forzada.

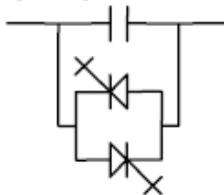


Figura 7: *Condensador Serie Controlado por Conmutación Forzada (FCSC)*

- *Compensador Serie Sincrónico Estático (SSSC)*: Este compensador, a diferencia de los anteriormente mencionados, no utiliza dispositivos de conmutación para controlar la circulación de corriente del elemento de compensación (condensador, bobina). La inyección de voltaje en cuadratura se obtiene con un condensador en corriente continua, conectado a la línea de transmisión a través de un conversor de fuente de voltaje (VSC) y un transformador serie. El grado de compensación se controla modificando el voltaje de salida del VSC, pudiendo incluso invertirse la fase, obteniéndose así compensación inductiva. El

SSSC puede entregar un voltaje de salida independiente de la corriente de línea, por lo tanto su impedancia es esencialmente cero en la frecuencia fundamental [4].

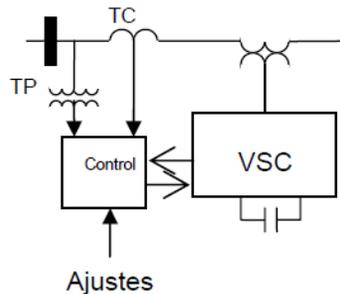


Figura 8: *Compensador Serie Sincrónico Estático (SSSC)*

Dispositivo derivación de segunda generación:

- *Compensador de VAR Estático Avanzado (STATCOM)*: Este compensador, a diferencia de los anteriormente mencionados, no utiliza dispositivos de conmutación. La inyección de corriente se obtiene con un condensador en corriente continua, conectado a la línea de transmisión mediante un convertidor de fuente de voltaje (VSC) y un transformador en paralelo. El STATCOM puede proporcionar compensación capacitiva o inductiva, según sea la necesidad, controlando la magnitud relativa entre el voltaje de línea y el voltaje de salida del inversor. Este compensador se comporta esencialmente como un compensador sincrónico, permitiendo un control continuo de la potencia reactiva, y ofreciendo una mayor velocidad de respuesta, mayor estabilidad y mejor manejo de perturbaciones dinámicas que un SVC [4].

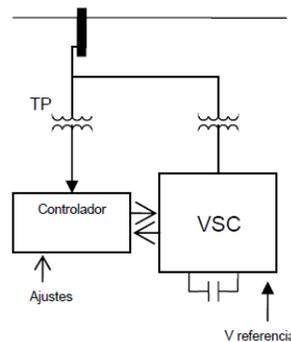


Figura 9: *Compensador de VAR Estático Avanzado (STATCOM)*

Dispositivos serie-serie de segunda generación:

En este tipo de dispositivos pueden presentarse dos diferentes configuraciones. En la primera se tienen dispositivos serie separados en un sistema de transmisión multilínea que se controlan de manera coordinada; en la segunda, puede ser un dispositivo unificado en el que existe además intercambio de potencia real entre líneas. Este último dispositivo se conoce como Controlador de Flujo de Potencia Interlínea (IPFC).

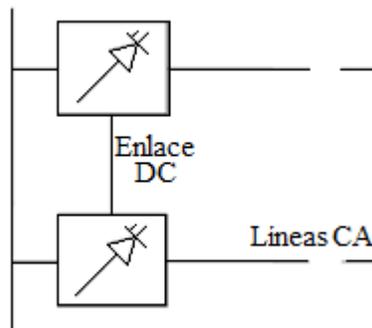


Figura 10: Controlador de Flujo de Potencia Interlínea (IPFC)

Dispositivo Serie-Derivación de segunda generación:

Este tipo de dispositivo puede ser la combinación de dispositivos serie y derivación, controlados de una manera coordinada inyectando voltaje y corriente respectivamente, o un Controlador Unificado de Flujo de Potencia (UPFC), con elementos serie y derivación en el que existe además intercambio de potencia real entre ambos.

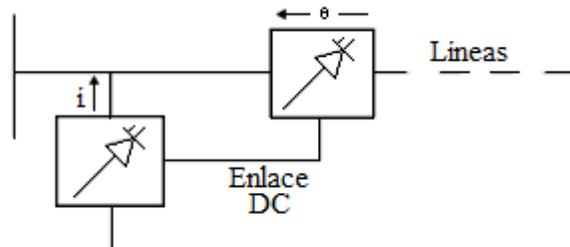


Figura 11: Controlador Unificado de Flujo de Potencia (UPFC)

1.4.3. Control inteligente de los dispositivos FACTS

Los sistemas de control son diseñados tradicionalmente usando modelos matemáticos de sistemas físicos [51]. Los modelos matemáticos que describen el comportamiento dinámico de un sistema, son obtenidos para aplicar técnicas de diseño de controladores apropiados para el mismo. Más aún, los modelos matemáticos deben ser lo suficientemente simples para poder ser analizados con los métodos disponibles y la precisión debe ser suficiente para describir el comportamiento dinámico del sistema.

Sin embargo, en la realidad el modelo y sus parámetros son con frecuencia desconocidos; cambios en el ambiente de trabajo, dinámicas no modeladas y la presencia de no linealidades e incertidumbre son difíciles de tratar con los controladores convencionales que no son capaces de aprender o de adaptarse a nuevas situaciones [52,53].

Por esta razón surgen las tecnologías llamadas inteligentes, tal como lo son las redes neuronales, la lógica difusa, los algoritmos genéticos y la programación evolutiva. Estos enfoques se utilizan como alternativas a los controladores clásicos como son el control PD y PID, con el fin de lograr un mejor desempeño y para adaptarse a nuevas situaciones del sistema.

Una definición del control convencional e inteligente, puede ser [50]:

- Control convencional: teorías y métodos que se basan en la descripción por ecuaciones diferenciales o en diferencias.
- Control inteligente:
 - Sistema que tiene la habilidad para actuar de forma apropiada en un entorno incierto.
 - La inteligencia es el proceso de análisis, organización y conversión de datos en información estructurada (conocimiento).
 - Sustitución a la mente humana en la toma de decisiones, planificación y aprendizaje.
 - Utiliza de forma combinada técnicas de inteligencia artificial, investigación operativa y control.
 - Capacidad del sistema de asemejar el comportamiento de alguno de sus elementos a alguna de las cualidades cognoscitivas del comportamiento humano, como el aprendizaje, el razonamiento simbólico, la planificación o la adaptación a un medio cambiante.

Algunas de las técnicas de control inteligente usadas son [50]:

- Sistemas expertos en tiempo real, como:
 - Sistemas de control basados en reglas.
 - Control basado en modelos.
 - Diagnóstico de fallas.
 - Planificación.
- Control difuso (control Fuzzy).
- Control con redes neuronales.
- Técnicas de optimización no convencionales, como:
 - Algoritmos genéticos
 - PSO

1.5. Estructura de la tesis

A continuación, se resume capítulo a capítulo el contenido de esta tesis. La tesis se encuentra conformada por un total de 9 capítulos, 3 apéndices y una bibliografía.

En el capítulo 1, se realiza una introducción sobre el proyecto. Se hace un preámbulo en el campo de los dispositivos FACTS, clasificándolos de acuerdo al tipo de compensación, y se revisan los antecedentes en los diferentes métodos de control inteligente y técnicas de optimización.

En el capítulo 2, se realiza el análisis de las características dinámicas del sistema SMIB con los dispositivos STATCOM y SVC incluidos de manera individual, dando paso al modelado de éstos. Estos modelos se implementan en el Toolbox Simulink del software Mathworks-MatLAB.

En el capítulo 3, se detalla el comportamiento y se describen los tipos y métodos de diseño del control lógico difuso.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

En los capítulos 4 y 5, se desarrollan los controladores de oscilaciones (POD) de tipo difuso del sistema SMIB con STATCOM y SVC integrados.

En el capítulo 6, se desarrolla un ajuste del controlador de oscilaciones (POD) de tipo difuso implementado, mediante la técnica de optimización de algoritmos genéticos (AG).

En el capítulo 7, se desarrolla un ajuste del controlador de oscilaciones (POD) de tipo difuso implementado para el STATCOM y el SVC, mediante la técnica de optimización de enjambre de partículas (PSO).

En el capítulo 8, se desarrolla un ajuste del controlador de oscilaciones (POD) de tipo difuso implementado, mediante la técnica de Optimización Caótica (COA).

En el capítulo 9, se comparan los resultados del sistema SMIB con STATCOM y SVC con control de oscilaciones difuso, ajustado con las técnicas AG, PSO y COA.

Por último, se exponen las conclusiones de este trabajo, esto en base a los resultados obtenidos durante el desarrollo del mismo, indicando las principales contribuciones y señalando direcciones de trabajos futuros en el área.

Capítulo 2

MODELADO DEL SVC Y DEL STATCOM

Los sistemas eléctricos de potencia han visto limitado su crecimiento debido a diversos factores entre ellos de tipo ambiental, económico y operativo. Con la liberación del sector eléctrico los diferentes entes generadores, y distribuidores deben aprovechar mejor la infraestructura existente y a la vez mejorar la confiabilidad en la prestación del servicio. Esto lleva a que el sistema trabaje en puntos cercanos a su límite de operación, por lo que es necesario utilizar dispositivos que permitan no sólo ampliar los límites de estabilidad del sistema sino a la vez mejorar algunos de los parámetros de operación.

Por lo anterior, en los últimos años, los dispositivos flexibles de transmisión de corriente alterna (FACTS) han sido utilizados ampliamente para proporcionar amortiguación de oscilaciones adicionales del sistema de energía.

Los análisis de operación del modelo de prueba usado en esta tesis, un sistema conformado por una máquina síncrona conectada a un barraje infinito a través de una línea de transmisión (SMIB), han sido planteados con base en modelos lineales de los componentes del sistema eléctrico.

Por tanto, se parte del modelo linealizado del sistema SMIB planteado por Heffron–Phillips, en el cual se calculan las constantes K_1 hasta K_6 que dependen de los parámetros del sistema y del punto de operación [3].

El SMIB podría entenderse como un sistema de potencia que consta de un generador síncrono que está conectado a un barraje infinito por medio de una línea de transmisión.

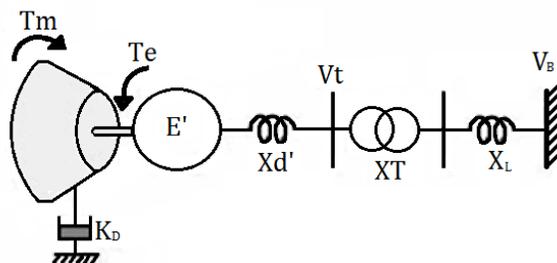


Figura 12: Sistema SMIB

Utilizando el modelo de orden 4, el cual simplifica el procedimiento matemático brindando a su vez un buen modelado del sistema, se tienen las siguientes ecuaciones de estado [3]:

$$\dot{\delta} = \omega - \omega_0 \quad (2.1)$$

$$\dot{\omega} = \frac{\omega_0 \left(T_m - (E'_q I_q + (x_q - x'_d) I_d I_q) + D(\omega - \omega_0) \right)}{M} \quad (2.2)$$

$$\dot{E}'_q = \frac{-E'_q + (x_d - x'_d) I_d - E_{fd}}{T'_{do}} \quad (2.3)$$

$$\dot{E}_{fd} = \frac{-E_{fd} + K_a(-V_t + V_{ref})}{T_a} \quad (2.4)$$

A partir de las ecuaciones que modelan el sistema SMIB se obtiene el modelo linealizado del espacio de estados Heffron-Phillips [3].

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\dot{\omega} \\ \Delta E'_q \\ \Delta E_{fd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_1}{M} & -\frac{D\omega_0}{M} & -\frac{K_2}{M} & 0 \\ \frac{K_4}{T'_{do}} & 0 & -\frac{1}{K_3 T'_{do}} & \frac{1}{T'_{do}} \\ -\frac{K_a K_6}{T_a} & 0 & -\frac{K_a K_5}{T_a} & -\frac{1}{T_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega \\ \Delta E'_q \\ \Delta E_{fd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{K_a}{T_a} \end{bmatrix} \Delta V_{ref} \quad (2.5)$$

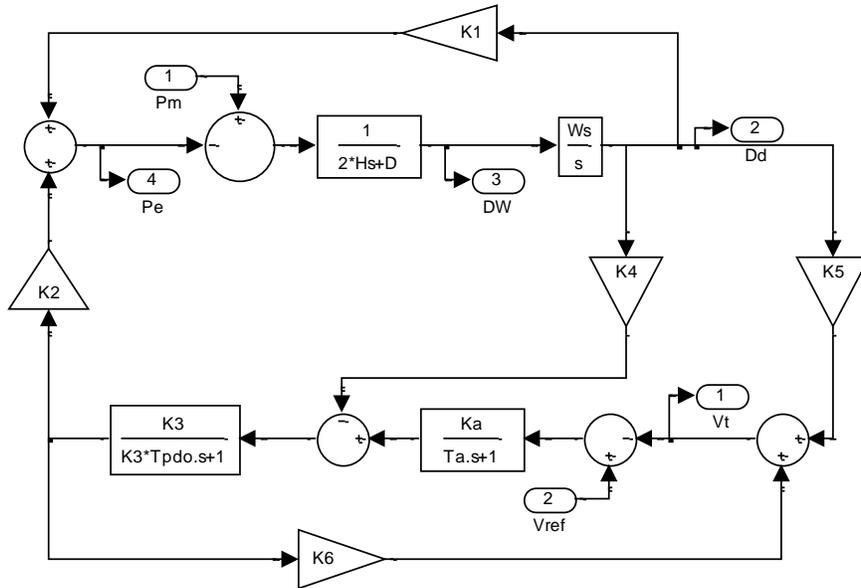


Figura 13: Modelo linealizado del sistema SMIB.Heffron-Phillips.

2.1. Modelado de las características dinámicas del SVC

El SVC se usa para ampliar los límites de estabilidad del sistema eléctrico, en este caso, una máquina síncrona conectada a un barraje infinito a través de una línea de transmisión. Aunque el propósito fundamental del compensador de VARs estático es el de suministrar la potencia reactiva que requiere el sistema para mantener a un nivel adecuado los perfiles de tensión, se aprovecha el hecho de que su instalación tiene efectos benéficos al ampliar los límites de estabilidad del sistema eléctrico como también ayudar a amortiguar los efectos de las oscilaciones que se producen cuando se presentan perturbaciones.

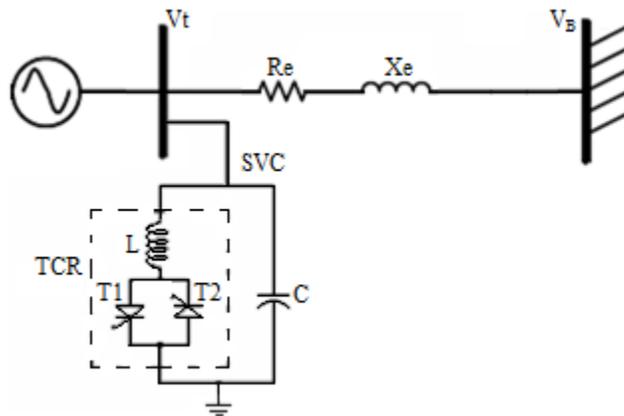


Figura 14: SMIB con SVC

En la figura 14 se muestra la forma de conexión del SVC al sistema conformado por una máquina síncrona conectada a un barraje infinito a través de una línea de transmisión. Además se observa que el modelo del SVC está basado en un condensador fijo y una reactancia cuya corriente es controlada en ambos semiciclos por medio de dos tiristores conectados en antiparalelo (TCR).

La función primaria de este SVC es controlar la potencia reactiva y mantener un perfil adecuado de tensión y, a su vez, ampliar los límites de estabilidad del sistema. También se puede pensar en el SVC como una alternativa para mejorar el amortiguamiento. Para tal fin, la señal auxiliar U es aplicada a la entrada del controlador del SVC y al sistema de excitación de la máquina para amortiguar las oscilaciones del sistema cuando aparecen perturbaciones. En general, la contribución al torque amortiguador con sólo el regulador de tensión es pequeña por tal motivo, si se desea un amortiguamiento adicional, se requiere de una acción de control suplementaria [2].

Un sistema de control determina los instantes exactos de disparo de los reactores, de acuerdo con una estrategia predeterminada. Esta estrategia suele tratar de mantener el voltaje de línea en un valor fijo [4].

Para el modelado del SVC se trabaja con base en la linealización del sistema SMIB.

El esquema utilizado para el SVC contiene una parte para el control de los reactivos y un compensador adicional para amortiguar las oscilaciones que aparecen cuando se presenta una perturbación. Este esquema provoca una variación en los coeficientes del modelo linealizado del sistema SMIB, tal que el torque sincronizador sea positivo lo que asegura la estabilidad [2].

El modelo usado para el SVC es el mostrado en la figura 15.

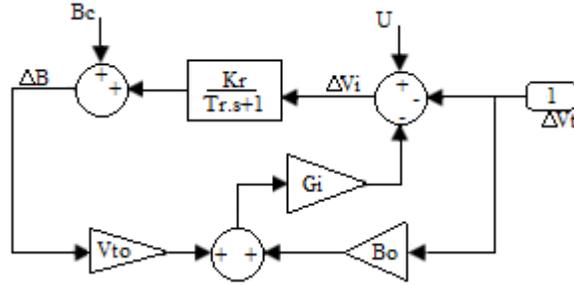


Figura 15: Modelo del SVC planteado

Donde el punto de operación de estado estable esta dado por:

$$I_S = BV_t \quad (2.6)$$

La ecuación (2.6) se linealiza alrededor de un punto de operación quedando:

$$\Delta I_S = B_0 \Delta V_t + V_{t0} \Delta B \quad (2.7)$$

La señal de entrada al sistema de control del SVC está expresada como:

$$\Delta V_i = U - \Delta V_t - G_I \Delta I_S \quad (2.8)$$

Partiendo de las ecuaciones (2.7) y (2.8) y planteando el resto con el modelo de la figura 15, se tiene:

$$\Delta V_t = K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E'_q \quad (2.9)$$

$$\Delta T_e = K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta E'_q \quad (2.10)$$

$$\Delta E_{fd} = -K_A \Delta V_t + K_A U + K_A \Delta V_{ref} \quad (2.11)$$

$$\Delta E'_q = K_3 (\Delta E_{fd} - K_4 \Delta \delta) \quad (2.12)$$

Reemplazando (2.12) en (2.9)

$$\Delta V_t = (K_5 - K_3 K_4 K_6) \Delta \delta + K_3 K_6 \Delta E_{fd}$$

Haciendo Vref=0 en (2.11):

$$\Delta V_t = \frac{K_d}{1 + K_c} \Delta \delta + \frac{K_c}{1 + K_c} U \quad (2.13)$$

Donde:

$$K_d = K_5 - K_3 K_4 K_6 \quad K_c = K_A K_3 K_6$$

$$H_Q = \frac{K_d}{1 + K_c} \quad H_D = \frac{K_c}{1 + K_c}$$

$$\Delta V_t = H_Q \Delta \delta + H_D U \quad (2.14)$$

Reemplazando (2.14) en (2.8):

$$\Delta V_i = -H_Q(1 + G_i B_0) \Delta \delta - G_i V_{t0} \Delta B + [1 - H_D(1 + G_i B_0)] U \quad (2.15)$$

Ecuación dada por la inclusión del SVC:

$$\Delta \dot{B} = \frac{1}{T_r} \left(-\Delta B + K_r (\Delta V_{ref} - \Delta V_t + \Delta V_i) \right)$$

$$\Delta B = K_r \Delta V_i \quad (2.16)$$

$$\Delta B = -\frac{K_r H_Q (1 + G_i B_0)}{1 + K_r G_i V_{t0}} \Delta \delta + \frac{K_r (1 - H_D (1 + G_i B_0))}{1 + K_r G_i V_{t0}} U \quad (2.17)$$

Donde,

$$K_8 = \frac{K_r H_Q (1 + G_i B_0)}{1 + K_r G_i V_{t0}} \quad (2.18)$$

$$K_9 = \frac{K_r (1 - H_D (1 + G_i B_0))}{1 + K_r G_i V_{t0}} \quad (2.19)$$

Entonces

$$\Delta B = -K_8 \Delta \delta + K_9 U \quad (2.20)$$

$$U = \frac{1}{K_9} \Delta B + \frac{K_8}{K_9} \Delta \delta \quad (2.21)$$

Reorganizando el sistema queda:

$$\Delta E'_q = K_3 \left(-K_A H_Q - \frac{K_A K_8}{K_9} (H_D - 1) - K_4 \right) \Delta \delta + \frac{K_3 K_A (1 - H_D)}{K_9} \Delta B \quad (2.22)$$

Donde,

$$K_{10} = K_3 \left(-K_A H_Q - \frac{K_A K_8}{K_9} (H_D - 1) - K_4 \right) \quad (2.23)$$

$$K_{11} = \frac{K_3 K_A (1 - H_D)}{K_9} \quad (2.24)$$

Finalmente:

$$\Delta E'_q = K_{10} \Delta \delta + K_{11} \Delta B \quad (2.25)$$

$$\Delta T_e = (K_1 + K_2 K_{10}) \Delta \delta + K_2 K_{11} \Delta B \quad (2.26)$$

$$K_{12} = K_1 + K_2 K_{10} \quad (2.27)$$

$$K_{13} = K_2 K_{11} \quad (2.28)$$

$$\Delta T_e = K_{12} \Delta \delta + K_{13} \Delta B \quad (2.29)$$

$$\Delta V_t = \left(H_Q + \frac{K_8 H_D}{K_9} \right) \Delta \delta + \frac{H_D}{K_9} \Delta B \quad (2.30)$$

$$C = H_Q + \frac{K_8 H_D}{K_9} \quad (2.31)$$

$$Z = \frac{H_D}{K_9} \quad (2.32)$$

$$\Delta V_t = C \Delta \delta + Z \Delta B \quad (2.33)$$

El cálculo de las constantes K_{12} , K_{13} , Z y C se realiza para simplificar el esquema de bloques del sistema SMIB con SVC.

El modelo de espacio de estados queda:

$$\begin{bmatrix} \Delta E'_q \\ \Delta \delta \\ \Delta \dot{\omega} \\ \Delta E'_{fd} \\ \Delta \dot{B} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{K_{3s} T'_{do}} & -\frac{K_{4s}}{T'_{do}} & 0 & \frac{1}{T'_{do}} & 0 \\ 0 & 0 & \omega_s & 0 & 0 \\ -\frac{K_{2s}}{M} & -\frac{K_{1s}}{M} & -\frac{D\omega_s}{M} & 0 & 0 \\ -\frac{K_A K_{6s}}{T_A} & -\frac{K_A K_{5s}}{T_A} & 0 & -\frac{1}{T_A} & 0 \\ -\frac{K_r K_{6s}}{T_r} & -\frac{K_r}{T_r} \left(K_{5s} - \frac{K_{8s}}{K_{9s}} \right) & 0 & 0 & \frac{\left(\frac{K_r}{K_{9s}} - 1 \right)}{T_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E'_q \\ \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta E'_{fd} \\ \Delta B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \frac{1}{M} [\Delta u] \quad (2.34)$$

$$[\Delta y] = [\Delta V_t] = [0 \ C \ 0 \ 0 \ Z] \begin{bmatrix} \Delta E'_q \\ \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta E'_{fd} \\ \Delta B \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

A continuación se muestra el diagrama de bloques del sistema SMIB con SVC incluido:

La estructura fundamental del dispositivo STATCOM es la siguiente:

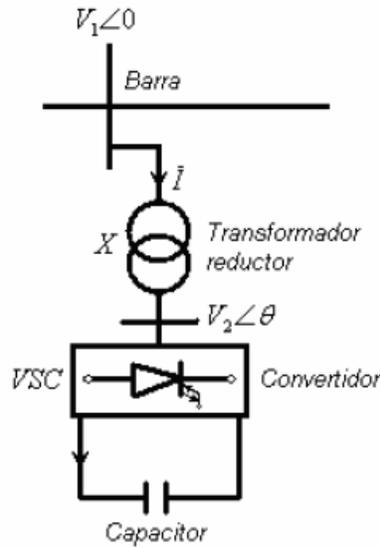


Figura 17: Circuito equivalente del STATCOM

Como se observa en la figura 17 el STATCOM se compone de un transformador con una reactancia X_{SDT} , conectado a una fuente inversora de voltaje (VSC) y a un capacitor DC.

A continuación se muestra el modelo del STATCOM conectado a un sistema SMIB. El STATCOM se conecta a un barraje intermedio [7].

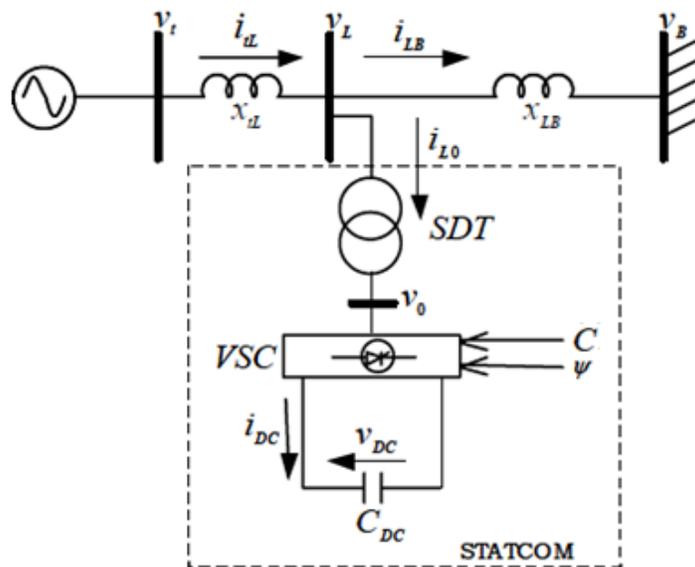


Figura 18: STATCOM instalado en un sistema SMIB

El convertidor genera un voltaje controlable AC a través de la reactancia de salida [8].

$$v_o(t) = V_o \text{sen}(wt - \psi)$$

La diferencia de tensión entre la barra V_o y la barra V_L produce un intercambio de potencia activa y reactiva entre el STATCOM y el sistema de potencia, cuyo flujo puede controlarse ajustando la magnitud de V_o y ψ . De la Figura 18 se puede obtener [7]:

$$\overline{I_{LO}} = I_{LOd} + jI_{LOq} \quad (2.36)$$

$$\overline{V_o} = cV_{DC}(\cos(\psi) + jsen(\psi)) = cV_{DC}\angle\psi \quad (2.37)$$

$$\frac{dV_{DC}}{dt} = \frac{I_{DC}}{C_{DC}} = \frac{c}{C_{DC}}(I_{LOd}\cos(\psi) + I_{LOq}\sen(\psi)) \quad (2.38)$$

Donde para el inversor PWM, $c = mk$, $k = \frac{\text{Tensión AC}}{\text{Tensión DC}}$

m : Es el índice de modulación, el cual determina la magnitud del voltaje inyectado, puede ser la señal de control de amortiguamiento para proveer una variación dinámica de compensación.

ψ : Es el ángulo del voltaje inyectado, el cual es definido por el PWM.

$$\overline{I_{LB}} = \overline{I_{UL}} - \overline{I_{LO}} = \overline{I_{UL}} - \frac{\overline{V_L} - \overline{V_o}}{jX_{SDT}} = \overline{I_{UL}} - \frac{\overline{V_t} - jX_{tL}\overline{V_o}}{jX_{SDT}} \quad (2.39)$$

$$\overline{V_t} = jX_{tL}\overline{I_{UL}} + jX_{LB}\overline{I_{LB}} + \overline{V_B} \quad (2.40)$$

Sustituyendo (2.39) en (2.40) y separando la parte real e imaginaria, se obtiene (2.41) y (2.42):

$$I_{tLq} = \frac{V_B \sen(\delta) + \frac{X_{LB}}{X_{SDT}} cV_{DC} \cos(\psi)}{X_{tL} + X_{LB} + X_{tL} \frac{X_{LB}}{X_{SDT}} + \left(1 + \frac{X_{LB}}{X_{SDT}}\right) X_q} \quad (2.41)$$

$$I_{tLq} = \frac{V_B \sen(\delta) + \frac{X_{LB}}{X_{SDT}} cV_{DC} \cos(\psi)}{A}$$

Donde

$$A = X_{tL} + X_{LB} + X_{tL} \frac{X_{LB}}{X_{SDT}} + \left(1 + \frac{X_{LB}}{X_{SDT}}\right) X_q$$

$$I_{tLd} = \frac{E'_q \left(1 + \frac{X_{LB}}{X_{SDT}}\right) - V_B \cos(\delta) - \frac{X_{LB}}{X_{SDT}} cV_{DC} \sen(\psi)}{X_{tL} + X_{LB} + X_{tL} \frac{X_{LB}}{X_{SDT}} + \left(1 + \frac{X_{LB}}{X_{SDT}}\right) X'_d} \quad (2.42)$$

$$I_{tLd} = \frac{E'_q \left(1 + \frac{X_{LB}}{X_{SDT}}\right) - V_B \cos(\delta) - \frac{X_{LB}}{X_{SDT}} cV_{DC} \sen(\psi)}{B}$$

Donde

$$B = X_{tL} + X_{LB} + X_{tL} \frac{X_{LB}}{X_{SDT}} + \left(1 + \frac{X_{LB}}{X_{SDT}}\right) X'_d$$

De

$$\vec{I}_{LO} = \frac{(\vec{V}_t - jX_{tL}\vec{I}_{tL} - \vec{V}_O)}{jX_{SDT}}$$

Se puede obtener:

$$I_{LOq} = \frac{cV_{DC}\cos(\psi) - (X_q + X_{tL})I_{tLq}}{X_{SDT}} \quad (2.43)$$

$$I_{LOd} = \frac{E'_q - (X'_d + X_{tL})I_{tLd} - cV_{DC}\sin(\psi)}{X_{SDT}} \quad (2.44)$$

De la figura 18, se tiene:

$$\vec{V}_t - \vec{V}_L = jX_{tL}\vec{I}_{tL} \quad (2.45)$$

$$\vec{V}_L = X_q I_{tLq} + j(E'_q - X'_d I_{tLd}) - jX_{tL}(I_{tLd} + jI_{tLq}) \quad (2.46)$$

$$\vec{V}_L = (X_q + X_{tL})I_{tLq} + j(E'_q - (X'_d + X_{tL})I_{tLd}) \quad (2.47)$$

$$V_L = \sqrt{\left((X_q + X_{tL})I_{tLq}\right)^2 + \left(E'_q - (X'_d + X_{tL})I_{tLd}\right)^2} \quad (2.48)$$

Y finalmente se completa el modelo del sistema con las ecuaciones de la máquina síncrona descritas para el sistema SMIB

$$\dot{\delta} = \omega_s \omega \quad (2.49)$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{M}(P_m - P_e - D\omega) \quad (2.50)$$

$$\dot{E}'_q = \frac{1}{T'_{do}}(E_{fd} - E_q) \quad (2.51)$$

$$\dot{E}'_{fd} = -\frac{1}{T_A}(E_{fd} - K_A(V_{ref} - V_t)) \quad (2.52)$$

$$P_e = E'_q I_{tLq} + (X_q - X'_d)I_{tLd}I_{tLq}$$

$$E_q = E'_q + (X_d - X'_d)I_{tLd}$$

$$V_t^2 = (E'_q - X'_d I_{tLd})^2 + (X_q I_{tLq})^2$$

Linealizando:

$$\Delta \dot{E}'_q = -\frac{1}{T'_{do}}(\Delta E'_q + (X_d - X'_d)\Delta I_{tLd} - \Delta E_{fd}) \quad (2.53)$$

$$\Delta \dot{\delta} = \omega_s \Delta \omega \quad (2.54)$$

$$\Delta\dot{\omega} = \frac{1}{M} (I_{tLq0} \Delta E'_q + (E'_{q0} + (X_q - X'_d) I_{tLd0}) \Delta I_{tLq} + (X_q - X'_d) I_{tLq0} \Delta I_{tLd} + D\omega_s \Delta\omega) \quad (2.55)$$

$$\Delta\dot{E}'_{fd} = -\frac{1}{T_A} (\Delta E_{fd} - K_A (\Delta V_{ref} - \Delta V_t)) \quad (2.56)$$

Donde:

$$\Delta V_t = \left(\frac{E'_{q0} - X'_d I_{tLd0}}{V_{t0}} \right) \Delta E'_q + \left(\frac{X'_d I_{tLd0} - X'_d E'_{q0}}{V_{t0}} \right) \Delta I_{tLd} + \left(\frac{X_q^2 I_{tLq0}}{V_{t0}} \right) \Delta I_{tLq} \quad (2.57)$$

$$\begin{aligned} \Delta V_L = & \left(\frac{E'_{q0} - (X'_d + X_{tL}) I_{tLd0}}{V_{L0}} \right) \Delta E'_q + \left(\frac{(X_{tL} + X'_d)^2 I_{tLd0} - (X_{tL} + X'_d) E'_{q0}}{V_{L0}} \right) \Delta I_{tLd} \\ & + \left(\frac{(X_{tL} + X'_d)^2}{V_{L0}} \right) \Delta I_{tLq} \end{aligned} \quad (2.58)$$

$$\begin{aligned} \Delta\dot{V}_{DC} = & \frac{1}{C_{DC}} (I_{Lod0} \cos(\psi_o) + I_{Loq0} \cos(\psi_o)) \Delta c + \frac{c_o}{C_{DC}} (I_{Lod0} (-\text{sen}(\psi_o)) + I_{Loq0} \cos(\psi_o)) \Delta\psi \\ & + \frac{c_o}{C_{DC}} (\cos(\psi_o) \Delta I_{Lod} + \text{sen}(\psi_o) \Delta I_{Loq}) \end{aligned} \quad (2.59)$$

Se asume como condición inicial la no transferencia de potencia reactiva entre el STATCOM y el sistema de potencia; es decir, $V_L < \alpha = V_O < \psi$ y $I_{Loq0} = 0$, $I_{Lod0} = 0$. Por lo tanto, la ecuación (2.59) queda:

$$\Delta\dot{V}_{DC} = \frac{c_o}{C_{DC}} (\cos(\psi_o) \Delta I_{Lod} + \text{sen}(\psi_o) \Delta I_{Loq})$$

Linealizando las ecuaciones de corriente se tiene:

$$\begin{aligned} \Delta I_{tLq} = & \left(\frac{V_{B0} \cos(\delta_o)}{A} \right) \Delta\delta + \left(\frac{X_{LB} V_{DC0} \cos(\psi_o)}{A X_{SDT}} \right) \Delta c + \left(\frac{X_{LB} c_o \cos(\psi_o)}{A X_{SDT}} \right) \Delta V_{DC} \\ & + \left(-\frac{X_{LB} c_o V_{DC0} \text{sen}(\psi_o)}{A X_{SDT}} \right) \Delta\psi \end{aligned} \quad (2.60)$$

$$\begin{aligned} \Delta I_{tLd} = & \left(\frac{1 + \frac{X_{LB}}{X_{SDT}}}{B} \right) \Delta E'_q + \left(\frac{V_{B0} \text{sen}(\delta_o)}{B} \right) \Delta\delta + \left(-\frac{X_{LB} V_{DC0} \text{sen}(\psi_o)}{B X_{SDT}} \right) \Delta c \\ & + \left(-\frac{X_{LB} c_o \text{sen}(\psi_o)}{B X_{SDT}} \right) \Delta V_{DC} + \left(-\frac{X_{LB} c_o V_{DC0} \cos(\psi_o)}{B X_{SDT}} \right) \Delta\psi \end{aligned} \quad (2.61)$$

$$\begin{aligned} \Delta I_{Lod} = & \left(\frac{1}{X_{SDT}} \right) \Delta E'_q + \left(-\frac{V_{DC0} \text{sen}(\psi_o)}{X_{SDT}} \right) \Delta c + \left(-\frac{c_o \text{sen}(\psi_o)}{X_{SDT}} \right) \Delta V_{DC} \\ & + \left(-\frac{c_o V_{DC0} \cos(\psi_o)}{X_{SDT}} \right) \Delta\psi + \left(-\frac{X'_d + X_{tL}}{X_{SDT}} \right) \Delta I_{tLd} \end{aligned} \quad (2.62)$$

$$\Delta I_{Loq} = \left(\frac{V_{BO} \cos(\psi_o)}{X_{SDT}} \right) \Delta c + \left(\frac{c_o \cos(\psi_o)}{X_{SDT}} \right) \Delta V_{DC} + \left(-\frac{c_o V_{DCo} \text{sen}(\psi_o)}{X_{SDT}} \right) \Delta \psi + \left(-\frac{X_q + X_{tL}}{X_{SDT}} \right) \Delta I_{tLq} \quad (2.63)$$

Reemplazando las ecuaciones de corriente (2.60)-(2.63) y de voltaje (2.57)-(2.59) en las ecuaciones (2.53)-(2.56), se obtiene el modelo linealizado del sistema SMIB con STATCOM, representado mediante el siguiente conjunto de ecuaciones en variables de estado:

$$\Delta E'_q = -\frac{1}{T'_{do}} (K_{4s} \Delta \delta + K_{3s} \Delta E'_q + K_{Qc} \Delta c + K_{Qdc} \Delta V_{DC} + K_{Q\psi} \Delta \psi - \Delta E_{fd}) \quad (2.64)$$

$$\Delta \dot{\delta} = \omega_s \Delta W \quad (2.65)$$

$$\Delta \dot{\omega} = -\frac{1}{M} (K_{1s} \Delta \delta + K_{2s} \Delta E'_q + K_{Pc} \Delta c + K_{Pdc} \Delta V_{DC} + K_{P\psi} \Delta \psi + D \omega_s \Delta W) \quad (2.66)$$

$$\Delta \dot{E}_{fd} = -\frac{1}{T_A} \Delta E_{fd} + \frac{K_A}{T_A} (\Delta V_{ref} - (K_{5s} \Delta \delta + K_{6s} \Delta E'_q + K_{vc} \Delta c + K_{vdc} \Delta V_{DC} + K_{v\psi} \Delta \psi)) \quad (2.67)$$

$$\Delta \dot{V}_{DC} = K_{7s} \Delta \delta + K_{8s} \Delta E'_q + K_{Dc} \Delta c + K_{Ddc} \Delta V_{DC} + K_{D\psi} \Delta \psi \quad (2.68)$$

El modelo de espacio de estados queda:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{E}'_q \\ \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{\omega} \\ \Delta \dot{E}_{fd} \\ \Delta \dot{V}_{DC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{K_{3s}}{T'_{do}} & -\frac{K_{4s}}{T'_{do}} & 0 & \frac{1}{T'_{do}} & -\frac{K_{Qdc}}{T'_{do}} \\ 0 & 0 & \omega_s & 0 & 0 \\ -\frac{K_{2s}}{M} & -\frac{K_{1s}}{M} & -\frac{D \omega_s}{M} & 0 & -\frac{K_{Pdc}}{M} \\ \frac{K_A K_{6s}}{T_A} & \frac{K_A K_{5s}}{T_A} & 0 & -\frac{1}{T_A} & -\frac{K_A K_{vdc}}{T_A} \\ -\frac{K_{8s}}{K_{7s}} & -\frac{K_{7s}}{K_{7s}} & 0 & 0 & \frac{K_{Ddc}}{K_{7s}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E'_q \\ \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta E_{fd} \\ \Delta V_{DC} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{K_{Qc}}{T'_{do}} & -\frac{K_{Q\psi}}{T'_{do}} \\ 0 & 0 \\ -\frac{K_{Pc}}{M} & -\frac{K_{P\psi}}{M} \\ -\frac{K_A K_{vc}}{T_A} & -\frac{K_A K_{v\psi}}{T_A} \\ \frac{K_{Dc}}{K_{7s}} & \frac{K_{D\psi}}{K_{7s}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta c \\ \Delta \psi \end{bmatrix} \quad (2.69)$$

$$[\Delta y] = [K_{1s} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} \Delta E'_q \\ \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta E_{fd} \\ \Delta V_{DC} \end{bmatrix} \quad (2.70)$$

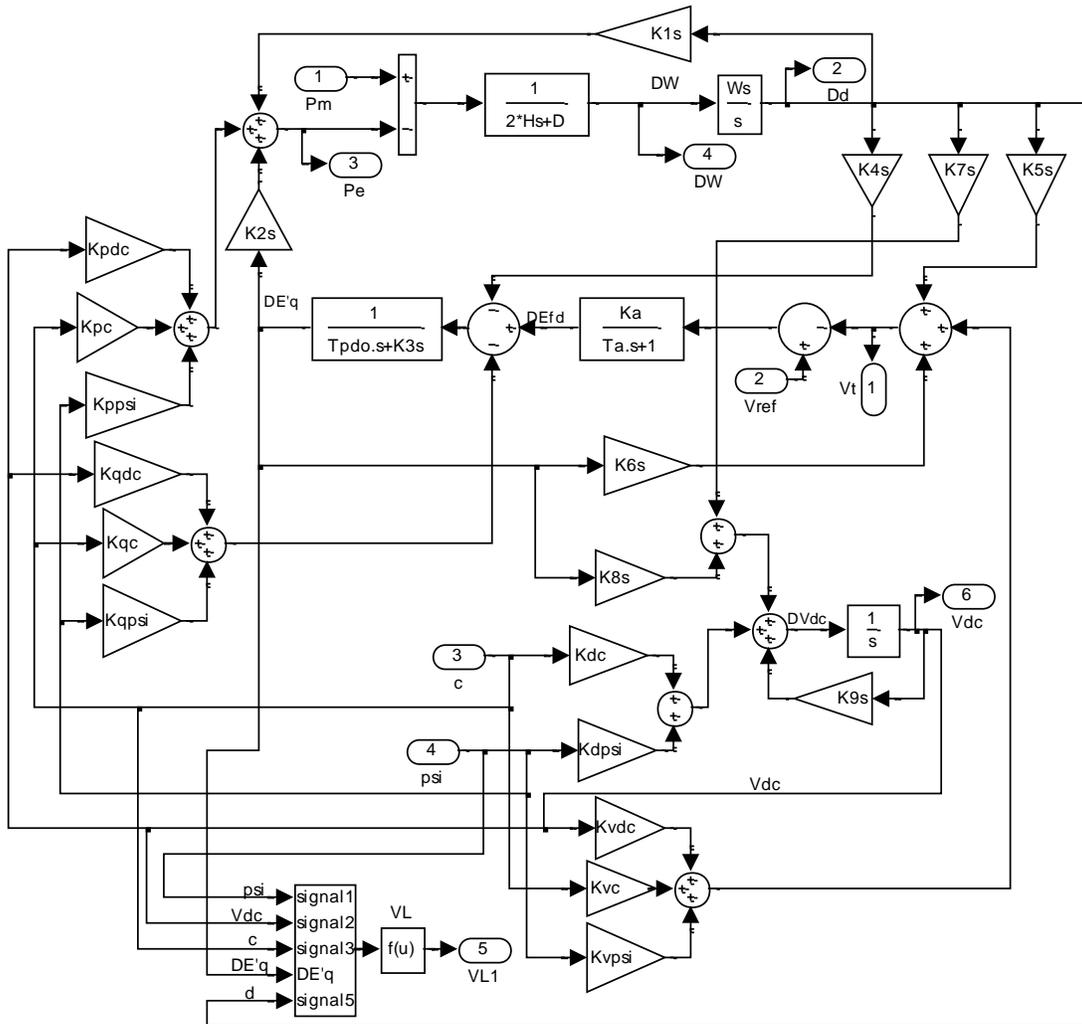


Figura 19: Modelo linealizado del sistema SMIB con STATCOM

Capítulo 3

CONTROL LÓGICO DIFUSO

El control difuso se introdujo a comienzos de los años 70 como un intento de diseño de controladores para sistemas que son estructuralmente difíciles de modelar, debido a su naturaleza no lineal y otras complejidades en la obtención del modelo. Durante los últimos años los sistemas de control con lógica difusa (*FLC*) se han venido consolidando como una herramienta útil para tratar y modelar sistemas complejos y no lineales, así los *FLC* han sido incorporados en un gran número de productos y procesos [15].

Las principales razones para tal proliferación de aplicaciones, quizás sean la sencillez conceptual de los sistemas basados en lógica difusa, su facilidad para adaptarse a casos particulares con pocas variaciones de parámetros, su habilidad para combinar en forma unificada expresiones lingüísticas con datos numéricos, y el no requerir de algoritmos muy sofisticados para su implementación. La lógica difusa proporciona un medio para enfrentar situaciones del mundo real, complejas y dinámicas, que son más fácilmente caracterizadas por palabras que por modelos matemáticos. Un controlador difuso contiene un algoritmo capaz de convertir una estrategia de control lingüística en una de control automático, con lo que se busca imitar el razonamiento humano [9].

En general, los controladores difusos son sistemas expertos que emplean el conocimiento como fundamento, expresado en términos de reglas difusas y de un proceso de inferencia para resolver un problema de control dado [50].

El diagrama de la figura 20 muestra en forma esquemática la estructura general del controlador difuso [32]. La composición de un sistema de control difuso consiste las siguientes etapas:

1. Normalización de las entradas
2. Difusión de las entradas
3. Inferencia o activación de reglas
4. Concreción de las salidas
5. Desnormalización de las salidas

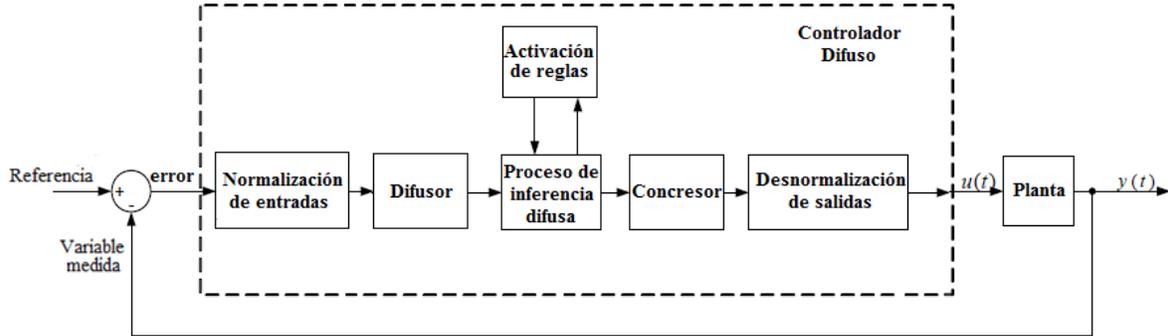


Figura 20: Estructura general del control difuso

Los controladores difusos, al igual que los controladores clásicos, toman el valor de las variables de entrada, procesan y actúan sobre sus salidas a fin de controlar la planta.

3.1. Tipos de controladores difusos

Los métodos de control basados en lógica difusa se pueden adaptar a los diferentes tipos de controladores tradicionales. Estas estructuras son variadas, extendidas y pueden ser mezcladas con otros métodos. Las estructuras definidas son [32]:

1. Controladores difusos del tipo PID con las variantes.
 - a. Controlador difuso PD
 - b. Controlador difuso PI
2. Controladores difusos basados en modos deslizantes con sus variantes.
 - a. Modos deslizantes difusos con capa de frontera
 - b. Modos deslizantes difusos con capa de frontera y término de compensación
 - c. Modos deslizantes de alto orden
3. Controladores difusos basados en el mecanismo de Takagi-Sugeno.

Para el diseño de un controlador tipo Takagi-Sugeno se necesita un conocimiento cuantitativo de la planta.

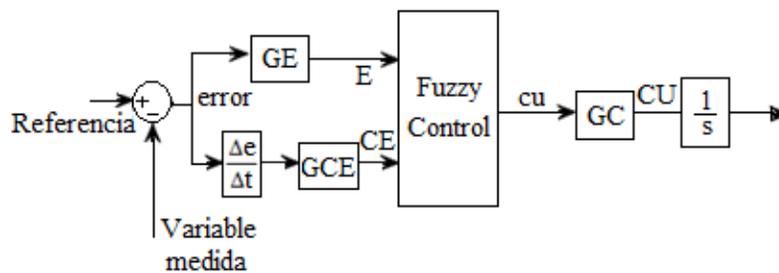


Figura 21: Estructura controlador difuso PID

El controlador difuso PID es ampliamente usado para controlar sistemas de segundo orden con características tanto lineales como no lineales. Los controladores difusos con modos deslizantes se aplican para el control de sistemas no lineales de alto orden con incertidumbres en el modelo y sometidos a fuertes perturbaciones [32]. Los controladores basados en razonamiento del tipo T-S se aplican en plantas con fuertes no linealidades, donde las acciones de control pueden ser localmente descritas mediante consecuentes lineales o no lineales.

Los controladores difusos del tipo PID, PI y PD son basados en el razonamiento del tipo Mamdani.

3.2. Métodos de diseño de un controlador difuso

Para el diseño de los controladores difusos, una vez se han definido sus aspectos básicos, se pueden manejar cualquiera de las siguientes alternativas [32]:

1. Diseño Heurístico
2. Control difuso análogo a un PID
3. Diseño basado en el modelo

3.2.1. Diseño heurístico

El ajuste de los parámetros del controlador difuso se hace mediante ensayo y error. Se parte de la información disponible sobre el funcionamiento del sistema y las acciones de control a realizar para garantizar su funcionamiento estable y el cumplimiento de las especificaciones de comportamiento. La información de la cual se parte es de tipo lingüística o datos de entrada salida, y en cualquier caso, la escogencia de cuantas funciones de pertenencia, su forma y ubicación corresponden más a la intuición del diseñador que a una exigencia de diseño. Los primeros controladores difusos fueron diseñados bajo estos principios [32].

Al igual que los controladores convencionales, los difusos pueden utilizar el error, la variación del error y/o la integral del error como parámetros de entrada. Esto no excluye la utilización de otras variables a la entrada del controlador. La variable de salida tiene que ver con la acción de control tendiente a ajustar la variable controlada para que alcance su valor de referencia.

Por ejemplo, suponiendo que se desea controlar un sistema MISO (dos entradas y una salida), resulta conveniente utilizar como variables de entrada al controlador, el error existente en el proceso ($e=r-y$, diferencia entre la referencia y el valor actual de salida), y el cambio del error (de/dt) ó la acumulación del error ($\int e(t)dt$). Luego cada una debe ser fusificada, es decir, se deben definir una cantidad de funciones de pertenencia que representen los diferentes estados (lingüísticos) que pueden tomar estas variables (por ejemplo, error pequeño, mediano o grande). Para realizar este punto se dispone de una gran cantidad de funciones, tales como: gaussianas, triangulares, trapecios [32].

Un procedimiento para el ajuste manual de un controlador difuso PD+I (FPD+I) es el siguiente (con algunas modificaciones también cubre el control difuso PD (FPD) y el control difuso incremental (Finc)) [32]:

1. Ajuste GE de acuerdo al escalón y el universo, para explotar el rango del universo totalmente.
2. Remueva la acción integral y derivativa haciendo $GIE = GCE = 0$. Ajuste GU para dar la respuesta deseada, ignorando cualquier valor final de deriva.
3. Incremente la ganancia proporcional por medio de GU, y ajuste la ganancia derivativa por medio de GCE para amortiguar el sobrepaso.
4. Ajuste la ganancia integral por medio de GIE para remover cualquier valor final de deriva.
5. Repita todo el procedimiento hasta que GU sea tan grande como sea posible.

Parece plausible que el margen de estabilidad sea cercano en algún sentido a la aproximación lineal. En simulación, al menos, es posible experimentar con diferentes superficies para el controlador y tener una idea del margen de ganancia y la sensibilidad a tiempos muertos. Como en todos los sistemas no lineales, sin embargo, las respuestas son dependientes de la amplitud y por tanto dependen del tamaño del paso [32].

3.2.2. Control difuso análogo a un PID

Cuando el problema es regular la salida de un proceso alrededor de un valor de referencia (setpoint), es natural tomar el error como una entrada, igualmente, su derivada e integral también pueden ser tenidas en cuenta como otras entradas adicionales. En el caso de un controlador difuso PID es difícil establecer el efecto de cada ganancia en el tiempo de subida, tiempo de establecimiento o el sobrepaso, ya que su esencia es no lineal y además tiene más parámetros de ajuste que uno PID convencional [32,51].

Entre los métodos más conocidos para el ajuste de los controladores PID convencionales están el de Ziegler - Nichols, ubicación de polos, optimización, o autoajustados. Asimismo, los controladores difusos muestran similitud con los controladores PID bajo algunas suposiciones. Sin embargo aún existe una brecha en los métodos de ajuste de los controladores clásicos PID y la estrategia para los difusos del tipo PID.

La idea del control difuso análogo al PID es comenzar con un controlador PID convencional bien ajustado y reemplazarlo luego con uno difuso lineal; posteriormente hacer no lineal el controlador difuso y realizar su ajuste final [32,51].

Un procedimiento para el ajuste de un controlador difuso a partir de un controlador PID, es el siguiente [32]:

1. Ajustar un controlador PID.
2. Reemplazar con un controlador difuso lineal equivalente.
3. Volver el controlador difuso no lineal.
4. Realizar su ajuste fino.

Capítulo 4

DESARROLLO DEL CONTROLADOR DE OSCILACIONES DEL STATCOM

El sistema de control del STATCOM permite que cumpla correctamente su función como elemento compensador de reactivos. El control primario del inversor es tal que se regula el flujo de corriente reactiva a través del STATCOM. En otras palabras, el controlador se utiliza para operar el inversor de modo que el ángulo de fase entre el voltaje del inversor y el voltaje de línea se ajuste dinámicamente, tal que el STATCOM genere o absorba potencia reactiva en el punto de conexión [5,11].

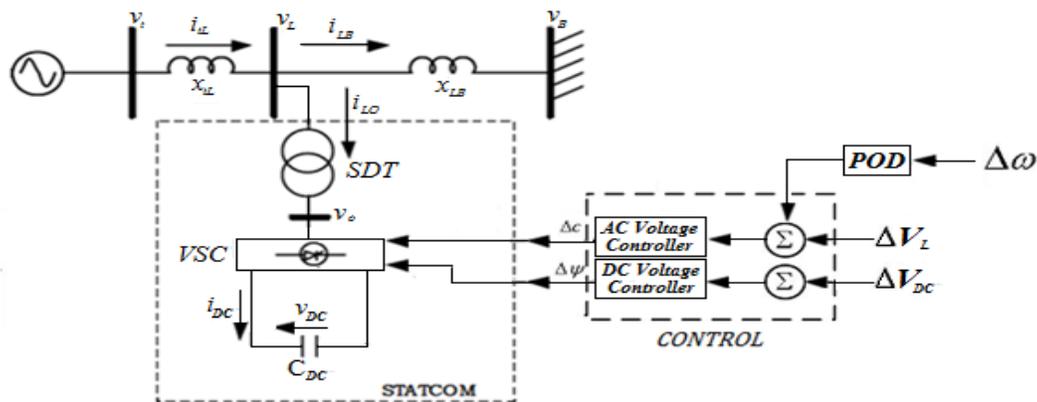


Figura 22: Sistema SMIB con STATCOM y lazos Control

4.1. Mecanismo de control del STATCOM

El sistema de control del STATCOM comprende dos controladores:

- **Regulador de tensión DC**

El regulador de tensión DC del STATCOM, regula la tensión del circuito intermedio. La tensión DC se regula mediante la modulación del ángulo de fase de la tensión del convertidor en derivación [14]. El regulador de tensión controla el voltaje DC a través del capacitor del STATCOM.

En este trabajo se comparan dos configuraciones de control del regulador de tensión DC mostrado en la figura 23. La figura 23(a) muestra la estructura del regulador de tensión DC con un control clásico PI, y la figura 23(b) muestra el modelo dinámico de regulador de tensión DC con un control difuso, sustituyendo al control PI.

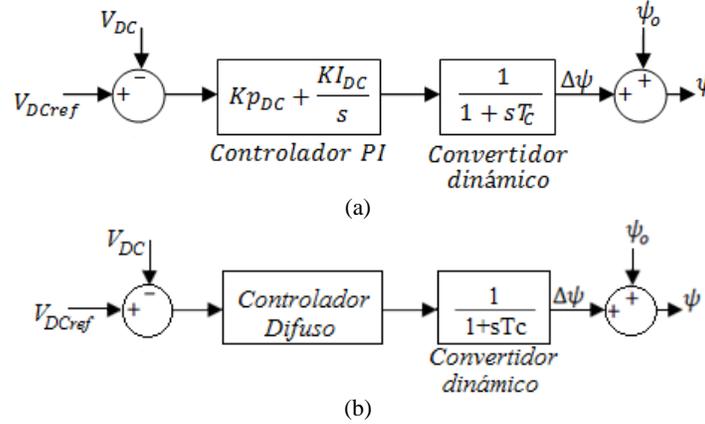


Figura 23: (a) Regulador de tensión DC con control PI, (b) Regulador de tensión DC con control difuso

• **Regulador de tensión AC**

Este controlador del STATCOM, regula la tensión AC en terminales de acuerdo a la referencia que se logra a través del cambio de magnitud en la tensión de salida del convertidor, además cuenta con un amortiguador de oscilaciones AC adicional [14]. El controlador de oscilaciones, puede ser considerado como un compensador de adelanto-retraso o como un bloque de control de lógica difusa, entre otros métodos, con el fin de mejorar la amortiguación de oscilaciones del sistema. En este trabajo es considerado un controlador difuso como amortiguador de oscilaciones adicional (POD).

El modelo del controlador de tensión AC, más el controlador de oscilaciones (POD), es el siguiente:

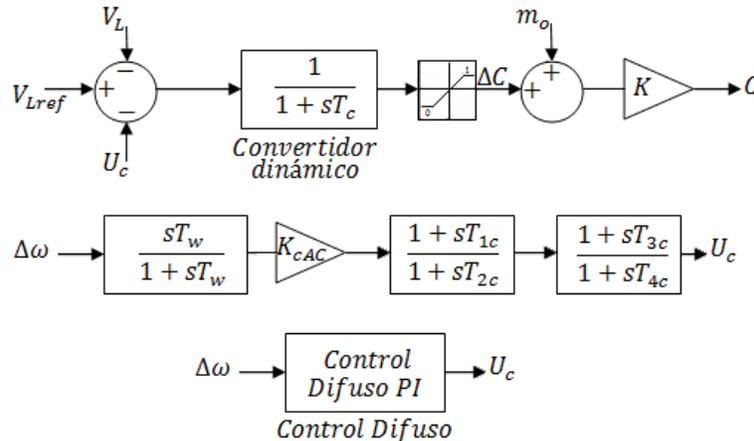


Figura 24: Regulador de tensión AC con Control de amortiguación de oscilaciones

La figura 24 muestra el modelo del regulador de tensión AC, con dos configuraciones del control de amortiguación de oscilaciones (POD), una con un compensador de adelanto-retraso, y otra con un control Difuso PI. En este caso, la configuración de POD implementada es la basada en el control difuso.

En este trabajo, para el STATCOM, se diseñan dos controladores difusos, uno para reemplazar el control clásico PI del regulador de tensión DC (figura 23(b)), y otro como amortiguador de oscilaciones (POD) del regulador de tensión AC.

4.2. Implementación del control difuso del STATCOM, en MATLAB

• Diseño del control PI del regulador de tensión DC:

Los parámetros del controlador convencional PI del regulador de tensión DC mostrado en la figura 23 (a), se obtienen a partir del método de Ziegler-Nichols, y de la función de transferencia del sistema como se muestra en las figuras 25 y 26:

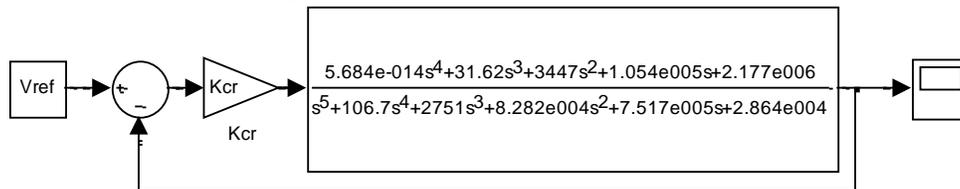


Figura 25: Función de Transferencia del SMIB con STATCOM

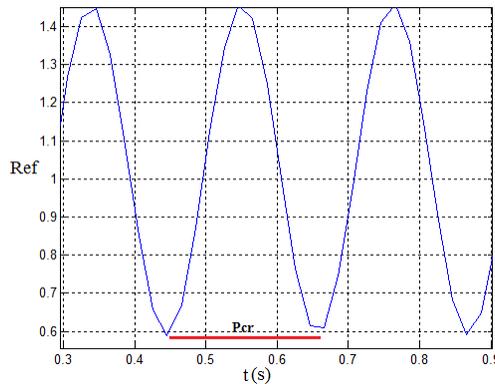


Figura 26: Respuesta con máxima acción proporcional.

De las gráficas anteriores y a partir del método de Ziegler-Nichols, se obtienen los parámetros K_{PDC} y K_{IDC} del control PI, así:

Tabla 1. Reglas de Ziegler-Nichols

Control PI	K_{PDC}	K_{IDC}
	$0.45K_{cr}$	$1.2K_p/P_{cr}$

A partir del comportamiento del sistema SMIB con STATCOM bajo la acción del control PI, se pueden inferir las acciones a realizar para modelar el control difuso y lograr la respuesta deseada.

• **Diseño de los controles difusos de los reguladores de tensión AC y DC:**

El tipo de control difuso empleado en los reguladores de tensión AC y DC del STATCOM, es mostrado en la figura 27. El cual corresponde a la configuración de un controlador difuso de tipo PI, no lineal con dos entradas y una salida.

Para el regulador de tensión AC las entradas son el error de velocidad angular ω ($e\omega$) y la acumulación del error ($\sum e\omega$), mientras que para el regulador de tensión DC las entradas son el error de voltaje V_{DC} (eV_{DC}) y la acumulación del error ($\sum eV_{DC}$).

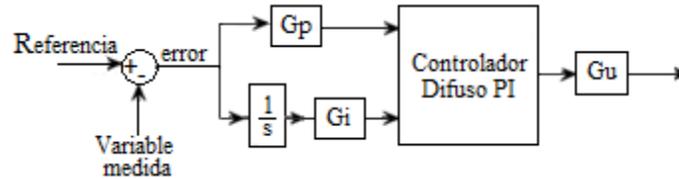


Figura 27: Estructura Controlador difuso PI

Para el diseño de cada control difuso, una vez definida su estructura, se emplea el método heurístico en el ajuste de los parámetros y de las ganancias del controlador. Es decir, se calculan las ganancias mediante ensayo y error partiendo de la información disponible sobre el funcionamiento del sistema y de las respuestas obtenidas del sistema bajo la acción del control convencional PI.

Posteriormente, y a partir de lo anteriormente nombrado, se conforman los controles difusos mediante las siguientes etapas:

– **Definición de variables de entrada y salida**

A partir de lo anteriormente nombrado, se toman como variables de entrada al control difuso del regulador de tensión DC, el error de voltaje V_{DC} (eV_{DC}) y la acumulación del error ($\sum eV_{DC}$), y como salida la señal de control U_{ψ} . Se establecen los límites del universo de discurso de cada variable de la siguiente manera:

$$eV_{DC} = [-1,1]$$

$$\sum eV_{DC} = [-1,1]$$

$$U_{\psi} = [-4.65, 4.65]$$

De igual manera se establecen los límites del universo de discurso de cada variable para el POD del regulador de tensión AC. Para este caso, se toman como variables de entrada el error de velocidad angular ω ($e\omega$) y la acumulación del error ($\sum \omega$), y como variable de salida la señal de control U_C , obteniendo los siguientes universos de discurso:

$$e\omega = [-1,1]$$

$$\sum e\omega = [-1,1]$$

$$U_C = [-1.85, 1.85]$$

Todas las variables de entrada se normalizan a través de ganancias G_p y G_I .

– **Fusificación o difusión de las entradas**

El difusor convierte las señales numéricas de las entradas del mundo real en variables difusas. Antes de entrar al difusor [32].

Cada variable (el error, la acumulación del error y la salida), de ambos controles, presenta tres funciones de pertenencia, como se muestra en la figuras 28 y 29. La fusificación se efectúa por separado para cada una de las variables de entrada.

Las funciones de pertenencia de las variables de entrada y de la variable de salida, usadas en los controladores difusos son funciones gaussianas.

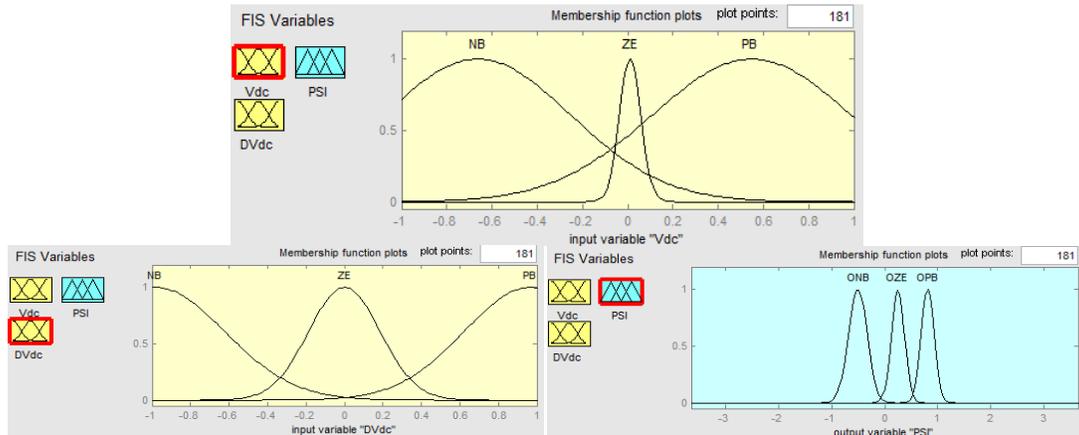


Figura 28: Funciones de pertenencia del regulador de tensión DC

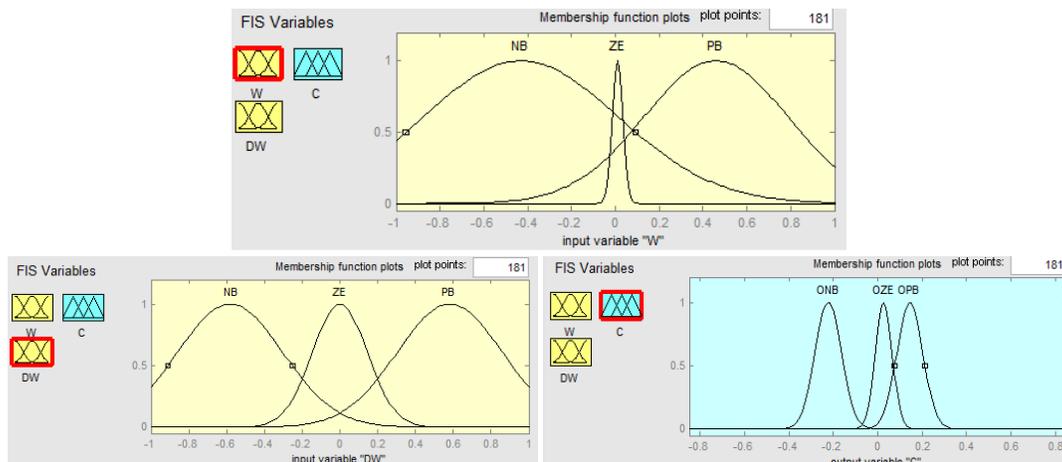


Figura 29: Funciones de pertenencia del regulador de tensión AC

– **Inferencia Difusa**

El mecanismo de inferencia difusa escogido es de tipo Mamdani, por ser uno de los más adecuados y comunes en aplicaciones de sistemas de control con lógica difusa [32]. Se utiliza el operador *prod* y el operador *min* para la implicación.

– **Base de Reglas Difusas**

El algoritmo de control se proporciona como un conjunto de expresiones del tipo:

$$Si \langle Antecedente \rangle Entonces \langle Consecuente \rangle$$

La base de reglas difusas, para ambos controles difusos, se obtuvo de manera heurística mediante ensayo y error, a partir de la observación detallada de la dinámica del sistema SMIB con STATCOM, bajo la acción del control PI del regulador de tensión DC y sin el amortiguador adicional (POD) en el regulador de tensión AC.

Las relaciones, del tipo sí-entonces, existentes entre las entradas al controlador difuso (eV_{DC} y $\sum eV_{DC}$, $e\omega$ y $\sum e\omega$), y la variable de salida (ψ , C), se resumen en la tabla 2.

Tabla 2. Base de Reglas Difusas STATCOM

$\sum e$ \ e	N	Z	P
N	P	P	Z
Z	P	Z	N
P	Z	N	N

Cada variable de entrada y salida es descompuesta en un grupo de términos difusos, donde cada uno de ellos representa un conjunto difuso en el universo de discurso de la variable. En este caso, cada variable es descompuesta en tres conjuntos difusos cada una.

N = Negativo

Z = Cero

P = Positivo

En la figura 30 se muestra la base de reglas difusas implementadas en el Fuzzy Logic Toolbox de MATLAB.

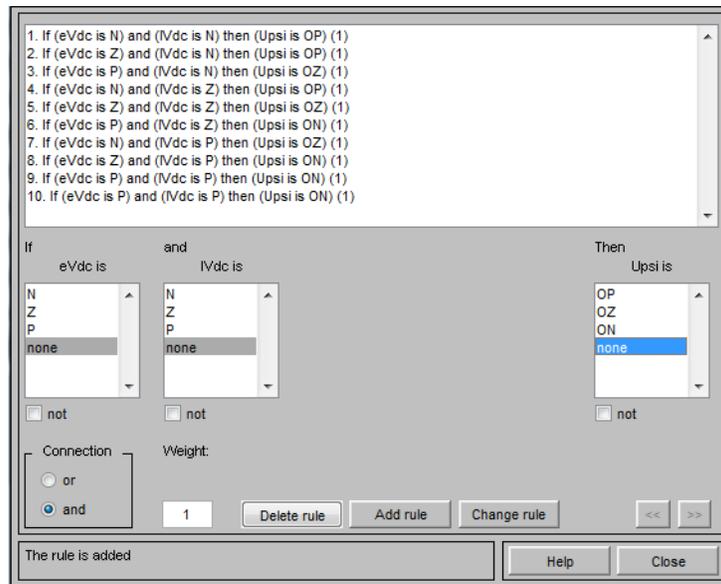


Figura 30: Base de reglas difusas

– *Defusificación o concreción de las salidas*

En esta etapa la acción entregada por el sistema difuso hay que transformarla del mundo difuso al real mediante un concretor que se encarga de hacer esa transformación. Como concretor se utilizó el método del centro de gravedad (centroide), por ser el más utilizado y el más eficiente de los métodos de concreción [32].

– *Desnormalización de las salidas*

Al ser normalizados las variables de entrada, entonces la variable de salida debe ser ajustada a un valor no normalizado antes de ser entregada como señal de control al regulador de tensión. Esto se hace multiplicando la salida del congresor por una ganancia G_u .

La sintonización de las ganancias G_p , G_i y G_u del control difuso PI se hace de manera heurística mediante el siguiente procedimiento de ajuste manual:

- a) Remover la ganancia integral, $G_i=0$.
- b) Ajustar la ganancia proporcional G_p para dar la respuesta deseada.
- c) Ajustar la ganancia integral G_i para eliminar el error de régimen permanente.
- d) Repetir hasta obtener el resultado deseado.

La ventaja del proceso de ajuste manual es que se hace de manera directa y se aplica de acuerdo a la forma en que el sistema responde. La desventaja es que puede tomar bastante tiempo desarrollar la manera de captar el comportamiento del sistema de acuerdo al ajuste, y además es difícil establecer cuándo el ajuste final es óptimo.

En la figura 31 se muestra el esquema general de pruebas del STATCOM con los reguladores de tensión AC y DC, implementado en Simulink.

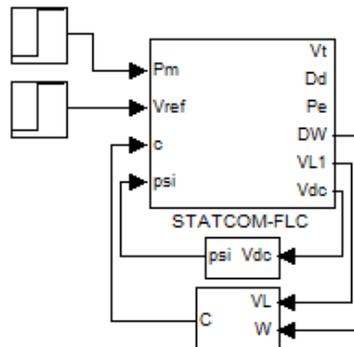


Figura 31: Sistema SMIB con STATCOM y reguladores de tensión

Las figuras 32 y 33 muestran los modelos de los reguladores de tensión AC y DC implementados.

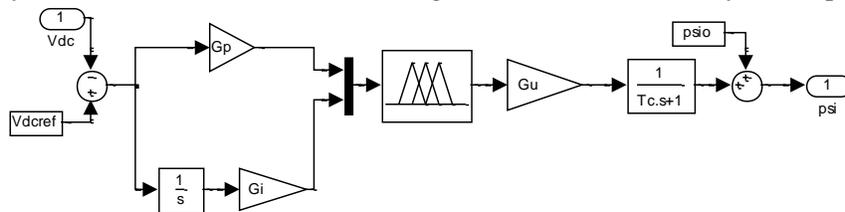


Figura 32: Regulador de tensión DC con Control Difuso, implementado en Simulink

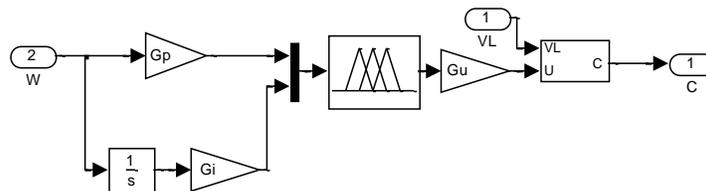


Figura 33: Regulador de tensión AC con Control Difuso como POD, implementado en Simulink

4.3. Resultados de la implementación del control del STATCOM

A continuación se muestran los resultados obtenidos a partir de la implementación del sistema SIMIB con STATCOM incluido, bajo dos configuraciones.

La primera configuración, corresponde al STATCOM más regulador de tensión DC con control PI (Figura 23 (a)), y más regulador de tensión AC sin POD. A esta primera configuración se le citará en los gráficos como *STATCOM+PI*.

La segunda configuración, corresponde al STATCOM más regulador de tensión DC con control difuso (Figura 28), y más regulador de tensión AC con control difuso como POD (Figura 29). A esta configuración se le citará en los gráficos como *STATCOM+FUZZY*.

En este sistema SMIB (Máquina Síncrona-Barraje Infinito), se restringen los valores de potencia activa y reactiva en los límites mostrados a continuación:

$$\begin{aligned} 0.6\text{pu} &\leq P \leq 1\text{pu} \\ 0.2\text{pu} &\leq Q \leq 0.4\text{pu} \end{aligned}$$

A partir de estos límites se definen los puntos de operación simulados. Los cuales comprenden condición de operación nominal, condición de baja carga y condición de sobrecarga.

Para el análisis de respuesta del sistema, se tendrán en cuenta los siguientes parámetros:

– *Sobreimpulso máximo porcentual M_p* : valor de pico máximo de la curva de respuesta, ponderado por el valor final obtenido.

$$M_p = \frac{(M(tp) - M(tr))}{M(tr)} * 100\%$$

La magnitud del sobreimpulso porcentual máximo indica la estabilidad relativa del sistema.

– *Tiempo de establecimiento t_s* : tiempo requerido por la curva para alcanzar y mantenerse en un rango alrededor del valor final con una magnitud especificada por el porcentaje absoluto del valor final (habitualmente 2% o 5%). El tiempo de establecimiento está relacionado con la constante de tiempo mayor del sistema de control.

Interesa tener siempre sistemas de control que minimicen el máximo sobreimpulso y los tiempos de respuesta transitoria, manteniendo la máxima precisión posible.

Condición de operación de Baja carga: $P = 0.6$ y $Q = 0.2$:

Tabla 3. Valores propios del sistema SMIB con STATCOM en condición de baja carga

Valores propios sistema SMIB	Valores Propios sistema SMIB con STATCOM
$-10.2212 + 30.1154j$	-84.4800
$-10.2212 - 30.1154j$	$-5.1914 - j26.9248$
$-0.0675 + 6.7203j$	$-5.1914 + j26.9248$
$-0.0675 - 6.7203j$	-0.0383
	-11.7841

Como puede observarse, los valores propios son pares conjugados con parte real negativa, lo que indica que el sistema SMIB, en condición de baja carga, posee oscilaciones amortiguadas.

Las respuestas de V_t y P_e en el tiempo, ante un aumento del 10% en la tensión de referencia, se observan a continuación:

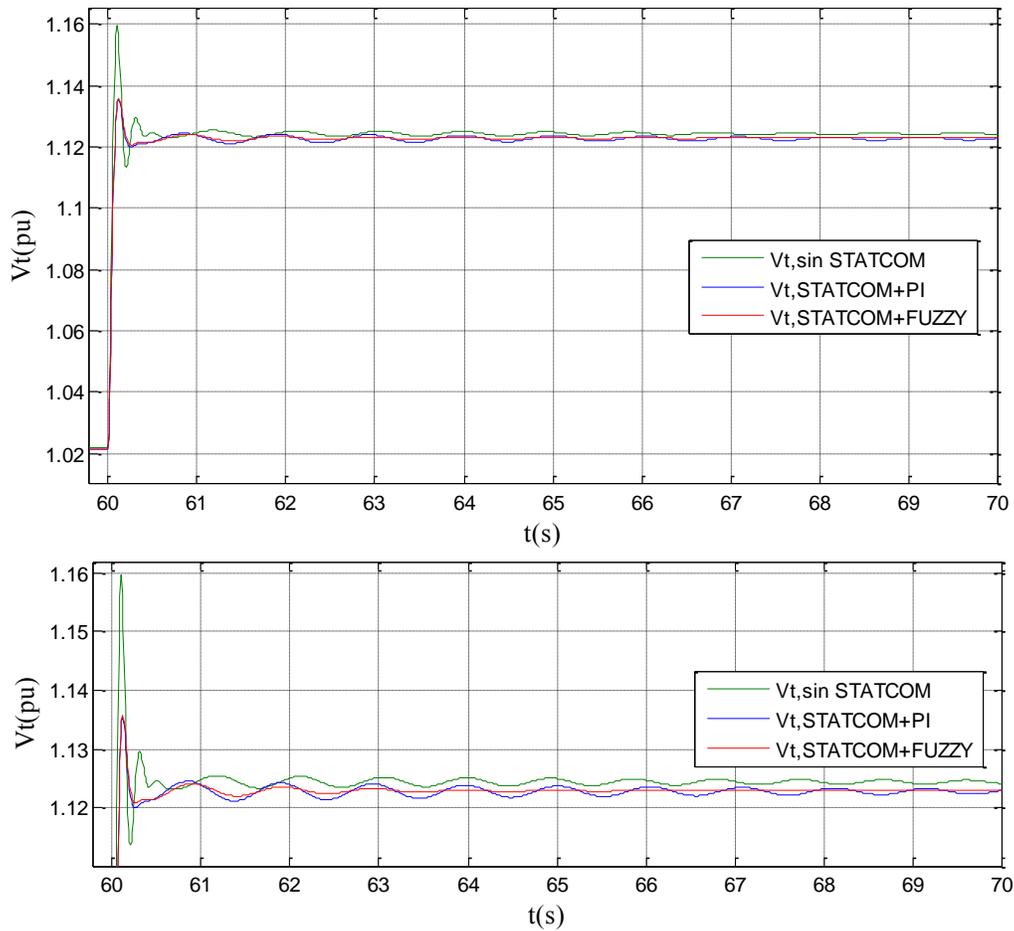


Figura 34: Respuesta de V_t en baja carga, ante un aumento del 10% en la tensión de referencia

Tabla 4. Parámetros de respuesta del sistema SMIB con STATCOM y control difuso, en baja carga

	SMIB	SMIB+STATCOM+PI	SMIB+STATCOM+FUZZY
ts(s)	0,4	0,35	0.27
Mp(%)	3,17	1.14	1.15

En la figura 34 se observa que con la inclusión del STATCOM, el tiempo de establecimiento y el máximo sobreimpulso se reducen considerablemente respecto al sistema sin STATCOM.

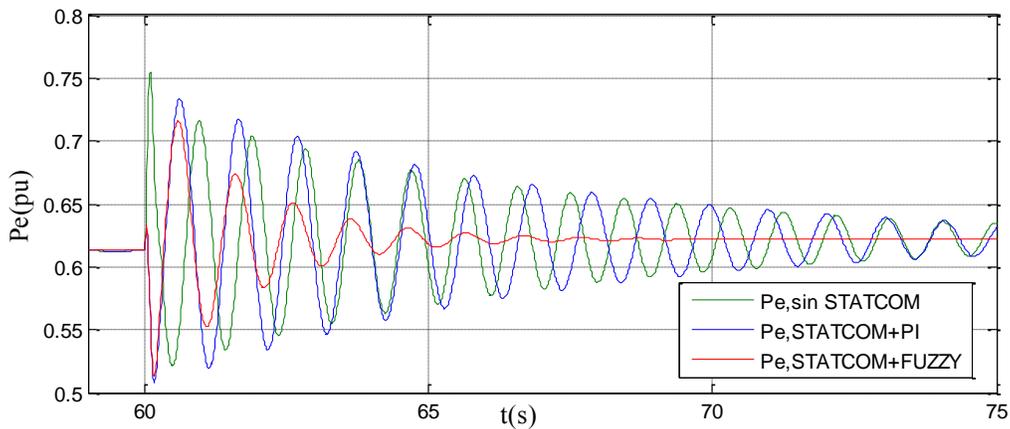


Figura 35: Respuesta de P_e en baja carga ante un aumento del 10% en la tensión de referencia

En la figura 35 se observa que la potencia eléctrica P_e , ante una perturbación aplicada en la tensión de referencia V_{ref} , no sufre cambios en su nivel.

El STATCOM con el regulador de tensión DC con PI, más regulador de tensión AC sin POD (STATCOM+PI), tiene baja amortiguación de las oscilaciones del sistema. En las respuestas del STATCOM con regulador de tensión AC más control difuso (STATCOM+ FUZZY), se logra una mayor amortiguación de las oscilaciones del sistema.

Las respuestas de V_t y P_e en el tiempo, ante un aumento del 1.5% en la Potencia mecánica de entrada se observan a continuación:

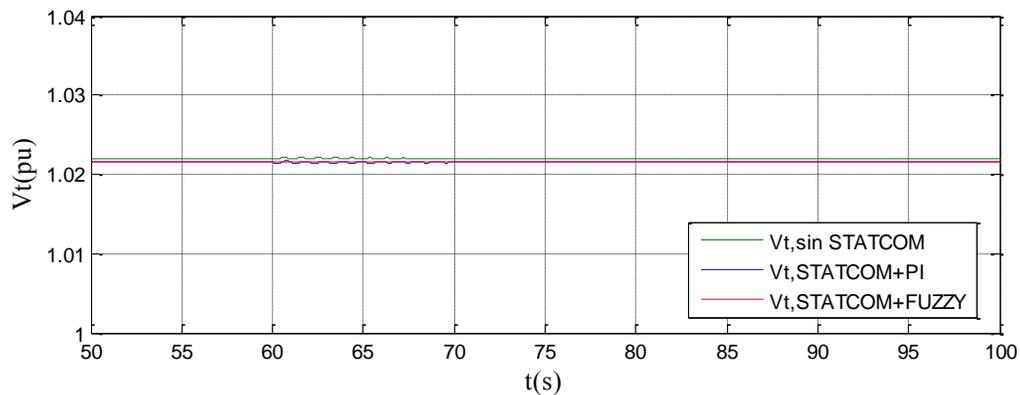


Figura 36: Respuesta de V_t en baja carga ante un aumento del 1.5% en la Potencia mecánica

En la figura 36 es de notar que V_t no sufre ningún cambio ante la perturbación en P_m . Debido a que la tensión en terminales V_t no varía ante la perturbación aplicada en P_m y que por su parte la potencia eléctrica P_e tampoco varía ante la perturbación aplicada en V_{ref} entonces las gráficas de éstas serán omitidas en los resultados posteriores.

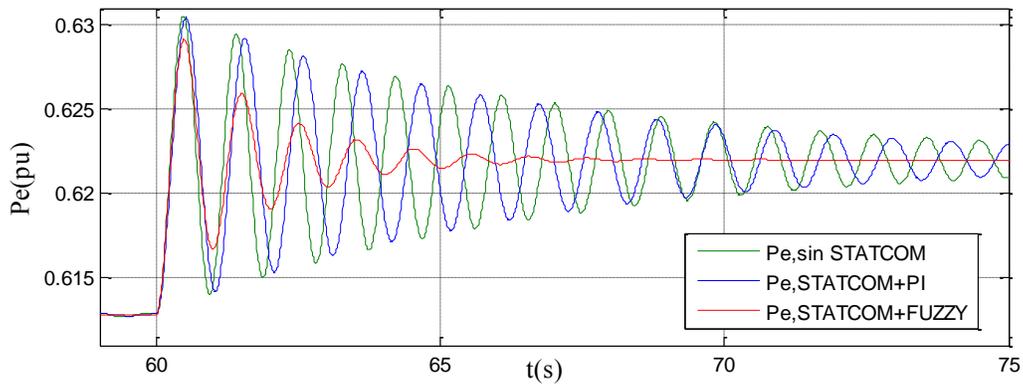


Figura 37: Respuesta de P_e en baja carga ante un aumento del 1.5% en la Potencia mecánica

En la figura 37 se observa que el sistema SMIB con STATCOM con acción del control difuso, logra una mejor amortiguación de las oscilaciones que con la acción del control PI.

Condición de operación nominal: $P = 0.7$ y $Q = 0.3$:

Tabla 5. Valores propios del sistema SMIB con STATCOM en condición de operación nominal

Valores propios sistema SMIB	Valores Propios sistema SMIB con STATCOM
$-10.2443 + 29.8161j$	-141.19
$-10.2443 - 29.8161j$	$-4.53 + 26.90j$
$-0.1194 + 6.8109j$	$-4.53 - 26.90j$
$-0.1194 - 6.8109j$	-0.08
	-13.17

En condición de operación nominal, los valores propios son pares conjugados con parte real negativa, es decir, el sistema sigue presentando oscilaciones amortiguadas.

Respuesta de V_t en el tiempo, ante un aumento del 10% en la tensión de referencia:

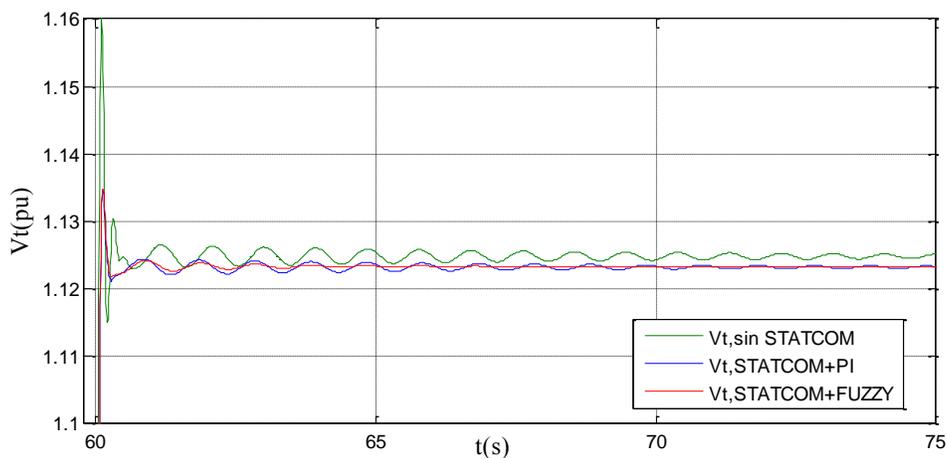


Figura 38: Respuesta de V_t en carga nominal ante un aumento del 10% en la tensión de referencia

Tabla 6. Parámetros de respuesta del sistema SMIB con STATCOM y control difuso, condición nominal

	SMIB	SMIB+STATCOM+PI	SMIB+STATCOM+FUZZY
ts(s)	0,4	0,22	0.21
Mp(%)	3,12	1.02	1.02

En la figura 38 se muestra que el máximo sobreimpulso se minimiza con la presencia del STATCOM.

Respuesta de P_e en el tiempo, ante un aumento del 1.5% en la Potencia mecánica de entrada:

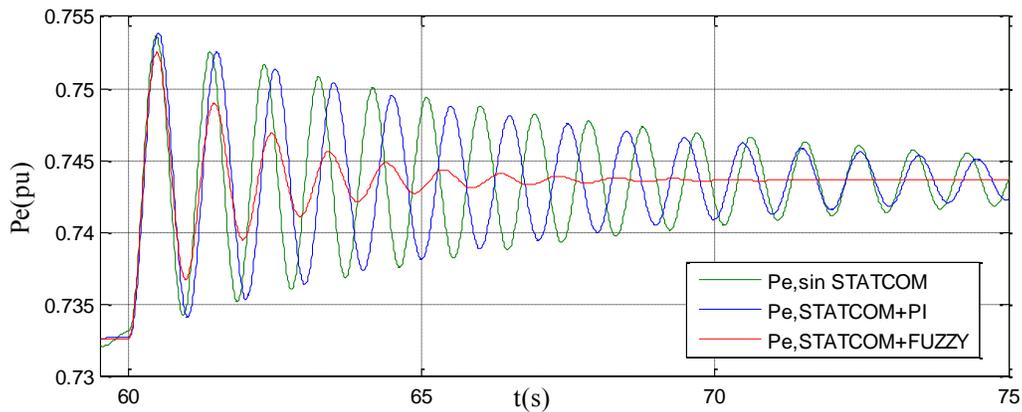


Figura 39: Respuesta de P_e en carga nominal ante un aumento del 1.5% en la Potencia mecánica

En la figura 39 se observa que la respuesta del sistema con el STATCOM es menos oscilatoria y como consecuencia se estabiliza antes.

Condición de Sobrecarga: $P = 1.2$ y $Q = 0.4$:

Tabla 7. Valores propios del sistema SMIB con STATCOM en condición de sobrecarga

Valores propios sistema SMIB	Valores Propios sistema SMIB con STATCOM
$-10.3716 + 28.8094j$	-141.22
$-10.3716 - 28.8094j$	$-3.61 + 26.56j$
$0.0078 + 6.9427j$	$-3.61 - 26.56j$
$0.0078 - 6.9427j$	-0.23
	-15.49

En condición de sobrecarga, los valores propios del sistema SMIB, son pares conjugados con parte real positiva, representando oscilaciones que incrementan su amplitud; mientras que los valores propios del sistema SMIB con STATCOM tienen parte real negativa, implicando una respuesta oscilatoria amortiguada. Es decir, al incluir el STATCOM en el sistema SMIB se logran mitigar las oscilaciones crecientes que inestabilizan al sistema en condición de sobrecarga.

Respuesta de V_t en el tiempo, ante un aumento del 10% en la tensión de referencia:

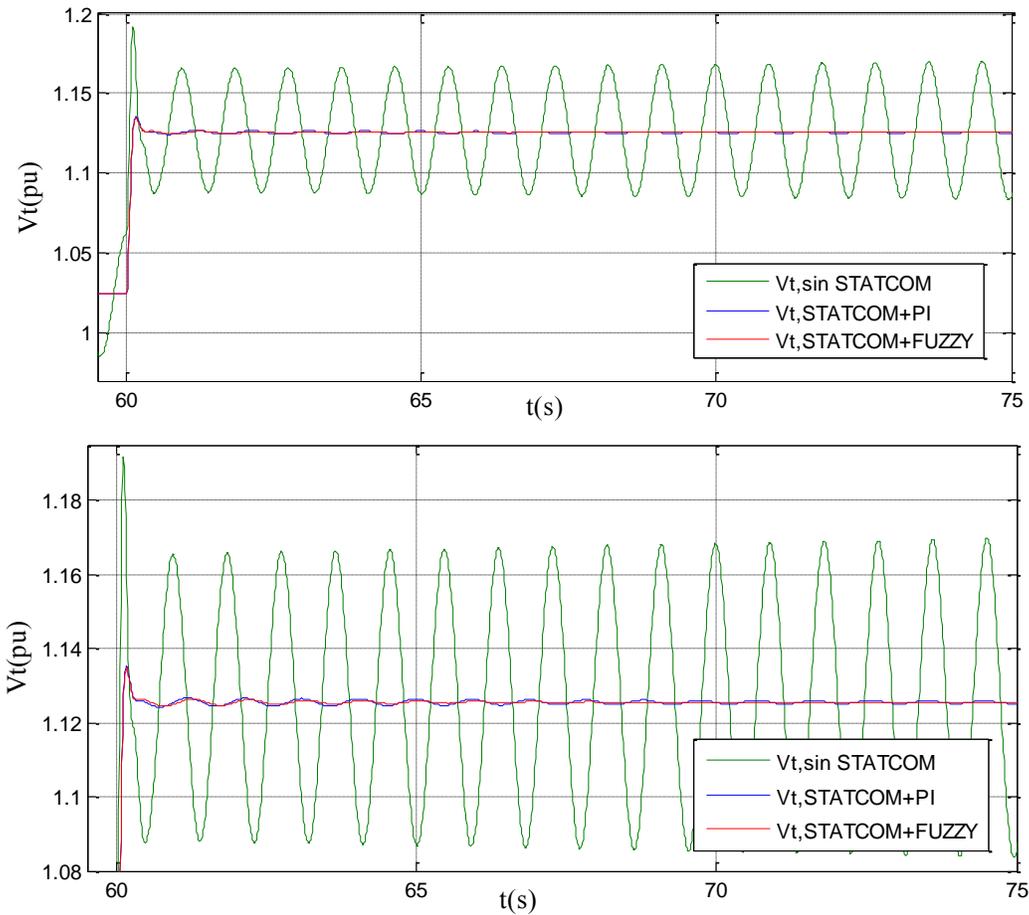


Figura 40: Respuesta de V_t en sobrecarga ante un aumento del 10% en la tensión de referencia

Tabla 8. Parámetros de respuesta del sistema SMIB con STATCOM y control difuso, en sobrecarga

	SMIB	SMIB+STATCOM+PI	SMIB+STATCOM+FUZZY
ts(s)	-	0,26	0.25
Mp(%)	-	0.906	0.835

En la figura 40 se observa que la respuesta del sistema SMIB es completamente oscilatoria, mientras que con el STATCOM incluido se sigue manteniendo una respuesta estable.

Respuesta de P_e en el tiempo, ante un aumento del 1.5% en la Potencia mecánica de entrada:

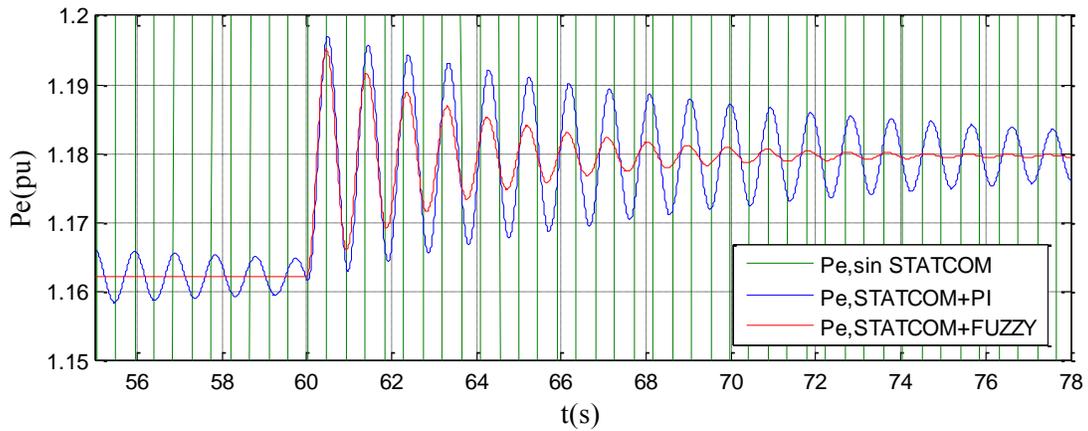


Figura 41: Respuesta de P_e en sobrecarga ante un aumento del 1.5% en la Potencia mecánica

La figura 41 muestra que el sistema SMIB con STATCOM con acción del control difuso, logra una mejor amortiguación de las oscilaciones que con la acción del control PI.

A partir de los resultados anteriores, se puede concluir que la acción de control difuso PI presenta mejores resultados que la acción de control PI convencional.

Capítulo 5

DESARROLLO DEL CONTROLADOR DE OSCILACIONES DEL SVC

La principal función del SVC es controlar la potencia reactiva y estabilizar el voltaje del sistema. El SVC está equipado con un regulador de tensión que incrementa el torque sincronizador pero, en general, la contribución de éste al amortiguamiento es pequeña. Si se quiere amortiguamiento adicional, se requiere de una acción de control suplementaria [35,36].

5.1. Mecanismo de control del SVC

Una acción de control suplementaria aplicada a los dispositivos SVC para incrementar el sistema de amortiguamiento es llamada POD, que consiste generalmente en un filtro, uno o más bloques de adelanto-retraso y un bloque de ganancia, mostrado en la figura 42 [34,37].

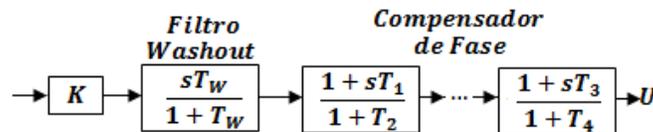


Figura 42: Controlador POD

Esta acción se implementa a fin de desplazar los valores propios del sistema hacia la izquierda, lo cual amplía y mejora el margen de estabilidad del sistema [35].

La figura 43 muestra el sistema SMIB con SVC y con control de amortiguación de oscilaciones.

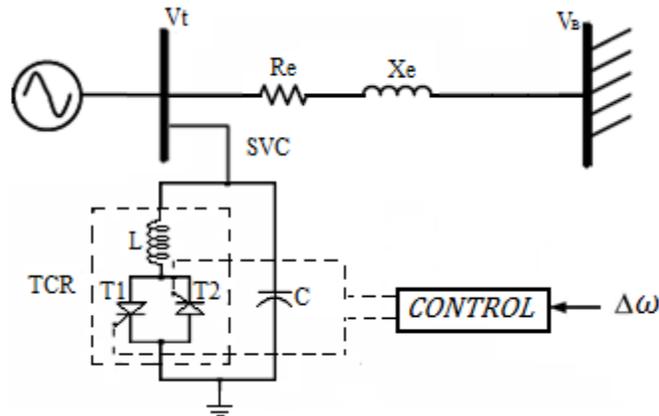


Figura 43: Sistema SMIB con SVC y Control

5.1.1. Cálculo de los parámetros del POD utilizando el método de compensación de fase.

Para aplicar el método de compensación de fase en adelanto por diagramas de bode, se establece el siguiente procedimiento [38]:

Considere un compensador de adelanto que tiene la siguiente función de transferencia,

$$G_c(s) = K_c \propto \frac{Ts + 1}{\alpha Ts + 1} = K_c \frac{s + 1/T}{s + 1/\alpha T} \quad (5.1)$$

Tiene un cero en $s = -1/T$ y un polo en $s = -1/\alpha T$. El valor mínimo de α está limitado por la construcción física del compensador de adelanto.

El valor máximo de fase se encuentra en:

$$\sin(\varphi_m) = \frac{1-\alpha}{1+\alpha} \quad (5.2)$$

y la frecuencia a la que ocurre la fase máxima es

$$\omega_m = \frac{1}{T\sqrt{\alpha}} \quad (5.3)$$

El procedimiento para diseñar un compensador de adelanto del SVC mediante el enfoque de la respuesta en frecuencia se muestra a continuación:

1. Se supone el compensador de adelanto de la Ec 5.1. Se determina la ganancia del compensador de acuerdo a la condición que debe cumplir el sistema compensado (usualmente el error en estado estable).
2. Usando la ganancia K_c determinada, se dibujan las trazas de Bode del sistema con la ganancia ajustada pero sin el resto del compensador, y se calcula el valor del margen de fase.

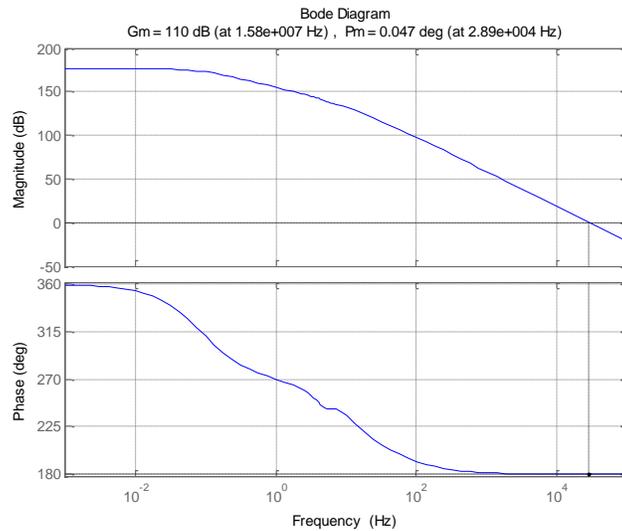


Figura 44: Diagrama de bode del sistema con la ganancia ajustada

3. Se determina el ángulo de adelanto de fase necesario que se agregará al sistema. Es mejor sobreestimar dicho ángulo, por lo general 5° por encima o por debajo; esto debido a que la introducción del compensador modifica la curva de magnitud desplazando la frecuencia de corte hacia la derecha.

$$\varphi_m = 0.047^\circ + MF_{deseado} + 5^\circ = 40.0470^\circ \quad (5.4)$$

4. Se establece el factor de atenuación α a partir de la ecuación

$$\alpha = \frac{1 - \sin(\varphi_m)}{1 + \sin(\varphi_m)}, \quad \alpha = 0.2170 \quad (5.5)$$

5. Se calcula la cantidad de atenuación de magnitud (dB) del compensador, luego se establece la frecuencia a la cual la magnitud del sistema no compensado es igual a ese valor. $-20\log(1/\sqrt{\alpha})$

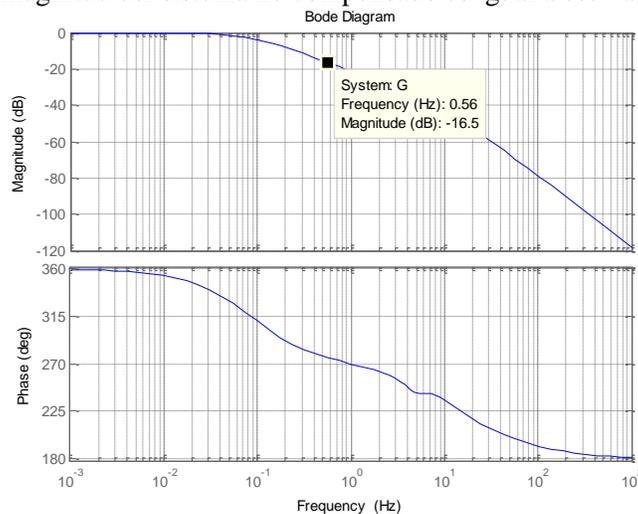


Figura 45: Diagrama de bode del sistema no compensado

Se seleccione ésta como la nueva frecuencia de corte $\omega_c = 0.4895$. Esta frecuencia corresponde a la frecuencia máxima de desfase, con la cual se determina el parámetro T del compensador.

$$\omega_c = \omega_m = \frac{1}{T\sqrt{\alpha}} \quad (5.6)$$

6. Se calcula el cero y el polo del compensador:

$$\text{Cero del compensador de adelanto: } -\frac{1}{T} = 0.2280$$

$$\text{Polo del compensador de adelanto: } -\frac{1}{T\alpha} = 1.0509$$

7. Usando los valores de K_c y el de α encontrados, se obtiene la función de transferencia del compensador diseñado.

$$G_c(s) = K_c \frac{s + 0.2280}{s + 1.0509}$$

5.1.2. Diseño del control PI

Los parámetros del controlador convencional PI, se obtuvieron por el método de lugar geométrico de raíces de la función de transferencia del sistema. Este procedimiento fue realizado en el toolbox de Matlab SISOTool, así:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)} \quad (5.7)$$

$$C(s) = K_p + \frac{K_I}{s} = \frac{K_p s + K_I}{s} \quad (5.8)$$

Función de transferencia del sistema en lazo abierto:

$$G(s) = \left(\frac{-7.39 * 10^{-13} s^4 + 49.15 s^3 + 1.676 * 10^4 s^2 + 3.695 * 10^5 s + 1.754 * 10^7}{s^5 + 489.7 s^4 + 4.323 * 10^4 s^3 + 1.156 * 10^6 s^2 + 3.343 * 10^7 s + 1.757 * 10^7} \right) \quad (5.9)$$

Polos en lazo abierto:

$$\text{PolosLA} = -\xi\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1 - \xi^2} = -10.16 \pm 30.15j \quad (5.10)$$

$\xi\omega_n = 10.16$ y $\omega_n\sqrt{1 - \xi^2} = 30.15$, entonces:

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{\left(\left(\frac{30.15}{10.16}\right)^2 + 1\right)}} = 0.319 \quad (5.11)$$

$$\omega_n = \frac{10.16}{\xi} = 31.815 \text{ rad/s} \quad (5.12)$$

5.2. Implementación del control difuso del SVC en MATLAB

El tipo de control difuso empleado en el SVC, es mostrado en la figura 27. El cual corresponde a una configuración de control difuso tipo PI, usada también para el STATCOM.

La figura 47, esquema SVC con Control Difuso, muestra que se usa un controlador difuso PI como amortiguador de oscilaciones del sistema.

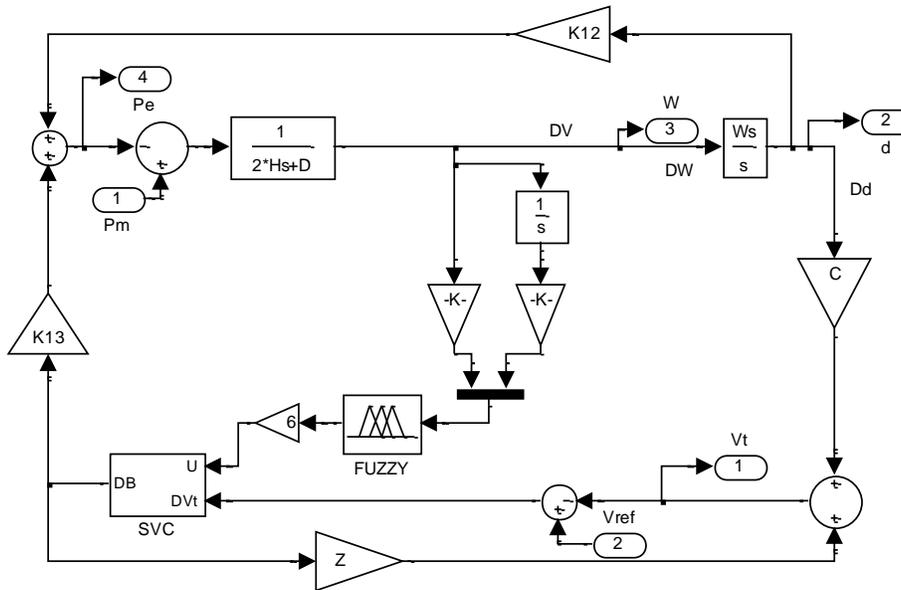


Figura 47: Esquema SVC con Control Difuso

Para este controlador difuso, al igual que en el caso del STATCOM, se emplea el método heurístico en el ajuste de los parámetros y las ganancias del controlador.

Para completar el diseño del control difuso del SVC se siguen estas etapas:

– Definición de variables de entrada y salida

Teniendo como variables de entrada al control difuso del SVC, el error de velocidad angular $e\omega$ y la acumulación del error ($\sum e\omega$), y como variable de salida la señal de control U , se obtienen los siguientes universos de discurso:

$$e\omega = [-0.06, 0.06]$$

$$\sum e\omega = [-1, 1]$$

$$U = [-0.5, 0.5]$$

– Fusificación

Antes de entrar al difusor [32], las variables de entrada se normalizan a través de las ganancias G_P y G_I .

Cada valor de entrada del error y la acumulación del error presenta un grado de pertenencia con dos conjuntos difusos, como se muestra en la figura 48.

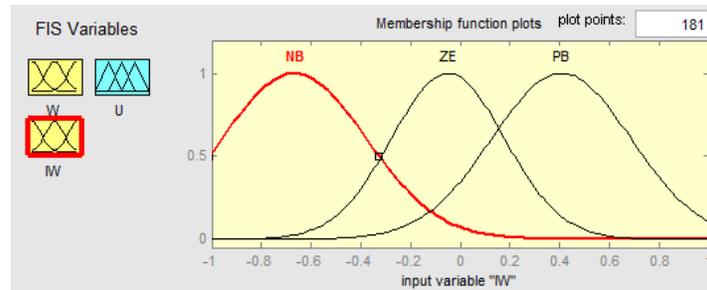


Figura 48: Funciones de pertenencia del control difuso del SVC

Las funciones de pertenencia de las variables de entrada y de la variable de salida, usadas en los controladores difusos son funciones gaussianas.

– **Inferencia Difusa**

El mecanismo de inferencia difusa escogido es de tipo Mamdani, por ser uno de los más adecuados y comunes en aplicaciones de sistemas de control con lógica difusa [32]. Se utiliza el operador *prod* y el operador *min* para la implicación.

– **Base de Reglas Difusas**

El algoritmo de control se proporciona como un conjunto de expresiones del tipo:

$$\text{Si } \langle \text{Antecedente} \rangle \text{ Entonces } \langle \text{Consecuente} \rangle$$

La base de reglas difusas se obtuvo a partir de la observación detallada de la dinámica del sistema SMIB con SVC bajo la acción del POD (compensador de fase y control PI) calculado. Las relaciones, del tipo sí-entonces, existentes entre las entradas al controlador difuso ($e\omega$ y $\sum \omega$), y la variable de salida (U) se resumen en la tabla 9.

Tabla 9. Base de Reglas Difusas SVC

$\sum e$ \ e	NB	ZE	PB
NB	P	P	Z
ZE	P	Z	N
PB	Z	N	N

Donde, NB (Negativo), ZE (Cero) y PB (Positivo), representan un conjunto difuso en el universo de discurso de la variable.

En la figura 49 se muestra la base de reglas difusas implementadas en el Fuzzy Logic Toolbox de MATLAB.

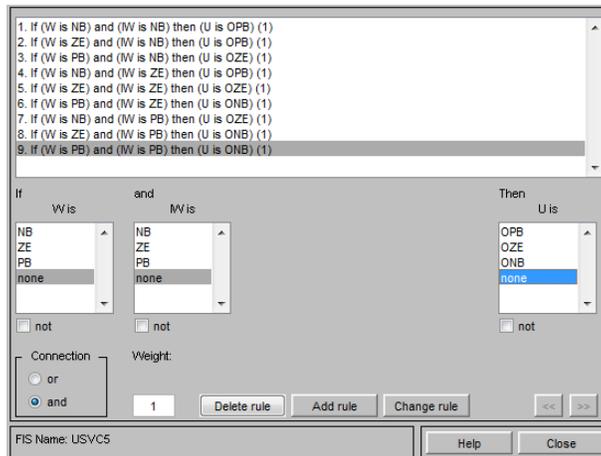


Figura 49: Base de reglas difusas del control del SVC

– Defusificación

Como congresor se utilizó el método del centro de gravedad (centroide) [32]. La variable de salida se ajusta a un valor no normalizado, a través de la ganancia G_u , antes de ser entregada como señal de control al SVC.

El ajuste de las ganancias G_p , G_I y G_u del control difuso PI se hizo de manera heurística mediante ensayo y error, siguiendo el mismo procedimiento usado en el cálculo del controlador difuso del STATCOM.

5.3. Resultados de la implementación del control del SVC

A continuación se muestran los resultados obtenidos, a partir de la implementación del sistema SIMIB con SVC incluido, bajo la acción del POD (compensador de fase y control PI) y del control difuso.

Condición de Baja carga: $P = 0.6$ y $Q = 0.2$:

Tabla 10. Valores propios del sistema SMIB con SVC en condición de baja carga

Valores propios sistema SMIB	Valores Propios sistema SMIB con SVC
$-10.2211 + 30.1151j$	-384.57
$-10.2211 - 30.1151j$	-141.08
$-0.1427 + 6.7191j$	$-10.156 + 30.16j$
$-0.1427 - 6.7191j$	$-10.156 - 30.16j$
	-0.32

Los valores propios del sistema SMIB con y sin SVC, son pares conjugados con parte real negativa, lo que indica que en condición de baja carga, el sistema presenta oscilaciones amortiguadas y, por consiguiente, es estable en ambos casos.

La respuesta de V_t en el tiempo, ante un aumento del 10% en la tensión de referencia se observa a continuación:

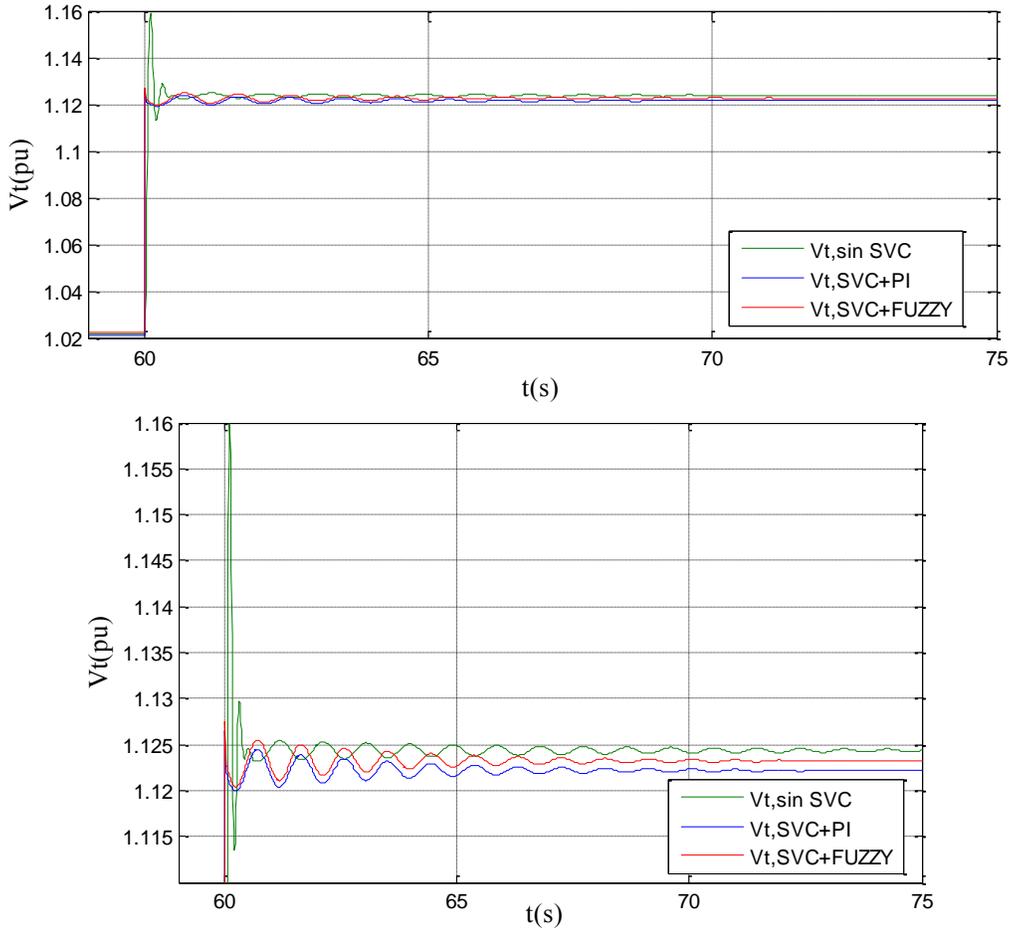


Figura 50: Respuesta de V_t en baja carga ante un aumento del 10% en la tensión de referencia

Tabla 11. Parámetros de respuesta del sistema SMIB con SVC y control difuso, en baja carga

	SMIB	SMIB+SVC+POD	SMIB+SVC+FUZZY
ts(s)	0,4	0,8	0,9
Mp(%)	3,17	0,4	0,38

En la figura 50 se observa que el máximo sobreimpulso del sistema SMIB con SVC se reduce considerablemente respecto al sistema sin SVC.

A continuación se muestra la respuesta de P_e en el tiempo, ante un aumento del 1.5% de la potencia mecánica de entrada:

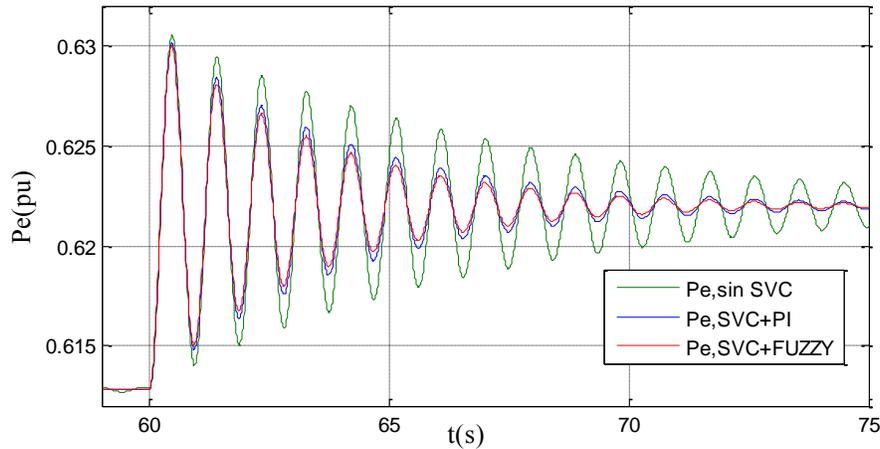


Figura 51: Respuesta de P_e en baja carga ante un aumento del 1.5% en la Potencia mecánica

En la figura 51 se observa que el sistema SMIB con SVC, bajo la acción del control difuso, logra la mejor amortiguación de las oscilaciones.

Condición de operación nominal: $P = 0.7$ y $Q = 0.3$:

Tabla 12. Valores propios del sistema SMIB con SVC en condición nominal

Valores propios sistema SMIB	Valores Propios sistema SMIB con SVC
$-10.244 + 29.816j$	-386.54
$-10.244 - 29.816j$	-141.08
$-0.1194 + 6.8108j$	$-10.16 + 29.88j$
$-0.1194 - 6.8108j$	$-10.16 - 29.88j$
	-0.33

En condición de operación nominal el sistema SMIB con y sin SVC, presenta oscilaciones amortiguadas.

Respuesta de V_t en el tiempo, ante un aumento del 10% en la tensión de referencia:

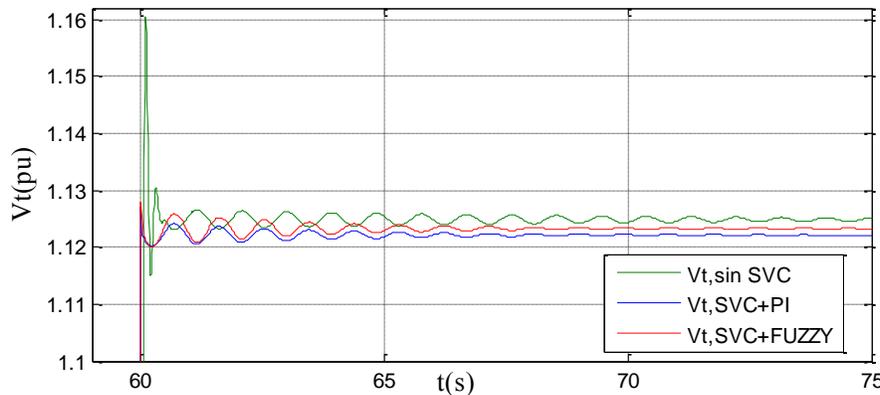


Figura 52: Respuesta de V_t en carga nominal ante un aumento del 10% en la tensión de referencia

Tabla 13. Parámetros de respuesta del sistema SMIB con SVC y control difuso, en operación nominal

	SMIB	SMIB+SVC+POD	SMIB+SVC+FUZZY
ts(s)	0,4	0,35	0.40
Mp(%)	3,12	0.436	0.418

En la figura 52 se muestra que el sistema, en condición de carga nominal, presenta un máximo sobreimpulso menor en presencia del SVC.

Respuesta de P_e en condición de carga nominal, ante un aumento del 1.5% en la Potencia mecánica de entrada:

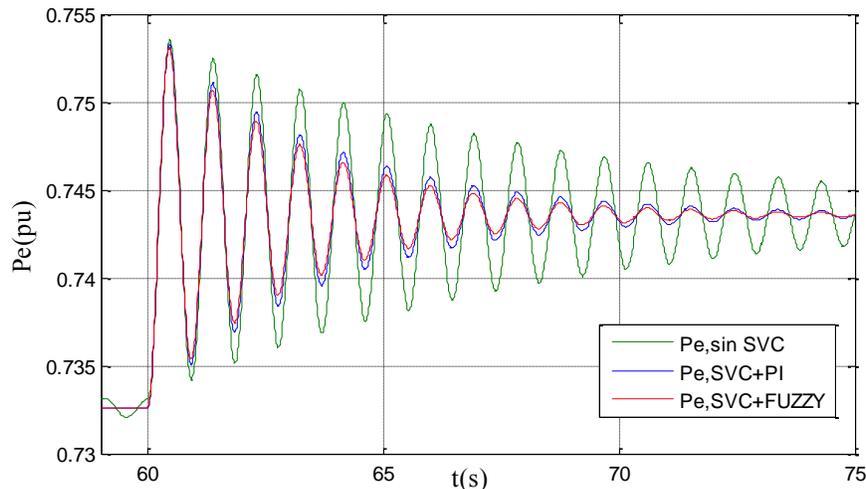


Figura 53: Respuesta de P_e en carga nominal ante un aumento del 1.5% en la Potencia mecánica

En la figura 53 se observa que las respuestas del sistema con SVC, bajo las acciones de control, son muy similares; además ambas presentan un mayor amortiguamiento de las oscilaciones que el sistema sin presencia del SVC.

Condición de Sobrecarga: $P = 1.2$ y $Q = 0.4$:

Tabla 14. Valores propios del sistema SMIB con SVC en condición de sobrecarga

Valores propios sistema SMIB	Valores Propios sistema SMIB con SVC
$-10.371 + 28.809j$	-393.3
$-10.371 - 28.809j$	-141.14
$0.0078 + 6.9426j$	$-10.12 + 29.00j$
$0.0078 - 6.9426j$	$-10.12 - 29.00j$
	-0.34

Como puede observarse, en condición de sobrecarga, los valores propios del sistema SMIB tienen parte real positiva, lo que implica que el sistema es inestable. Mientras que con SVC los valores propios siguen teniendo parte real negativa, y por ende, el sistema sigue siendo estable.

Respuesta de V_t en condición de sobrecarga ante un aumento del 10% en la tensión de referencia:

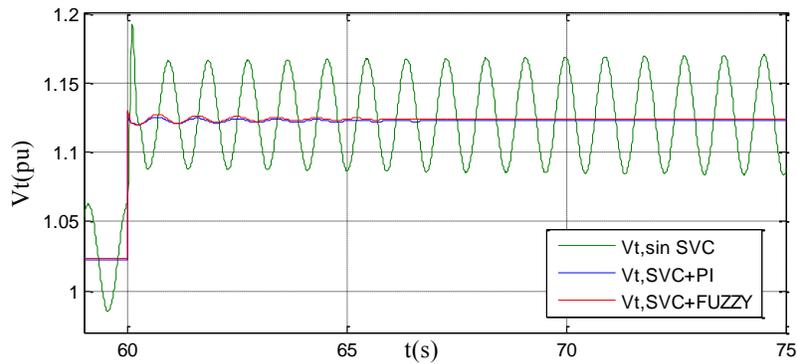


Figura 54: Respuesta de V_t en sobrecarga ante un aumento del 10% en la tensión de referencia

Tabla 15. Parámetros de respuesta del sistema SMIB con SVC y control difuso, en sobrecarga

	SMIB	SMIB+SVC+POD	SMIB+SVC+FUZZY
ts(s)	-	0,35	0.4
Mp(%)	-	0.57	0.55

Como se esperaba, a partir de lo visto en los valores propios, el sistema SMIB presenta oscilaciones crecientes, indicando la inestabilidad anteriormente mencionada. En la figura 54 se observa que el sistema con SVC incluido sigue manteniendo una respuesta estable.

Respuesta de P_e en condición de sobrecarga, ante un aumento del 1.5% en la Potencia mecánica de entrada:

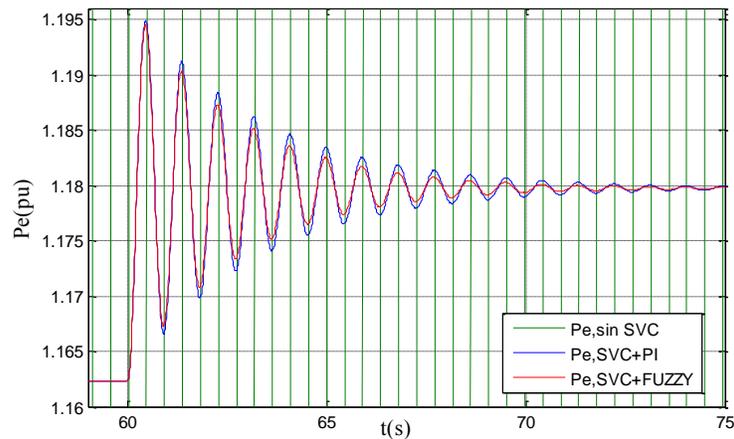


Figura 55: Respuesta de P_e en sobrecarga ante un aumento del 1.5% en la Potencia mecánica de entrada

En la figura 55 se muestra la buena amortiguación de las oscilaciones con la presencia del SVC en el sistema.

Capítulo 6

AJUSTE DEL CONTROL DE OSCILACIONES DE TIPO DIFUSO DEL STATCOM Y DEL SVC, CON AG

Los métodos exactos permiten calcular de manera eficiente la respuesta del sistema controlado, sin embargo cuando las características del sistema no permiten encontrar las constantes del controlador de forma exacta como es el caso de sistemas no lineales o con alto grado de perturbación externa, se utilizan estrategias diferentes como la Lógica Difusa, los Algoritmos Genéticos o Redes Neuronales [40].

Los algoritmos genéticos son poderosos métodos de optimización que se pueden usar dentro de sistemas de control en conjunción con otras técnicas (por ejemplo, PID, FLC) ya sea para encontrar los mejores parámetros del controlador o la mejor topología de la red [27,39].

Por lo anterior, para los sistemas propuestos (SMIB+ SVC y SMIB+STATCOM) se realiza una sintonización o búsqueda de las ganancias del controlador de oscilaciones de tipo difuso PI, por medio de algoritmos genéticos.

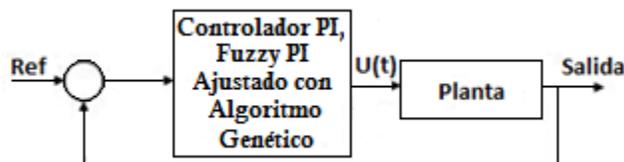


Figura 56: Esquema del control basado en algoritmos genéticos

6.1. Algoritmos genéticos (AG)

Los primeros hechos relacionados con los Algoritmos Genéticos (AG) surgieron en 1932 cuando Cannon interpreta la evolución natural como un proceso de aprendizaje muy similar al proceso mediante el cual una persona aprende por ensayo y error. También, en 1950 Turing reconoce una conexión entre la evolución y el aprendizaje de una máquina [33,44].

El término Algoritmo Genético se usa por el hecho de que estos simulan el proceso de la evolución Darwiniana a través del uso de operadores genéticos que operan sobre una población, de individuos o cromosomas, que “evoluciona” de una generación a otra [40].

Los algoritmos genéticos constituyen un método de búsqueda global estocástica que imita el proceso de evolución biológica, en el cual los individuos más adaptados tienen mayores probabilidades de sobrevivir y de transferir su material genético a las siguientes generaciones. La idea fundamental de los algoritmos genéticos consiste en encontrar una solución aceptable a un problema por medio del mejoramiento de un conjunto de individuos, cuya función de evaluación corresponde a una solución del problema. Esta optimización se realiza mediante procesos selectivos y de intercambio de información genética. Dichos procesos están dados por operadores genéticos, que definen la estructura de un algoritmo genético [39].

Los algoritmos genéticos son sustancialmente diferentes a las técnicas de optimización tradicionales. Las cinco diferencias principales son [45]:

1. Los algoritmos genéticos buscan en una población de puntos.
2. Los algoritmos genéticos no requieren información derivada u otro conocimiento auxiliar; sólo dependen de la función objetivo y de los niveles de aptitud correspondientes que influyen en la dirección de búsqueda.
3. Los algoritmos genéticos utilizan reglas de transición de probabilidad, no reglas deterministas.
4. Los algoritmos genéticos trabajan en una codificación de un conjunto de parámetros no en el parámetro fijado (excepto cuando se utilizan los individuos con valores reales).
5. Los algoritmos genéticos pueden proporcionar un número de soluciones potenciales a un dado problema y la elección de la final se deja en manos del usuario.

6.2. Estructura del algoritmo genético

El algoritmo genético implementado a grandes rasgos, consiste en una rutina de software que toma como entradas a los ejemplares y retorna como salidas los que deben generar descendencia para la nueva generación. A este proceso se llama ciclo de evolución, que comienza con una población de posibles soluciones, de la cual se seleccionan los mejores padres, que pueden dar nuevos individuos mediante el cruce o la mutación y de esta forma se crea una nueva población de la que nuevamente se van a obtener padres [41,43].

Componentes del algoritmo genético [8, 27, 40]

Población inicial: Se compone de un número de cromosomas cuyos genes (real, entero, binario ó híbrido) corresponden a valores de las ganancias del controlador en cuestión. El conjunto de cromosomas determina el espacio de búsqueda que el AG utiliza para encontrar la solución más óptima.

Evaluación: Durante la evaluación, se decodifica el gen, convirtiéndose en una serie de parámetros de un problema, se halla la solución del problema a partir de esos parámetros, y se le da una puntuación a esa solución en función de lo cerca que esté de la mejor solución.

Operador Selección: Su función principal es evaluar el desempeño de cada uno de los cromosomas de la población inicial, y de acuerdo al resultado asigna probabilidades de supervivencia, que darán origen a las futuras generaciones. Por lo general, la selección depende del valor de la función de evaluación de cada individuo.

El mecanismo de selección permite orientar la búsqueda a aquellos puntos más promisorios con la mayor adaptación observada hasta el momento. La selección no produce puntos nuevos en el espacio de búsqueda, sino que determina qué individuos dejarán descendencia y en qué cantidad en la próxima generación.

Un algoritmo genético puede utilizar muchas técnicas diferentes para seleccionar a los individuos que deben copiarse hacia la siguiente generación.

Operador Reproducción: Durante la fase de reproducción el valor de la aptitud, de cada cromosoma, se evalúa. Este valor se utiliza en el proceso de selección para proveer sesgo hacia los individuos más aptos. Al igual que en la evolución natural, un cromosoma apto tiene una mayor probabilidad de ser seleccionado para la reproducción.

Operador Cruce: Es el operador genético principal. Su función consiste en mezclar la información genética de dos individuos, a fin de generar nuevos individuos.

La probabilidad de cruce indica la frecuencia con que se realiza el cruce. Una probabilidad de 0 % significa que la “descendencia” será réplica exacta de sus “padres” y una probabilidad del 100% significa que cada generación se compone totalmente de nueva descendencia.

Operador Mutación: Es el operador secundario dentro del AG. Su función consiste en alterar las características genéticas de un individuo, con el objeto de aumentar la probabilidad de exploración del espacio de búsqueda y disminuir el riesgo de estancamiento del algoritmo en óptimos locales.

La probabilidad de mutación representa la probabilidad de que una determinada cadena sea seleccionada para la mutación. Al igual que el cruce, la mutación se maneja como un porcentaje que indica con qué frecuencia se efectuará, aunque se distingue de la primera por ocurrir mucho más esporádicamente (el porcentaje de mutación normalmente nunca supera el 5%).

Función objetivo: La función objetivo proporciona una medida de desempeño del sistema asociado a cierto individuo en la población. Es la responsable de evaluar a los individuos y asignarle valores altos de aptitud; ya que es una función completamente dependiente del problema, puede determinar qué tan buenos o malos serán los resultados y la convergencia o no del método.

El paso más importante en la aplicación de GA es elegir la función objetivo que se utiliza para evaluar la capacidad de cada cromosoma. En algunos casos se utilizan índices de rendimiento como función objetivo. Por ejemplo: el error cuadrático medio (MSE), integral del tiempo multiplicado por error absoluto (ITAE), integral de la magnitud del error absoluto (IAE), integral del error al cuadrado (ISE), e integral del tiempo multiplicado por el error al cuadrado (ITSE) [39,40].

$$MSE = \frac{1}{t} \int_0^{\tau} (e(t))^2 dt \quad (6.1)$$

$$ITAE = \int_0^{\tau} t|e(t)|dt \quad (6.2)$$

$$IAE = \int_0^{\tau} |e(t)| dt \quad (6.3)$$

$$ISE = \int_0^{\tau} (e(t))^2 dt \quad (6.4)$$

$$ITSE = \int_0^{\tau} t(e(t))^2 dt \quad (6.5)$$

Terminación de un algoritmo genético.

Hay muchos criterios que se pueden tener en cuenta para la terminación de un algoritmos genético, entre los cuales está el alcance óptimo del algoritmo, es decir, que la solución sea satisfactoria; otro puede ser que el costo computacional sobrepase al estimado por el diseñador, o cuando itere demasiadas veces sin ninguna mejoría en los resultados, o cuando el número de individuos o generaciones ya haya sido evaluado sin respuesta óptima.

El criterio de convergencia de un algoritmo genético es una condición especificada por el usuario, por ejemplo el número máximo de generaciones o cuando el valor de la aptitud supera un umbral.

Codificación de las variables.

Los algoritmos genéticos requieren que el conjunto se codifique en un *cromosoma*. Cada cromosoma tiene varios genes, que corresponden a parámetros del problema. Para poder trabajar con estos genes, es necesario codificarlos en una *cadena*, es decir, una fila de símbolos (números o letras) que generalmente va a estar compuesta de 0s y 1s aunque hay otras codificaciones posibles usando alfabetos de diferente cardinalidad [8,39].

Los pasos a seguir en la creación e implementación de un algoritmo genético se muestran en el siguiente diagrama de flujo [40]:

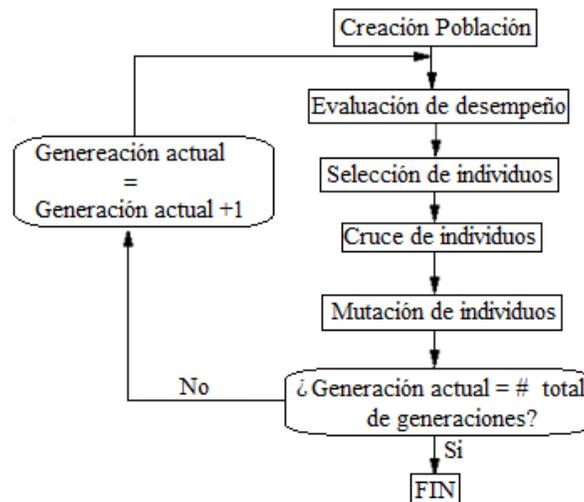


Figura 57: Diagrama de flujo del algoritmo genético simple

- Probabilidad de mutación: 0.08.
- Se toma como criterio de parada simplemente el número máximo de iteraciones.

Con el algoritmo genético implementado, se han obtenido las siguientes ganancias ajustadas para el controlador de oscilaciones de tipo difuso del STATCOM:

Tabla 16. Ganancias del control difuso del STATCOM ajustado con AG

Ensayo	G_{pc}	G_{intc}	G_{uc}	ITSE
Regulador de tensión AC				
1	5.9149	3.7237	2.0618	0.0001043
2	9.7293	2.0374	2.5685	0.0000481
3	6.9948	1.1983	2.4411	0.0000730
4	6.2584	2.4545	2.9732	0.0000677
5	8.2191	2.6221	2.5602	0.0000581
6	9.4553	3.0554	2.0608	0.0000621
7	6.4390	2.1372	2.0044	0.0000976

Ensayo	G_{pp}	G_{intp}	G_{up}	ITSE
Regulador de tensión DC				
1	2.2702	0.4708	1.8515	0.000131
2	4.2166	0.2399	1.8782	0.000135
3	1.5502	0.0306	0.5313	0.000139
4	3.8190	0.6139	0.4657	0.000130
5	2.7946	0.6295	0.4359	0.000135
6	3.7620	0.2679	0.9711	0.000133
7	3.2641	0.5038	0.3094	0.000146

A partir de las estas ganancias se eligen los valores que proporcionan la respuesta deseada para el comportamiento del sistema.

Control Difuso PI del regulador de tensión AC del STATCOM	Control Difuso PI con AG del regulador de tensión AC del STATCOM
$G_{pc} = 3$	$G_{pc} = 9.7293$
$G_{intc} = 0.01$	$G_{intc} = 2.0374$
$G_{uc} = 2$	$G_{uc} = 2.5685$
Control Difuso PI del regulador de tensión DC del STATCOM	Control Difuso PI con AG del regulador de tensión DC del STATCOM
$G_{pp} = 1.74$	$G_{pp} = 2.2702$
$G_{intp} = 0.061$	$G_{intp} = 0.4708$
$G_{up} = 3$	$G_{up} = 1.8515$

6.4. Resultados de la implementación del controlador difuso del STATCOM, ajustado con AG

A continuación se muestran los resultados obtenidos, a partir de la implementación del sistema SIMIB con STATCOM incluido, bajo la acción del controlador de oscilaciones de tipo difuso ajustado con AG.

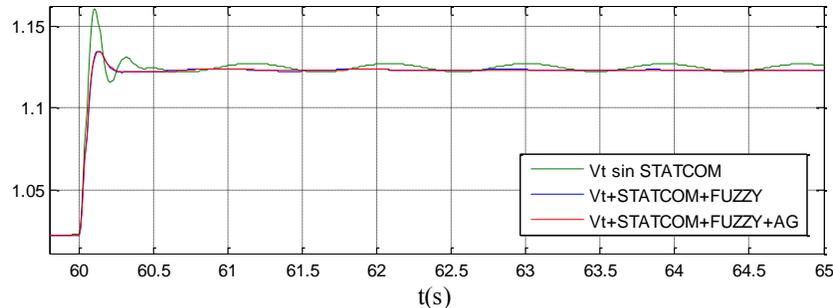


Figura 59: Respuestas de V_t sin STATCOM, con STATCOM+FUZZY y FUZZY +AG, en operación nominal ante un aumento del 10% en la tensión de referencia

La respuesta de V_t en el tiempo, ante un aumento del 10% en la tensión de referencia y en condición de operación nominal ($P = 0.7$ y $Q = 0.3$), presenta una disminución del máximo sobreimpulso y una mayor amortiguación de las oscilaciones bajo la acción del control difuso.

Tabla 17. Parámetros de respuesta V_t del sistema SMIB con STATCOM y AG, en condición nominal

	SMIB	SMIB+STATCOM+FUZZY	SMIB+STATCOM+FUZZY+AG
ts(s)	0,4	0,21	0.23
Mp(%)	3,12	1.02	1.06

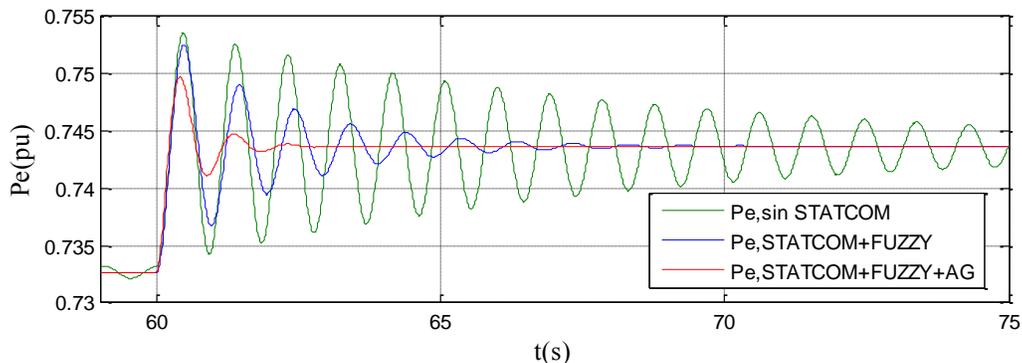


Figura 60: Respuestas de P_e sin STATCOM, con STATCOM+FUZZY y FUZZY +AG, en carga nominal ante un aumento del 1.5% en la Potencia mecánica

La respuesta de P_e en el tiempo, ante un aumento del 1.5% en la potencia mecánica y en la condición de operación nominal, presenta una mayor amortiguación de las oscilaciones bajo la acción del control difuso ajustado con AG.

Las respuestas de V_t y de P_e con control difuso, ajuste con AG y en condición de sobrecarga ($P = 1.2$ y $Q = 0.4$), se muestran en las figuras 61 y 62.

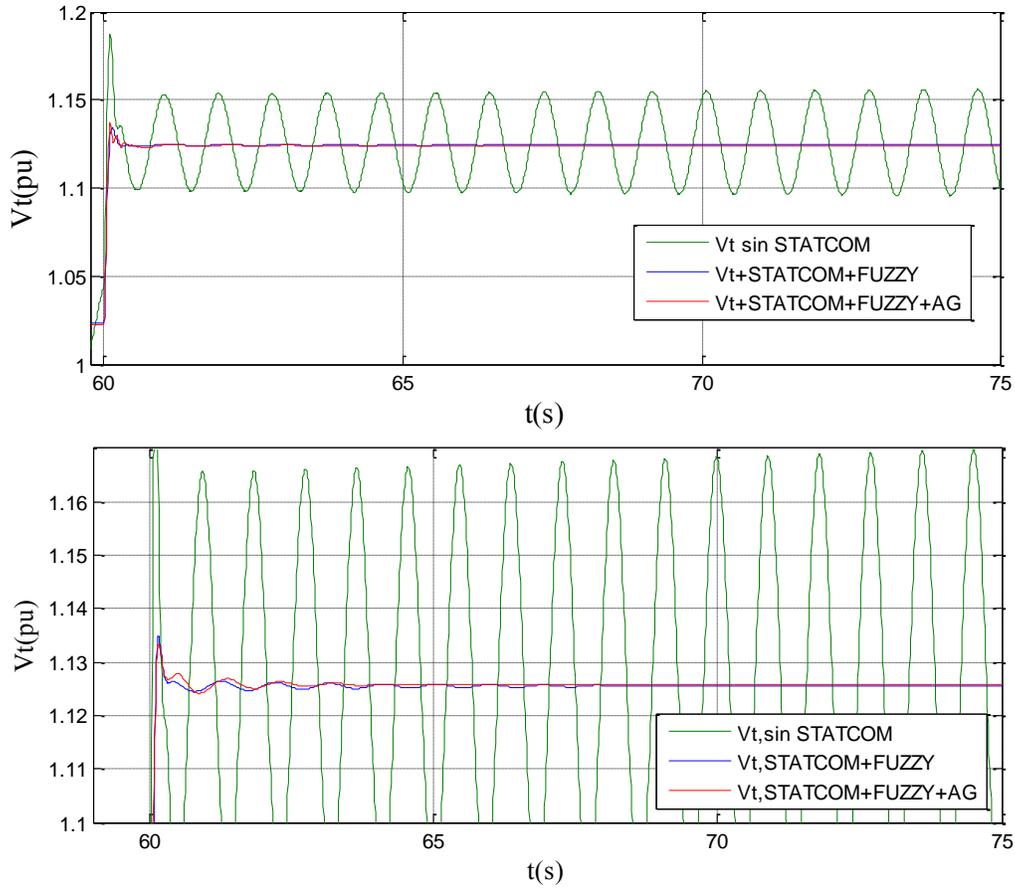


Figura 61: Respuestas de V_t sin STATCOM, con STATCOM+FUZZY y FUZZY +AG, en sobrecarga ante un aumento del 10% en la tensión de referencia

Tabla 18. Parámetros de respuesta V_t del sistema SMIB con STATCOM y AG, en sobrecarga

	SMIB	SMIB+STATCOM+FUZZY	SMIB+STATCOM+FUZZY+AG
ts(s)	-	0.25	0.30
Mp(%)	-	0.835	0.692

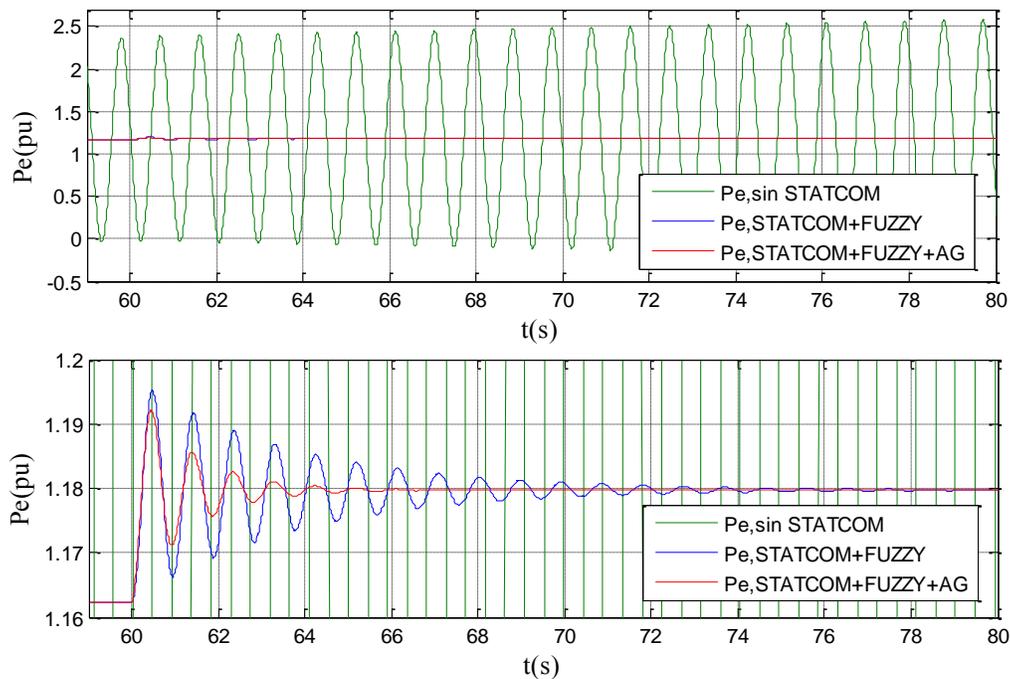


Figura 62: Respuestas de P_e sin STATCOM, con STATCOM+FUZZY y FUZZY +AG, en sobrecarga ante un aumento del 1.5% en la Potencia mecánica

En condición de sobrecarga, al igual que el comportamiento visto en condición de operación nominal, el controlador de tipo difuso ajustado con algoritmo genético presenta una mayor amortiguación de las oscilaciones.

6.5. Ajuste del controlador de oscilaciones de tipo difuso del SVC con AG

Dado que los valores calculados para el control difuso PI se obtuvieron después de una etapa de sintonización sencilla (heurística), entonces no se tiene seguridad que estos valores correspondan a valores óptimos. Por lo tanto, para tener una mayor certeza de obtener mejores resultados, se aplica una técnica de sintonización con algoritmos genéticos.

Con el algoritmo genético (AG) se ajustan las ganancias del controlador de oscilaciones (POD) de tipo difuso del SVC.

Al igual que en el STATCOM, se emplea la función objetivo ITSE definida como:

$$ITSE = \int_0^{\tau} t(e(t))^2 dt$$

En la figura 63 se muestra la implementación de la función ITSE en el modelo SMIB con SVC y con controlador de oscilaciones de tipo difuso.

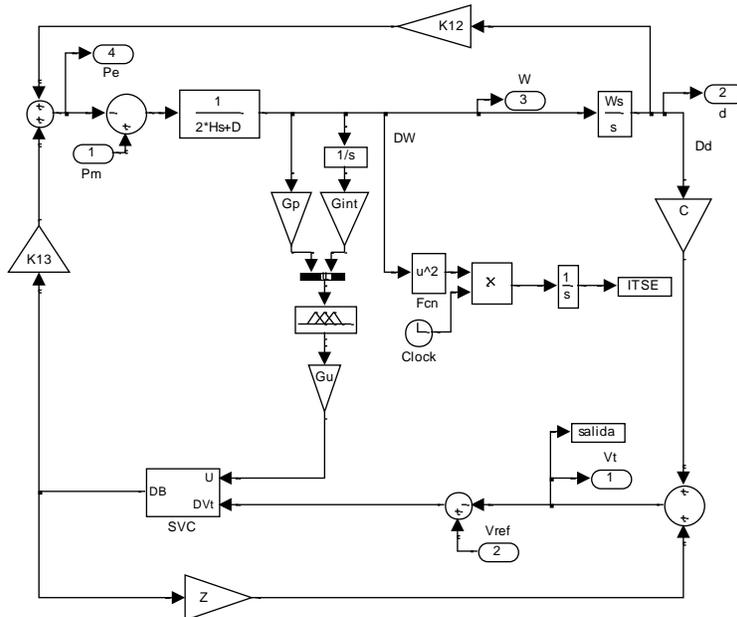


Figura 63: Modelo del control difuso PI del SVC con la función ITSE

El algoritmo genético implementado para el SVC tiene las siguientes características:

- Número de individuos por población: 20.
- Número de generaciones: 3.
- Probabilidad de cruce: 0.9.
- Probabilidad de mutación: 0.005.

Con el algoritmo genético implementado, se han obtenido las siguientes ganancias ajustadas para el controlador de oscilaciones de tipo difuso del SVC:

Tabla 19. Ganancias del control difuso del SVC ajustado con AG

Ensayo	G_p	G_{int}	G_u	ITSE
1	0.2408	0.8796	2.4739	0.0003069
2	0.2002	0.4074	2.3315	0.0003505
3	0.1817	0.2830	1.9775	0.0003950
4	0.1722	0.2642	1.9859	0.0004036
5	0.2048	0.0271	2.1643	0.0003559
6	0.1851	0.0388	2.9275	0.0003258
7	0.1832	0.5441	2.3760	0.0003633

Se eligen las ganancias que proporcionan la respuesta deseada para el comportamiento del sistema.

Control Difuso PI del SVC

$$G_p = 0.0814$$

$$G_{int} = 0.9493$$

$$G_u = 6$$

Control Difuso PI con AG del SVC

$$G_p = 0.2408$$

$$G_{int} = 0.8796$$

$$G_u = 2.4739$$

6.6. Resultados de la implementación del controlador difuso del SVC, ajustado con AG

En esta sección se muestran los resultados obtenidos con el controlador de oscilaciones de tipo difuso, tras el ajuste realizado mediante el algoritmo genético (AG). Los resultados presentados se basan en las condiciones de operación nominal ($P = 0.7$ y $Q = 0.3$) y de sobrecarga ($P = 1.2$ y $Q = 0.4$).

Las respuestas de V_t en el tiempo, ante un aumento del 10% en la tensión de referencia, en operación nominal y con ajuste AG, se muestran en la figura 64.

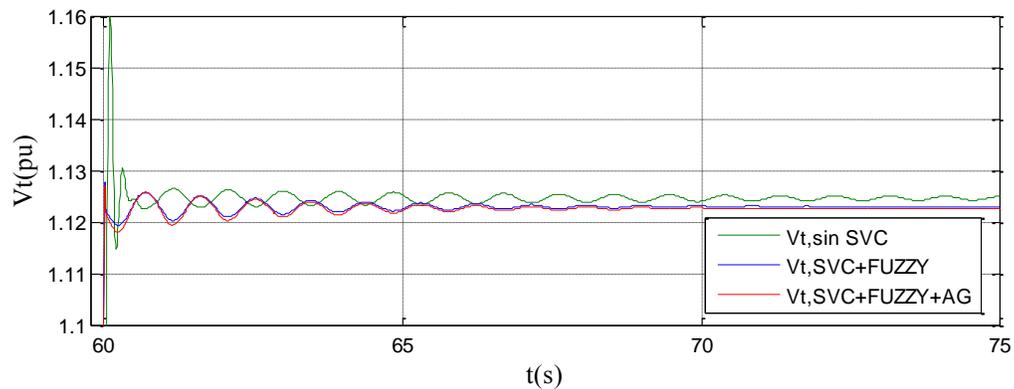


Figura 64: Respuestas de V_t sin SVC, con SVC+FUZZY y FUZZY +AG, en operación nominal ante un aumento del 10% en la tensión de referencia

Tabla 20. Parámetros de respuesta V_t del sistema SMIB con SVC y AG, en condición nominal

	SMIB	SMIB+SVC+FUZZY	SMIB+SVC+FUZZY+AG
ts(s)	0,4	0,40	0.35
Mp(%)	3,12	0.418	0.409

Respuesta de P_e en carga nominal, ante un aumento del 1.5% en la Potencia mecánica de entrada y bajo el ajuste del control difuso con AG:

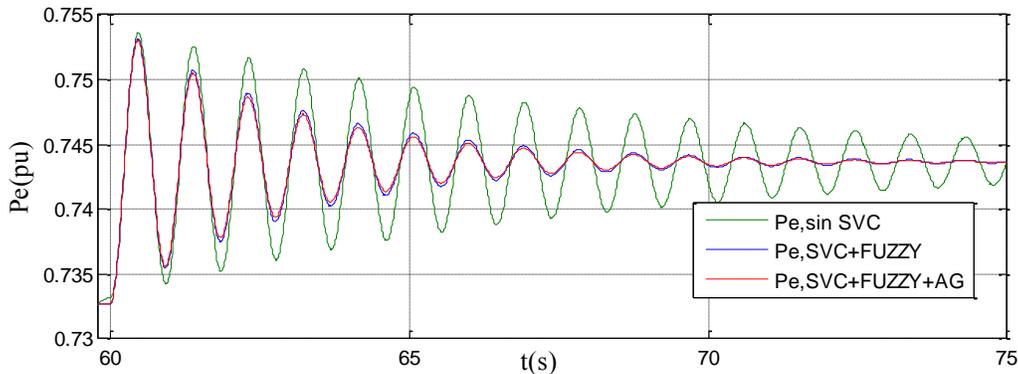


Figura 65: Respuestas de P_e sin SVC, con SVC+FUZZY y FUZZY +AG, en operación nominal ante un aumento del 1.5% en la Potencia mecánica

La respuesta del SVC con controlador de oscilaciones de tipo difuso ajustado heurísticamente y la del SVC con control difuso ajustado con algoritmos genéticos, presentan comportamientos muy similares, otorgando una disminución en las oscilaciones.

Las respuestas de V_t en el tiempo, ante un aumento del 10% en la tensión de referencia, en sobrecarga y bajo ajuste con AG del controlador difuso, se muestran en la figura 66:

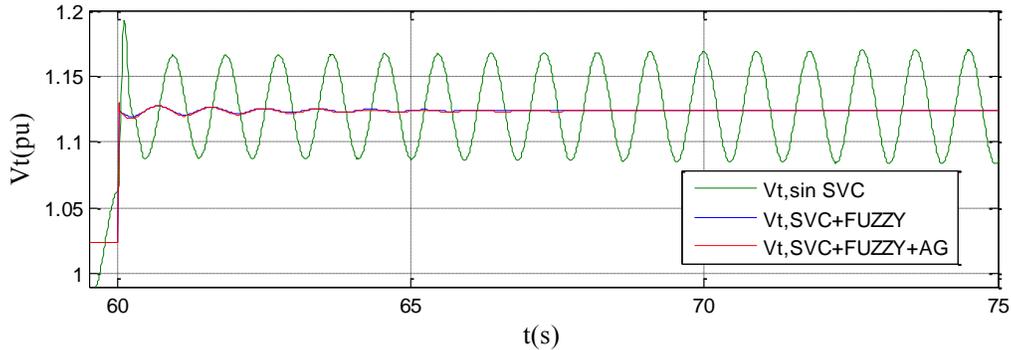


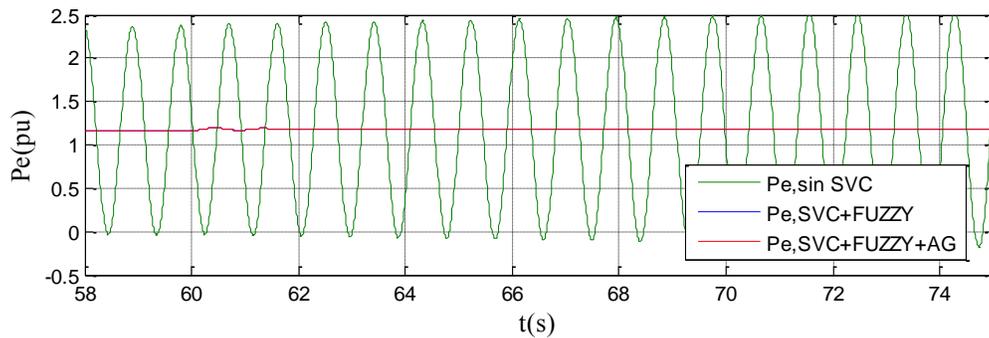
Figura 66: Respuestas de V_t sin SVC, con SVC+FUZZY y FUZZY +AG, en sobrecarga ante un aumento del 10% en la tensión de referencia

Tabla 21. Parámetros de respuesta V_t del sistema SMIB con SVC y AG, en sobrecarga

	SMIB	SMIB+SVC+FUZZY	SMIB+SVC+FUZZY+AG
ts(s)	-	0,4	0.35
Mp(%)	-	0.55	0.54

La respuesta de V_t del SVC con control difuso ajustado con AG presenta el menor máximo sobreimpulso.

Respuesta de P_e en sobrecarga, ante un aumento del 1.5% en la Potencia mecánica de entrada y bajo el ajuste del control difuso con AG:



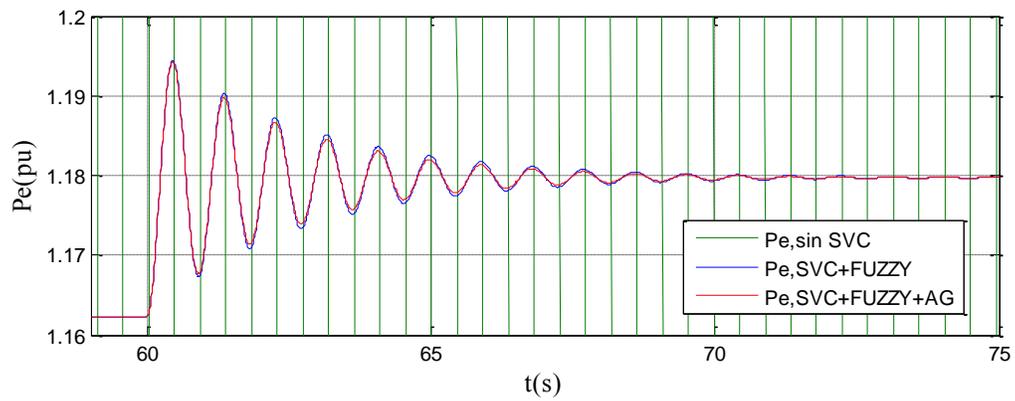


Figura 67: Respuestas de P_e sin SVC, con SVC+FUZZY y FUZZY +AG, en sobrecarga ante un aumento del 1.5% en la Potencia mecánica

El la figura 67 se observa que el SVC con control difuso ajustado con AG presenta la mayor amortiguación de las oscilaciones.

Capítulo 7

AJUSTE DEL CONTROLADOR DE OSCILACIONES DE TIPO DIFUSO DEL STATCOM Y DEL SVC, CON PSO

A través de los años se han implementado varios métodos de diseño y sintonización del controlador difuso, entre ellos el método de optimización por cúmulo de partículas (PSO), el cual fue originalmente desarrollado por James Kennedy y por Russ C. Eberhart [54].

Mediante el método PSO y usando el software de Matlab, para implementar las simulaciones, se sintonizarán las ganancias del controlador de oscilaciones de tipo difuso de los sistemas propuestos (SMIB+ SVC y SMIB+STATCOM), de manera que se mejore el amortiguamiento de oscilaciones.

7.1. Algoritmo de optimización por cúmulo de partículas (PSO)

El algoritmo de optimización por cúmulo de partículas (Particle Swarm Optimization-PSO) es una técnica metaheurística poblacional basada en la naturaleza (perteneciente a la familia de los algoritmos Bioinspirados) [55], y ha sido aplicada con éxito en diferentes campos de investigación. Algunos ejemplos son: optimización de funciones numéricas, entrenamiento de redes neuronales, aprendizaje de sistemas difusos, registrado de imágenes, problema del viajante de comercio e ingeniería química [54, 56].

PSO fue originalmente desarrollado por James Kennedy y por Russ C. Eberhart en 1995. Estos autores describen el algoritmo PSO de la siguiente manera [15]:

Los individuos (partículas) que conviven en una sociedad tienen una “opinión” que es parte del espacio de búsqueda, compartido por todos los individuos. Cada individuo puede modificar su opinión según tres factores:

- El conocimiento del entorno o *adaptación (su valor de fitness)*.
- Experiencias anteriores del individuo o *memoria del individuo*.
- Experiencias anteriores de los individuos del vecindario o *memoria del vecindario*.

El funcionamiento básico del PSO simula el comportamiento del vuelo de las bandadas de aves en busca de comida. La estrategia lógica a utilizar es seguir al ave que está más cerca del alimento. Cada ave se modela como una partícula con una solución en el espacio de búsqueda que está siempre en continuo movimiento y nunca se elimina o muere [54].

En otras palabras, las partículas son agentes simples que se mueven por el espacio de búsqueda, guardan y posiblemente comunican la mejor solución que han encontrado. El movimiento de las partículas por el espacio está guiado por las partículas que tienen la mejor solución del momento [56].

Cada partícula tiene una aptitud (fitness), una posición y un vector velocidad que dirige su movimiento. El movimiento de las partículas por el espacio está guiado por las partículas óptimas en el momento actual [54,56].

En la siguiente sección se realiza una descripción más detallada de los principales factores, parámetros, y aspectos de desarrollo del algoritmo PSO.

7.1.1. Descripción del Algoritmo PSO

En el algoritmo PSO se tiene una función objetivo que se encuentra en función de n variables. Al iniciar el algoritmo, a estas variables se les asignan valores aleatorios distribuyéndolas por todo el espacio solución, convirtiendo la función objetivo en un vector (nube), donde cada elemento de dicho vector se denominará partícula. Observando cuál de las respuestas se acerca más al cero o al valor deseado, al momento de evaluar todas las respuestas; se escoge la mejor y se reasignan los valores de los vectores para una nueva iteración alrededor de ésta. Esto se realiza hasta que llegue a un punto deseado. Consecuentemente, cada partícula se ve influida por el mejor desempeño de cualquier miembro de la población debido al intercambio de información entre ellos. El rendimiento de cada partícula se mide usando una función de aptitud que varía en función del problema de optimización [58].

La descripción del proceso algorítmico es la siguiente [56,58]:

1. La nube se inicializa generando las posiciones de las partículas de forma aleatoria, regular o combinación de ambas, para las ganancias del control difuso. Se define el número de partículas, límites máximos y mínimos de las posiciones y las velocidades.
2. Se generan las velocidades aleatoriamente en un intervalo establecido $[-v_{max}, v_{max}]$.
3. Se evalúa la función objetivo del conjunto inicial de partículas, y se actualizan la mejor posición de cada partícula y la mejor posición del enjambre. Es decir, se calcula la *aptitud* de cada partícula y se actualizan los valores de *aptitud_{x_i}* y *aptitud_{mejorpos_i}*.
4. Las partículas se desplazan empleando las velocidades iniciales, desde una posición del espacio de búsqueda hasta otra. Al vector de posición X_i se le añade el vector velocidad V_i para obtener un nuevo vector X_i .
5. Con la nueva posición de la partícula se calcula y actualiza *aptitud_{xi}* (función de objetivo).
6. Si el nuevo valor de *aptitud* es el mejor encontrado por la partícula i hasta el momento, se actualizan los valores de *mejorpos_i* y *aptitud_{mejorpos_i}*.
7. Si el nuevo valor de *aptitud_{mejorpos_i}* es el mejor encontrado por la nube de partículas hasta el momento, se actualiza el valor de la mejor posición de la nube (o del vecindario) *mejorpos* y *aptitud_{mejorpos}*.

8. Se modifica el vector velocidad de cada partícula utilizando la velocidad anterior, un componente cognitivo y un componente social. Además, se desplazan las partículas usando estas velocidades.

$$V_i^t = \Omega^{t-1}V_i^{t-1} + \varphi_1rand_1(mejorpos_i - X_i^{t-1}) + \varphi_2rand_2(mejorpos - X_i^{t-1}) \quad (7.1)$$

$$X_i^t = X_i^{t-1} + V_i^t \text{ Para } i = 1,2,3, \dots, P \quad (7.2)$$

9. Se verifica el criterio de parada. Si el criterio de parada se satisface, se detiene el proceso. En caso contrario, regresar al paso 5. En este caso, si el nuevo valor de *aptitud_mejorpos* que corresponde a la mejor solución encontrada por la nube de partículas (En este caso corresponde a la respuesta de la función ITSE) es menor que una tolerancia o ya se ha cumplido un número máximo de iteraciones, entonces PARAR.

Donde:

- X_i^t : vector posición de la partícula i en la iteración t . Almacena la posición actual de la partícula. En este caso cada vector está compuesto de 3 valores que corresponden a cada ganancia del controlador de oscilaciones de tipo difuso.
- V_i^t : vector velocidad de la partícula i en la iteración t . Almacena la dirección según la cual se moverá la partícula.
- Ω^t : factor de inercia en la iteración t .
- φ_1, φ_2 : pesos que controlan los componentes cognitivo y social.
- $rand_1$: número aleatorio entre 0 y 1.
- $rand_2$: número aleatorio entre 0 y 1.
- $mejorpos_i$: mejor posición encontrada por la partícula i hasta el momento que posee la mejor solución. Almacena la posición de la mejor solución encontrada por la partícula hasta el momento.
- $mejorpos$: representa la posición de la partícula con la mejor solución o aptitud de la nube de partículas.
- P : número de partículas que componen la nube.
- El valor de *aptitud_xi*, almacena el valor de adaptación o adecuación de la posición actual correspondiente al vector X_i ; es decir, almacena el valor de la función objetivo evaluada en la partícula X_i .
- El valor de *aptitud_mejorposi*, almacena el valor de adecuación de la partícula con mejor solución local encontrada hasta el momento, correspondiente al vector *mejorposi*.

A continuación se muestra el esquema de funcionamiento del algoritmo PSO [55].

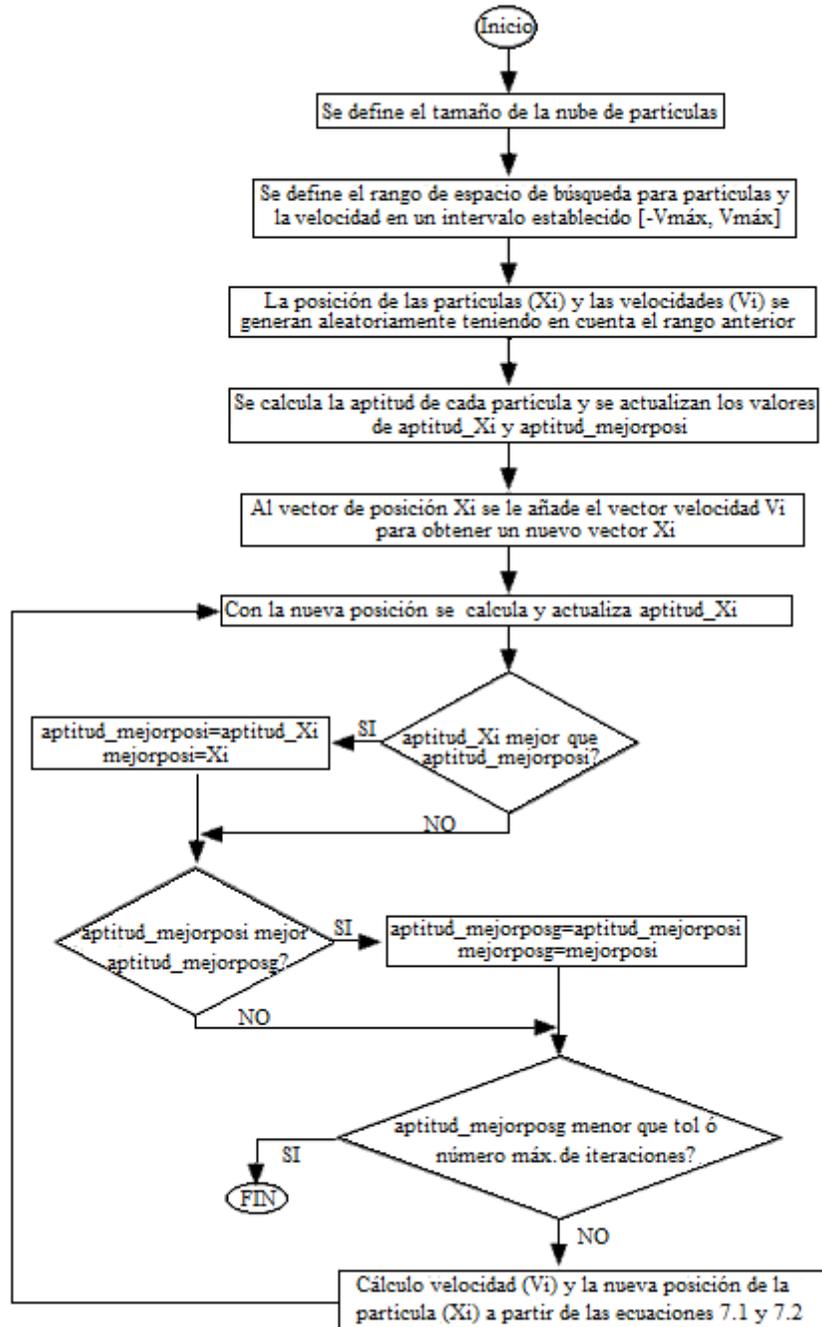


Figura 56. Diagrama de flujo del algoritmo PSO

7.2. Ajuste del controlador de oscilaciones de tipo difuso del STATCOM con PSO

El algoritmo PSO se usa para la sintonización de las ganancias del controlador de oscilaciones (POD) de tipo difuso del STATCOM. Para agilizar el ajuste de las ganancias del sistema a través del uso del PSO, se limita el espacio de búsqueda usando la información de respuesta del sistema bajo la acción del controlador de oscilaciones difuso ajustado heurísticamente.

A continuación, se desarrolla el acondicionamiento necesario para la aplicación del algoritmo PSO, como acción de ajuste de las ganancias del controlador de oscilaciones de tipo difuso diseñado para el STATCOM.

- **Número de partículas (P).** Se trabaja con un total de 27 partículas que conforman la nube o espacio de búsqueda de la respuesta. $P=27$.
- **Factor de inercia.** Los límites del factor de inercia se calculan a manera de ensayo y error. $\Omega = \text{Inermax}=0.8$ (inercia inicial), $\text{Inerfin}=0.006$ (inercia final).
- **Pesos que controlan los componentes cognitivo y social.** Se implementan los pesos recomendados en los diferentes textos. $\varphi_1 = \varphi_2 = 2$.
- **Vectores Xi y Vi: Xi.** Este vector contiene las ganancias del controlador difuso (G_{pc} , G_{intc} , G_{uc}). **Vi** es el incremento que se le hace a las ganancias bajo los límites $-V_{\max} < V_i < V_{\max}$ ($V_{\max} = [0.002; 0.0025; 0.005]$), con el fin de controlar la precisión de búsqueda.
- **Valores de aptitud: aptitud_xi.** Evalúan cada partícula en la función objetivo ITSE.

Las ganancias obtenidas con la simulación del algoritmo PSO, implementado en MATLAB, son las siguientes:

Tabla 22. Ganancias del control difuso del STATCOM ajustado con PSO

Ensayo	G_{pc}	G_{intc}	G_{uc}	ITSE
Regulador de tensión AC				
1	9.6850	0.9458	2.9262	0.0000431
2	9.6878	0.9439	2.9287	0.0000430
3	8.7611	5.8905	2.4015	0.0000581
4	4.7572	2.7073	1.5601	0.0001704
5	8.4875	1.4438	2.4082	0.0000600
6	8.8388	2.1030	2.2142	0.0000625
7	8.3314	4.7333	2.6308	0.0000559

Ensayo	G_{pp}	G_{intp}	G_{up}	ITSE
Regulador de tensión DC				
1	3.4099	0.6666	1.6023	0.0000437
2	6.6765	0.4790	3.6505	0.0007742
3	0.9063	0.4069	3.3679	0.0000438
4	0.7558	0.2943	4.8433	0.0000431
5	0.7515	0.4304	4.1828	0.0000432
6	1.3026	0.4445	1.5710	0.0000422

Las ganancias seleccionadas, son las que proporcionan el desempeño deseado para el sistema.

**Control Difuso PI del regulador de
tensión AC del STATCOM, con PSO**

$$G_{pc} = 9.6878$$

$$G_{intc} = 0.9439$$

$$G_{uc} = 2.9287$$

**Control Difuso PI del regulador de
tensión DC del STATCOM, con PSO**

$$G_{pp} = 0.7558$$

$$G_{intp} = 0.2943$$

$$G_{up} = 4.8433$$

7.3. Resultados de la implementación del controlador de oscilaciones de tipo difuso del STATCOM, ajustado con PSO

A continuación se muestran los resultados obtenidos, a partir de la implementación del sistema SIMIB con STATCOM incluido, bajo la acción del controlador de oscilaciones del tipo difuso ajustado con PSO.

En los siguientes resultados, el sistema opera en condición nominal ($P = 0.7$ y $Q = 0.3$).

La figura 68 muestra las respuestas de V_t en el tiempo, ante un aumento del 10% en la tensión de referencia.

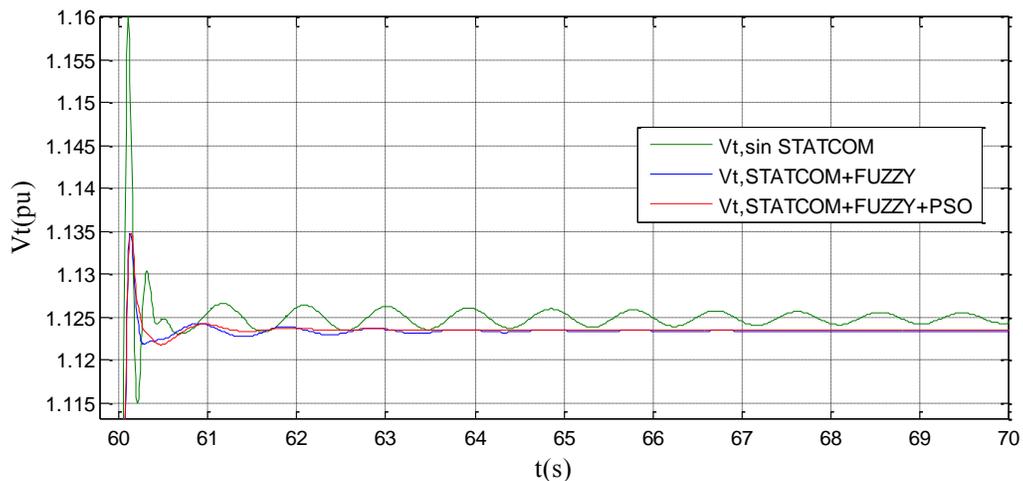


Figura 68: V_t sin STATCOM, V_t con STATCOM +FUZZY y FUZZY +PSO, en operación nominal y ante un aumento del 10% en la tensión de referencia

Tabla 23. Parámetros de respuesta V_t del sistema SMIB con STATCOM y PSO, en condición nominal

	SMIB	SMIB+STATCOM+FUZZY	SMIB+STATCOM+FUZZY+PSO
ts(s)	0,4	0,21	0.23
Mp(%)	3,12	1.02	0.98

En la siguiente figura, se muestra la respuesta de P_e en condición de operación nominal y ante un aumento del 1.5% en la Potencia mecánica de entrada.

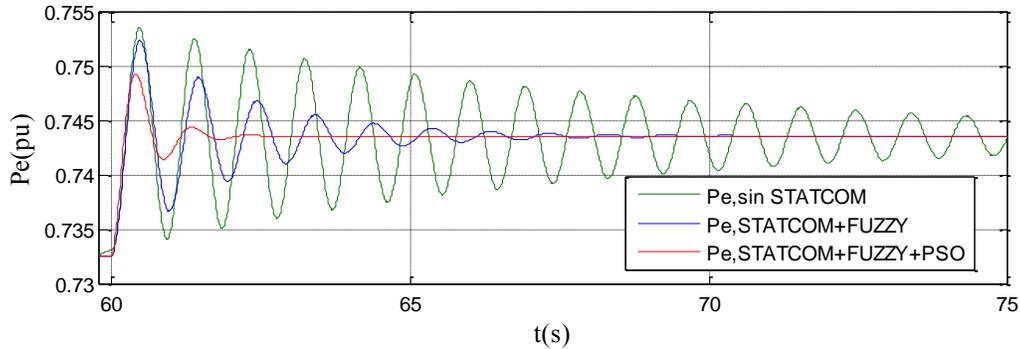


Figura 69: P_e sin STATCOM, P_e con STATCOM +FUZZY y FUZZY +PSO, en operación nominal y ante un aumento del 1.5% en la Potencia mecánica

A partir de los parámetros de respuesta y de las figuras 68 y 69 se observa que el sistema con STATCOM y controlador de oscilaciones del tipo difuso ajustado con PSO, presenta un mayor amortiguamiento de las oscilaciones que el sistema con control difuso sintonizado heurísticamente.

Los siguientes resultados, se obtienen con el sistema en condición de sobrecarga ($P = 1.2$ y $Q = 0.4$):

Respuestas de V_t en condición de sobrecarga ante un aumento del 10% en la tensión de referencia:

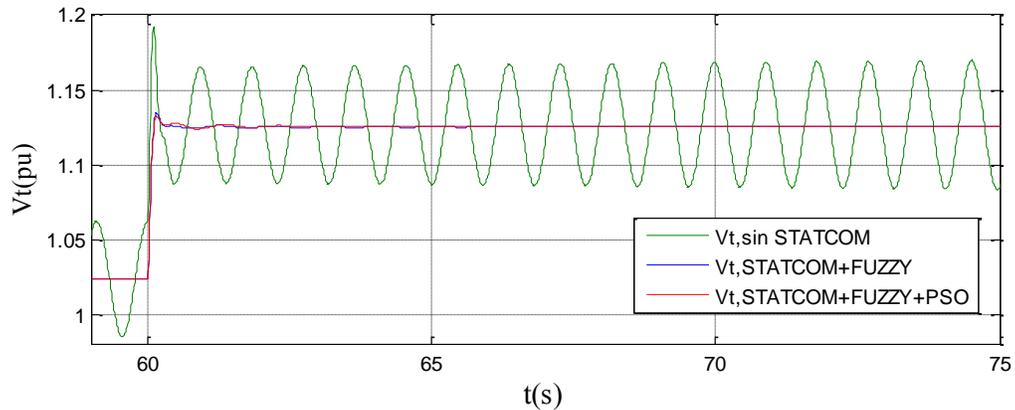


Figura 70: V_t sin STATCOM, V_t con STATCOM +FUZZY y FUZZY +PSO, en sobrecarga y ante un aumento del 10% en la tensión de referencia

Tabla 24. Parámetros de respuesta V_t del sistema SMIB con STATCOM y PSO, en sobrecarga

	SMIB	SMIB+STATCOM+FUZZY	SMIB+STATCOM+FUZZY+PSO
ts(s)	-	0.25	0.28
Mp(%)	-	0.835	0.675

Respuestas de P_e en condición de sobrecarga, ante un aumento del 1.5% en la Potencia mecánica de entrada:

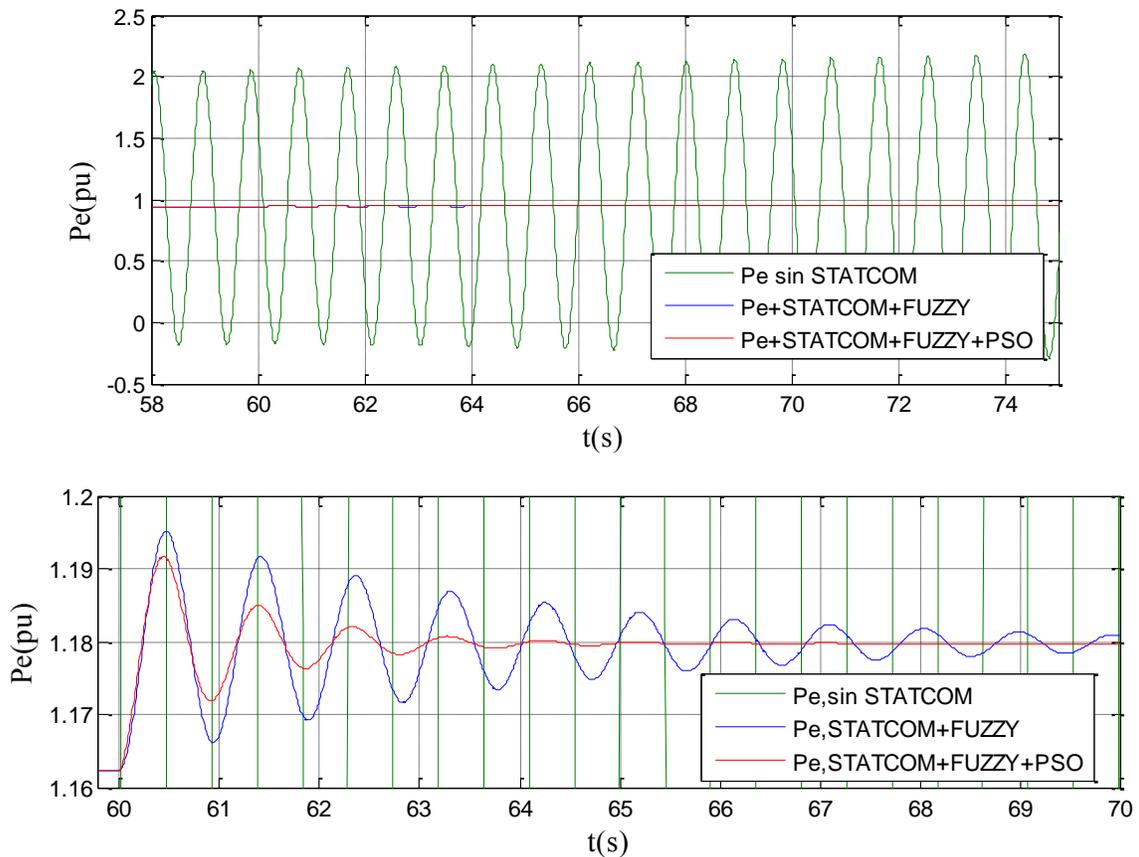


Figura 71: P_e sin STATCOM, P_e con STATCOM +FUZZY y FUZZY +PSO, en sobrecarga y ante un aumento del 1.5% en la Potencia mecánica

Como puede observarse, en condición de sobrecarga, el sistema con STATCOM y controlador de oscilaciones del tipo difuso ajustado con PSO sigue manteniendo una mayor amortiguación de las oscilaciones.

7.4. Ajuste del controlador de oscilaciones de tipo difuso del SVC con PSO

Las ganancias del controlador de oscilaciones (POD) de tipo difuso del SVC se sintonizan con el algoritmo PSO.

El acondicionamiento para la aplicación del algoritmo PSO como acción de ajuste de las ganancias del controlador de oscilaciones difuso del SVC, es el siguiente:

- **Número de partículas (P).** Se trabaja con una nube de 30 partículas. $P=30$.
- **Factor de inercia.** $\Omega = \text{Inermax}=0.7$ (inercia inicial), $\text{Inerfin}=0.001$ (inercia final).
- **Pesos que controlan los componentes cognitivo y social.** $\varphi_1 = \varphi_2 = 1.494$.
- **Vectores X_i y V_i : X_i .** Este vector contiene las ganancias del controlador difuso del SVC (G_p, G_{int}, G_u). V_i se encuentra bajo los límites $-V_{\text{max}} < V_i < V_{\text{max}}$, ($V_{\text{máx}} = [0.005; 0.025; 0.25]$).

Finalmente, las ganancias obtenidas con el algoritmo PSO implementado, para el controlador de oscilaciones del SVC son las siguientes:

Tabla 25. Ganancias del control difuso del SVC ajustado con PSO

Ensayo	G_p	G_{int}	G_u	ITSE
1	0.2860	0.8557	2.1803	0.0002977
2	0.1356	0.4440	2.7213	0.0003942
3	0.2312	1.5172	2.3379	0.0003240
4	0.2422	0.6470	2.6656	0.0002931
5	0.2713	0.4150	1.6007	0.0002909
6	0.2921	0.8095	2.5493	0.0002677
7	0.1691	0.3354	1.5169	0.0003026
8	0.1475	0.7955	2.0534	0.0004246

A partir de la tabla 25, se eligen las siguientes ganancias para el control difuso del SVC:

Control Difuso PI del SVC con PSO

$$G_p = 0.2921$$

$$G_{int} = 0.8095$$

$$G_u = 2.5493$$

7.5. Resultados de la implementación del controlador de oscilaciones de tipo difuso del SVC, ajustado con PSO

Los resultados de implementación del sistema SMIB con SVC incluido, bajo la acción del controlador de oscilaciones del tipo difuso ajustado con PSO, se muestran a continuación.

En primera instancia, se muestran las respuestas de V_t y P_e , ante un aumento del 10% en la tensión de referencia y del 1.5% en la Potencia mecánica de entrada respectivamente, en condición de operación nominal ($P = 0.7$ y $Q = 0.3$):

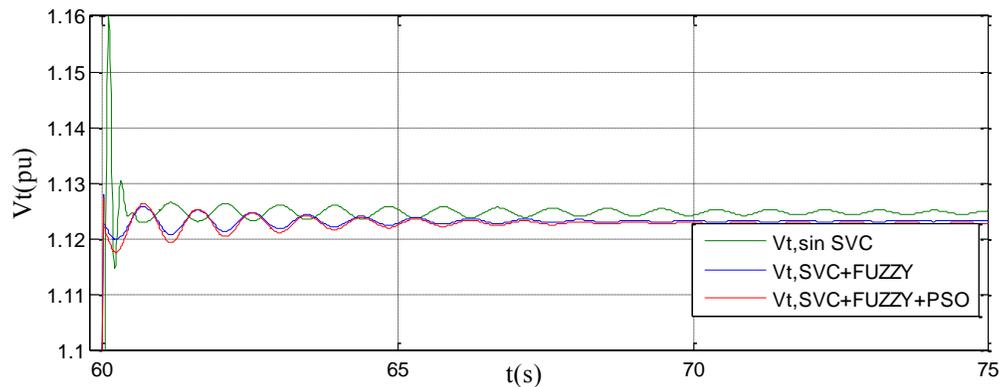


Figura 72: V_t sin SVC, V_t con SVC+FUZZY y FUZZY +PSO, en operación nominal y ante un aumento del 10% en la tensión de referencia

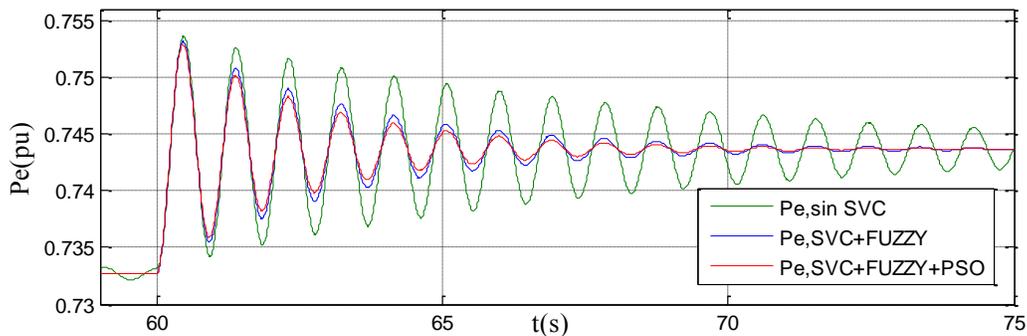


Figura 73: P_e sin SVC, P_e con SVC+FUZZY y FUZZY +PSO, en operación nominal y ante un aumento del 1.5% en la potencia mecánica

Tabla 26. Parámetros de respuesta V_t del sistema SMIB con SVC y PSO, en condición nominal

	SMIB	SMIB+SVC+FUZZY	SMIB+SVC+FUZZY+PSO
ts(s)	0.4	0,40	0.35
Mp(%)	3.12	0.418	0.409

Se observa que el sistema de control de oscilaciones de tipo difuso ajustado con PSO y el sistema de control ajustado heurísticamente, presentan un nivel de amortiguamiento muy similar.

Las siguientes respuestas son V_t y P_e , ante un aumento del 10% en la tensión de referencia y del 1.5% en la Potencia mecánica de entrada respectivamente, en condición de sobrecarga ($P = 1.2$ y $Q = 0.4$):

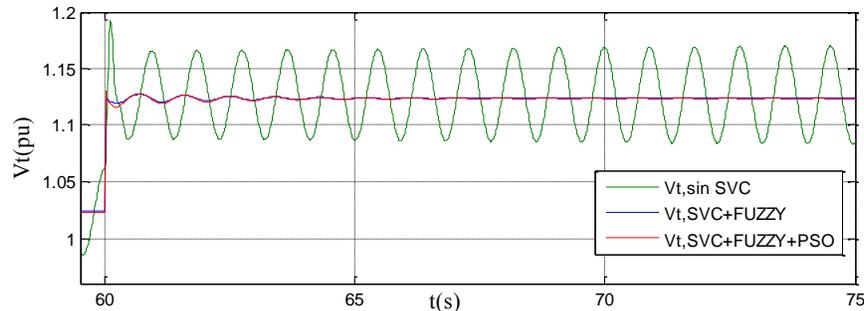


Figura 74: V_t sin SVC, V_t con SVC+FUZZY y FUZZY +PSO, en sobrecarga y ante un aumento del 10% en la tensión de referencia

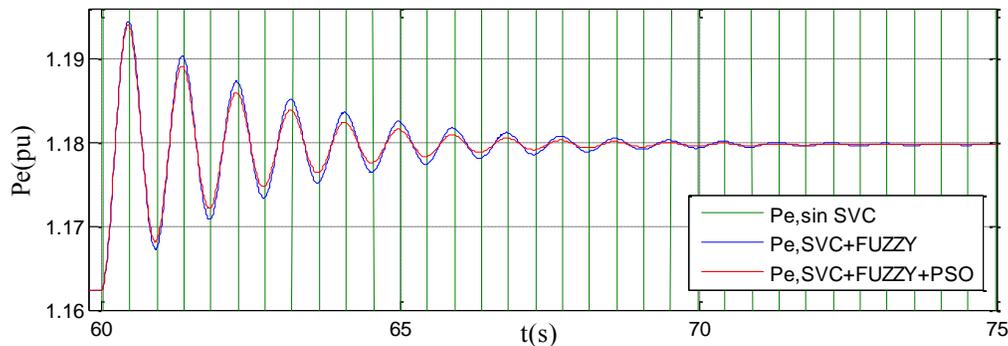
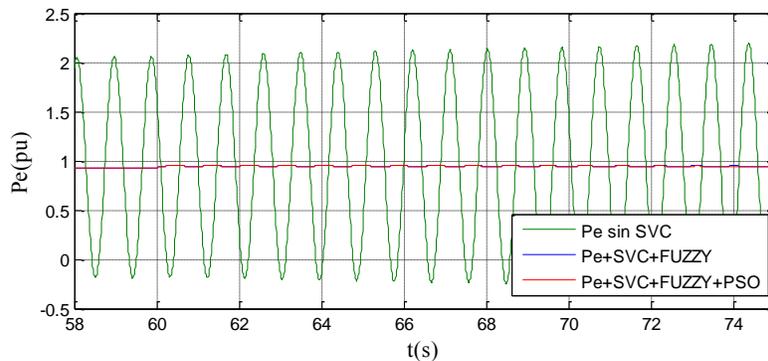


Figura 75: P_e sin SVC, P_e con SVC+FUZZY y FUZZY +PSO, en sobrecarga y ante un aumento del 1.5% en la potencia mecánica

Tabla 27. Parámetros de respuesta V_t del sistema SMIB con SVC y PSO, en sobrecarga

	SMIB	SMIB+SVC+FUZZY	SMIB+SVC+FUZZY+PSO
ts(s)	-	0.4	0.35
Mp(%)	-	0.55	0.54

Como puede observarse, en condición de sobrecarga, se sigue manteniendo un nivel de amortiguamiento similar entre el sistema de control de oscilaciones de tipo difuso ajustado con PSO y el sistema ajustado heurísticamente, mientras el sistema sin SVC presenta oscilaciones crecientes.

Capítulo 8

AJUSTE DEL CONTROLADOR DE OSCILACIONES DE TIPO DIFUSO DEL STATCOM Y DEL SVC, CON COA

En los últimos años, como una alternativa a los métodos matemáticos clásicos, modernas técnicas de optimización heurística como el recocido simulado, los algoritmos evolutivos, las redes neuronales artificiales, los PSO, y los sistemas difusos, han recibido mucha atención de parte de investigadores debido a su capacidad de encontrar una solución óptima global en sintonización de controladores.

Otro ejemplo de estas técnicas modernas de optimización heurística es la optimización basada en los sistemas caóticos. En este contexto, la literatura contiene varios algoritmos que utilizan secuencias caóticas para la resolución de problemas de optimización en aplicaciones de ingeniería [70]. La aplicación de secuencias caóticas es una alternativa atractiva que proporciona diversidad de búsqueda en un procedimiento de optimización caótica y en la sintonización de los parámetros de un controlador [65]. El algoritmo de optimización caótica (COA), que tiene las características de fácil aplicación, tiempo de ejecución corto y mecanismos sólidos para escapar del óptimo local, es una herramienta prometedora para aplicaciones de ingeniería [67].

El problema de la sintonización de las ganancias del controlador de oscilaciones de tipo difuso del STATCOM y del SVC se resolverá mediante un algoritmo de optimización caótica basado en el mapa Lozi.

8.1. Algoritmo de optimización caótica (COA)

8.1.1. Fundamentos de los sistemas caóticos.

El caos, es un comportamiento aparentemente desordenado que existe en los sistemas no lineales. Es decir, el caos es un comportamiento dinámico inestable acotado, que cuenta con tres importantes propiedades dinámicas [65]:

1. La dependencia sensible de las condiciones iniciales y la inclusión de movimientos periódicos inestables infinitos.

2. La propiedad semi-estocástica.
3. La ergodicidad.

La dependencia sensible de las condiciones iniciales se exhibe generalmente en sistemas que contienen múltiples elementos con interacciones no lineales, en especial cuando el sistema está forzado, y no sólo se observa en los sistemas complejos, se observa incluso en la ecuación logística más simple. Esta característica esencial de los pequeños cambios en los parámetros o en los valores iniciales de los sistemas caóticos, conduce a muy diferentes comportamientos futuros, tales como puntos fijos estables, oscilaciones periódicas, y bifurcaciones [66,68].

Los algoritmos de optimización basados en la teoría del caos (COA) son metodologías de búsqueda que difieren de cualquiera de las técnicas de optimización estocástica tradicionales existentes. No son como un algoritmo de optimización estocástica que escapa de los mínimos locales mediante la aceptación de algunas malas soluciones de acuerdo con una cierta probabilidad, COA busca con la regularidad del movimiento caótico escapar de los mínimos locales [61-63].

8.1.2. Estructura y descripción del algoritmo de optimización caótica

El proceso básico del algoritmo de optimización caótica incluye generalmente dos pasos principales:

1. Definir un generador de secuencias caótico o un mapa del espacio caótico en el espacio de soluciones. Se genera una secuencia de puntos caóticos y se asigna a una secuencia de puntos en el espacio de diseño original. Luego, se evalúa la función objetivo con respecto a los puntos de diseño generados, y se elige el punto con el mínimo valor de la función objetivo como el óptimo actual.
2. Suponer cercano el óptimo actual al óptimo global después de ciertas iteraciones, y asumirlo como el centro con un poco de perturbación caótica, y al óptimo global obtenerlo a través de la búsqueda fina.

Se repiten los dos pasos anteriores hasta que algún criterio de convergencia especificado se cumpla y luego se obtiene el óptimo global [61,69].

En la aplicación de secuencias caóticas se han adoptado, en lugar de los aleatorios, diferentes modelos entre los cuales se destacan: mapa Tent, mapa de Gauss, mapa Lozi, iterador sinusoidal, oscilador de Chua, sistema de Mackey-Glass, sistema de Lorenz, mapa Hénon, y mapa Ikeda [70]. El modelo basado en el mapa Lozi es una simplificación del mapa Hénon. Este mapa caótico implica funciones no diferenciables de difícil modelado en series de tiempo [61].

Para la sintonización de las ganancias del controlador de oscilaciones de tipo difuso del STATCOM y del SVC, se propone un COA con generador de secuencias caótico basado en mapa Lozi.

A continuación se muestra el procedimiento de búsqueda caótico basado en el Mapa Lozi [70]:

Paso 1: Inicializar las variables y las condiciones iniciales: $k = 1$, $y_1(0)$, $y(0)$, α , β , a y b . Establecer el valor inicial de la función objetivo.

Paso 2. Generar la secuencia caótica basada en el mapa Lozi [70]:

$$y_1(k) = 1 - a|y_1(k-1)| + y(k-1) \quad (8.1)$$

$$y(k) = by_1(k-1) \quad (8.2)$$

$$z(k) = \frac{y(k) - \alpha}{\beta - \alpha} \quad (8.3)$$

Los valores de y se normalizan en el intervalo $[0, 1]$ para cada variable de decisión en el espacio n -dimensional del problema de optimización. En este caso, el espacio está compuesto por $n=3$ variables de decisión que corresponden a cada ganancia del controlador de oscilaciones del tipo difuso.

Paso 3. Algoritmo de búsqueda caótica global:

```

Begin
While  $k \leq M_g$  do
   $x_i(k) = L_i + z_i(k)(U_i - L_i) \quad i = 1, \dots, n$ 
  if  $f(X(k)) < f^*$  Then
     $X^* = X(k)$ 
     $f^* = f(X(k))$ 
  end if
 $k = k + 1$ 
end while

```

Paso 4. Algoritmo de búsqueda caótica local [65]:

```

Begin
While  $k \leq M_g + M_L$  do
  for  $i = 1$  to  $n$ 
    if  $r \leq 0.5$  Then ( $r$  es una variable aleatoria distribuida uniformemente de  $[0,1]$ )
       $x_i(k) = x_i^* + \lambda z_i(k)|U_i - x_i^*|$ 
    else if
       $x_i(k) = x_i^* - \lambda z_i(k)|x_i^* - L_i|$ 
    end if
  end for
  if  $f(X(k)) < f^*$  Then
     $X^* = X(k)$ 
     $f^* = f(X(k))$ 
  end if
 $k = k + 1$ 
end while
end

```

Donde [61]:

- M_g : número máximo de iteraciones de búsqueda caótica global.
- M_L : número máximo de iteraciones de búsqueda caótica local.
- $M_L + M_G$: criterio de parada por iteraciones.
- λ : tamaño de paso en búsqueda caótica local.
- k : número de la iteración.
- X_i : vector solución con n variables x_i delimitadas por L_i y U_i .
- X^* : mejor solución de ejecución actual en la búsqueda caótica.
- f^* : mejor función objetivo.

El tamaño del paso λ , durante la búsqueda caótica local, es un parámetro importante en el comportamiento de convergencia del método de optimización, que ajusta pequeños rangos alrededor de X^* . Un λ pequeño tiende a realizar exploración para refinar los resultados de búsqueda local, mientras que un λ grande tiende a facilitar una exploración global en el espacio de búsqueda [61,65].

Un valor adecuado para el tamaño de paso proporciona el equilibrio entre las capacidades de exploración global y local, y en consecuencia una reducción en el número de iteraciones necesarias para buscar la solución óptima [70].

A continuación, en la figura 76, se muestra el esquema de funcionamiento del algoritmo de optimización caótica COA [69].

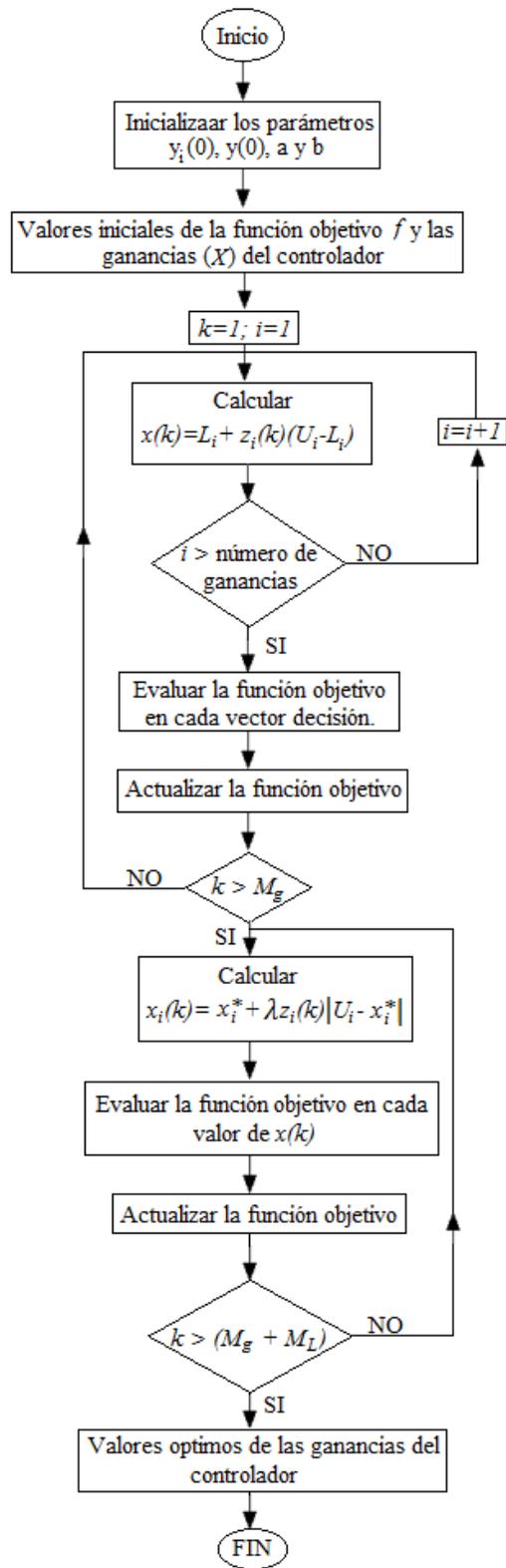


Figura 76: Diagrama de flujo del algoritmo COA.

8.2. Ajuste del controlador de oscilaciones de tipo difuso del STATCOM, con COA

El Algoritmo de optimización caótico (COA) se propone para la sintonización de las ganancias del controlador de oscilaciones de tipo difuso del STATCOM. Con este método, se ajustan las ganancias del controlador para mejorar el amortiguamiento de las oscilaciones del sistema, en diferentes condiciones de operación y perturbación.

Para el ajuste de las ganancias del controlador del STATCOM con COA, se usa la función objetivo basada en el criterio de rendimiento ITSE (Integral de error al cuadrado multiplicado por el tiempo).

Los parámetros utilizados en la implementación del algoritmo de optimización caótico basado en el mapa Lozi, para el control del STATCOM, son los siguientes:

- Parámetros del mapa Lozi: $y_1 \in [-0.6418, 0.6716]$, $[\alpha, \beta] = (-0.6418, 0.6716)$, $a = 1.7$ y $b = 0.5$.
- Número máximo de iteraciones de búsqueda caótica global: $M_g=30$.
- Número máximo de iteraciones de búsqueda caótica local: $M_L=20$.
- Tamaño de paso en búsqueda caótica local: $\lambda=0.05$.

El COA se ejecuta varias veces y luego se seleccionan las ganancias que proporcionan la respuesta deseada para el comportamiento del controlador. Los valores obtenidos se encuentran consignados en la Tabla 28.

Tabla 28. Ganancias del control difuso del STATCOM ajustado con COA

Ensayo	G_{pc}	G_{intc}	G_{uc}	ITSE
Regulador de tensión AC				
1	9.9434	5.9623	2.9843	0.0000422
2	9.8528	5.9019	2.9591	0.0000422
3	9.6320	5.7547	2.8978	0.0000423
4	9.5585	5.7056	2.8773	0.0000445
5	9.3039	5.5360	2.8066	0.0000488
6	8.4877	4.9918	2.5799	0.0000581
7	8.3995	4.9330	2.5554	0.0000605
8	8.2386	4.8257	2.5107	0.0000630
10	8.0112	4.6741	2.4476	0.0000663

Ensayo	G_{pp}	G_{intp}	G_{up}	ITSE
Regulador de tensión DC				
1	2.6088	0.2465	1.3044	0.00004108
2	2.2758	0.2126	1.1379	0.00004101
3	2.6690	0.2527	1.3345	0.00004115
4	2.4801	0.2334	1.2401	0.00004121
5	2.3395	0.2191	1.1698	0.00004109
6	2.5794	0.2241	1.2897	0.0000422

Los valores finalmente seleccionados para las ganancias del control difuso del STATCOM son los siguientes:

**Control Difuso PI del regulador de
tensión AC del STATCOM, con COA**

$$G_{pc} = 9.5585$$

$$G_{intc} = 5.7056$$

$$G_{uc} = 2.8773$$

**Control Difuso PI del regulador de
tensión DC del STATCOM, con COA**

$$G_{pp} = 2.5794$$

$$G_{intp} = 0.2241$$

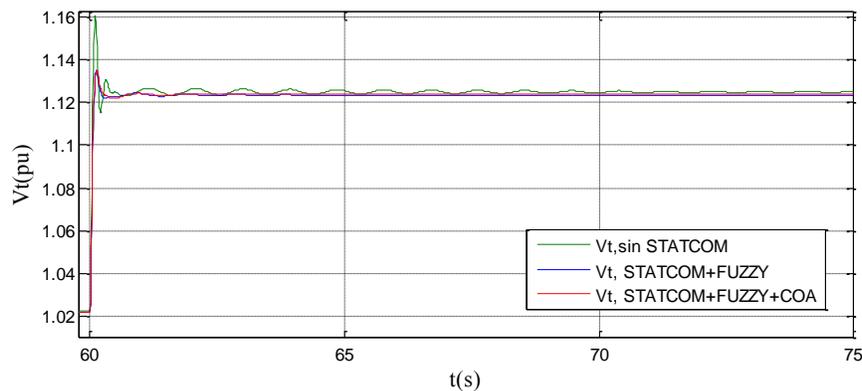
$$G_{up} = 1.2897$$

8.3. Resultados de simulación del controlador de oscilaciones de tipo difuso del STATCOM, ajustado con COA

En esta sección, se discute el comportamiento y se muestran los resultados del sistema SMIB con STATCOM, bajo la acción del control difuso sintonizado con COA.

Los resultados que se muestran en las figuras 77 y 78, se obtienen a partir de la condición de operación nominal ($P = 0.7$ y $Q = 0.3$); mientras que las figuras 79 y 80 son obtenidas bajo la condición de sobrecarga ($P = 1.2$ y $Q = 0.4$).

Además, el sistema es sometido a aumentos del 10% en la tensión de referencia (V_t) y del 1.5% en la Potencia mecánica de entrada (P_e).



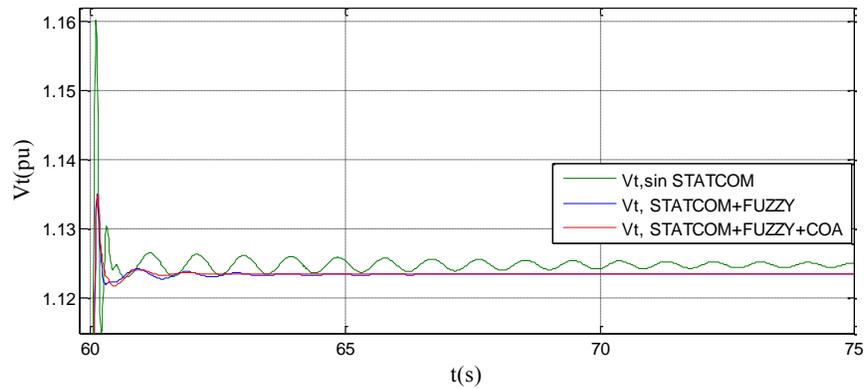


Figura 77: V_t sin STATCOM, V_t con STATCOM+FUZZY y FUZZY +COA, en operación nominal y ante un aumento del 10% en la tensión de referencia

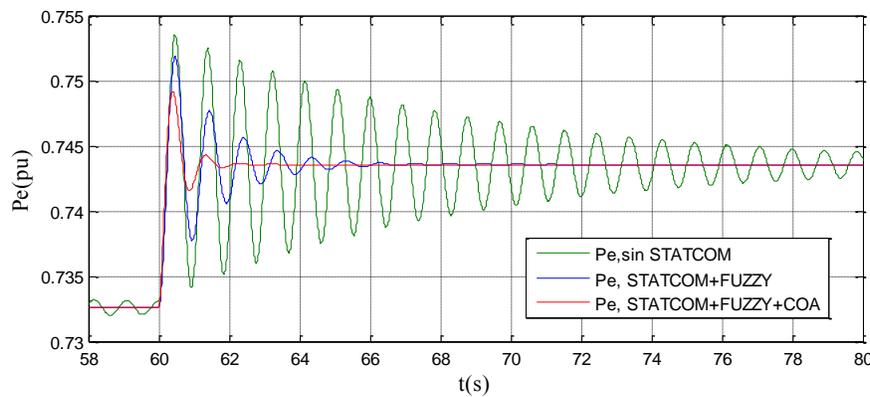


Figura 78: P_e sin STATCOM, P_e con STATCOM +FUZZY y FUZZY +COA, en operación nominal y ante un aumento del 1.5% en la potencia mecánica

Tabla 29. Parámetros de respuesta V_t del sistema SMIB con STATCOM y COA, en condición nominal

	SMIB	SMIB+STATCOM+FUZZY	SMIB+STATCOM+FUZZY+COA
ts(s)	0.4	0.21	0.23
Mp(%)	3.12	1.02	0.99

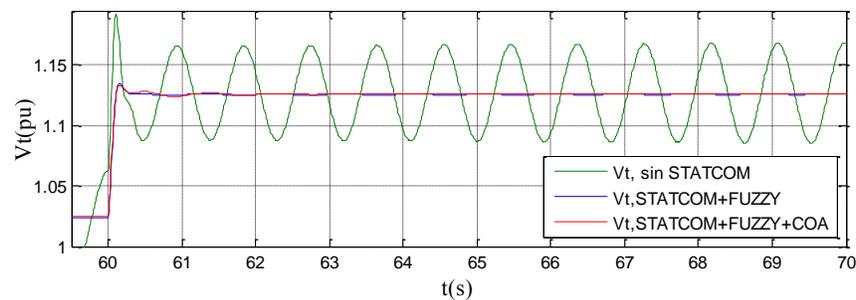


Figura 79: V_t sin STATCOM, V_t con STATCOM +FUZZY y FUZZY +COA, en sobrecarga y ante un aumento del 10% en la tensión de referencia

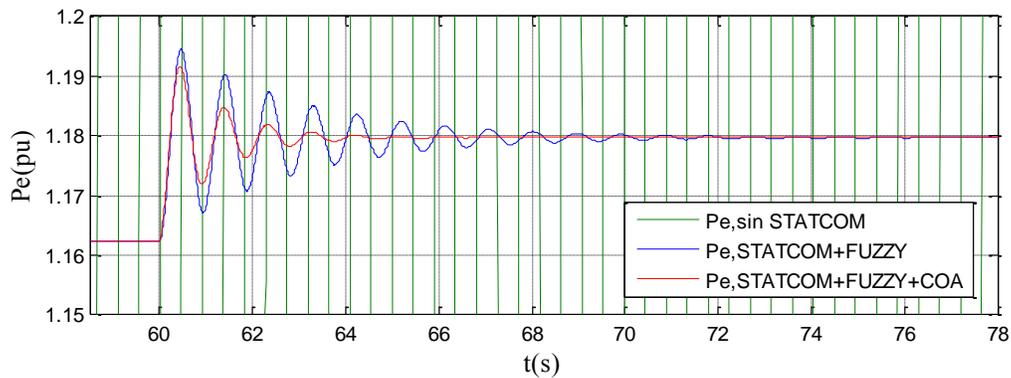


Figura 80: P_e sin STATCOM, P_e con STATCOM +FUZZY y FUZZY +COA, en sobrecarga y ante un aumento del 1.5% en la potencia mecánica

Tabla 30. Parámetros de respuesta V_t del sistema SMIB con STATCOM y COA, en sobrecarga

	SMIB	SMIB+STATCOM+FUZZY	SMIB+STATCOM+FUZZY+COA
ts(s)	-	0.25	0.25
Mp(%)	-	0.835	0.666

Como se evidencia en la figuras 77 a 80 y en las tablas 29 y 30, el controlador difuso sintonizado con COA logra una mayor amortiguación de oscilaciones del sistema que el controlador ajustado empíricamente.

8.4. Ajuste del controlador de oscilaciones de tipo difuso del SVC, con COA

Con el algoritmo de optimización caótica, se busca encontrar la mejor solución posible en el problema de sintonización de las ganancias del controlador de oscilaciones de tipo difuso del SVC. Para tal fin, se utiliza como función objetivo el índice de rendimiento ITSE, al igual que en los casos anteriores.

Los parámetros utilizados en la implementación del controlador del SVC, sintonizado con el algoritmo de optimización caótico basado en el mapa Lozi, son los siguientes:

- Parámetros del mapa Lozi: $y_1 \in [-0.6418, 0.6716]$, $[\alpha, \beta] = (-0.6418, 0.6716)$, $a = 1.7$ y $b = 0.5$.
- Número máximo de iteraciones de búsqueda caótica global: $M_g=20$.
- Número máximo de iteraciones de búsqueda caótica local: $M_L=15$.
- Tamaño de paso en búsqueda caótica local: $\lambda=0.1$.
- $L_i = [0.001, 0.01, 0.01]$
- $U_i = [0.3, 2, 3]$

Después de varios ensayos se obtienen las posibles soluciones del problema de sintonización, y se consignan en la siguiente tabla:

Tabla 31. Ganancias del control difuso del SVC ajustado con COA

Ensayo	G_p	G_{int}	G_u	ITSE
1	0.2400	1.6006	2.3999	0.0002779
2	0.2492	1.6620	2.4922	0.0002661
3	0.2323	1.5492	2.3226	0.0002901
4	0.2312	1.5420	2.3119	0.0002909
5	0.2745	1.8304	2.7452	0.0002368
6	0.2504	1.6696	2.5035	0.0002624
7	0.2702	1.8019	2.7023	0.0002396
8	0.3040	2.0264	3.0397	0.0002060
9	0.2583	1.7226	2.5833	0.0002559
10	0.2653	1.6726	2.5081	0.0002653

Finalmente, la mejor solución encontrada para las ganancias del control difuso del SVC son las siguientes:

Control Difuso del SVC con COA

$$G_p = 0.2745$$

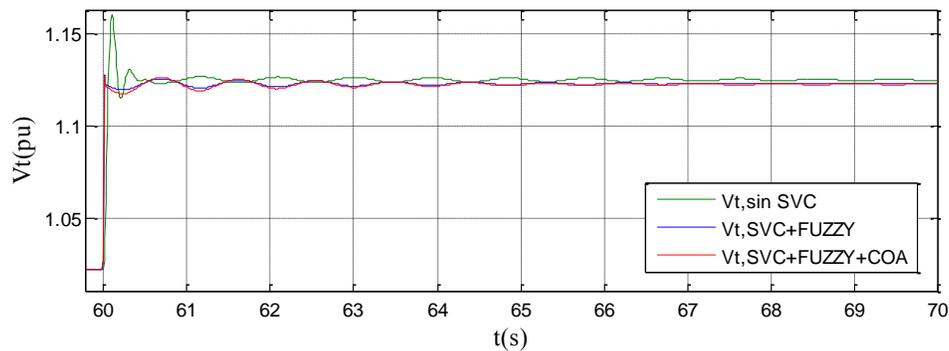
$$G_{int} = 1.8304$$

$$G_u = 2.7452$$

8.5. Resultados de simulación del controlador de oscilaciones de tipo difuso del SVC, ajustado con COA

A continuación, se presentan los resultados del sistema SMIB con SVC y con control de oscilaciones difuso ajustado con COA.

Al igual que en el anterior numeral, los resultados presentados se dan en condición de operación nominal ($P = 0.7$ y $Q = 0.3$) y en condición de sobrecarga ($P = 1.2$ y $Q = 0.4$), con perturbaciones en la tensión de referencia (V_t) del 10% y en la Potencia mecánica de entrada (P_e) del 1.5%.



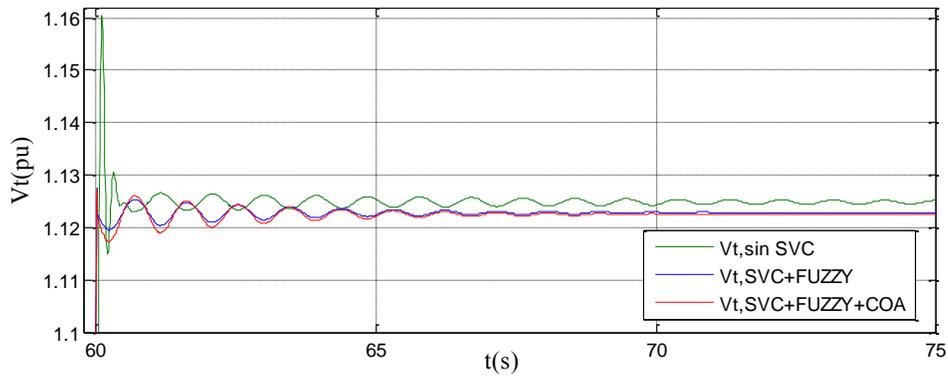


Figura 81: V_t sin SVC, V_t con SVC, +FUZZY y FUZZY +COA, en carga nominal y ante un aumento del 10% en la tensión de referencia

Tabla 32. Parámetros de respuesta V_t del sistema SMIB con SVC y COA, en condición nominal

	SMIB	SMIB+SVC+FUZZY	SMIB+SVC+FUZZY+COA
ts(s)	0.4	0,40	0.35
Mp(%)	3.12	0.418	0.409

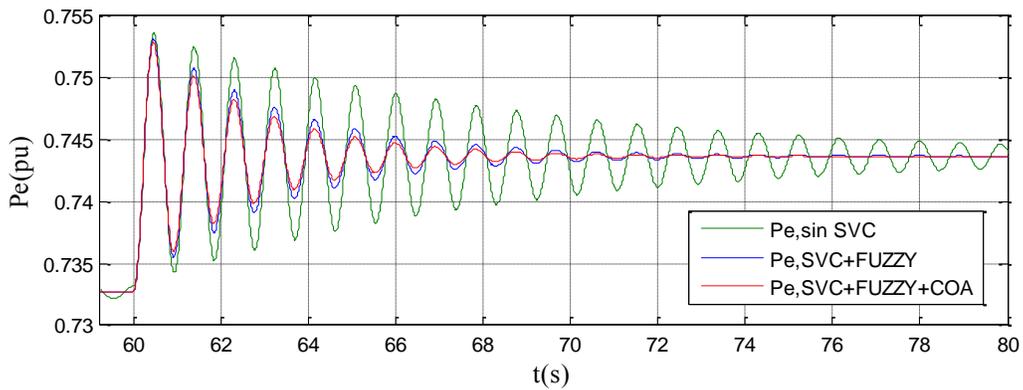


Figura 82: P_e sin SVC, P_e con SVC +FUZZY y FUZZY +COA, en carga nominal y ante un aumento del 10% en la tensión de referencia

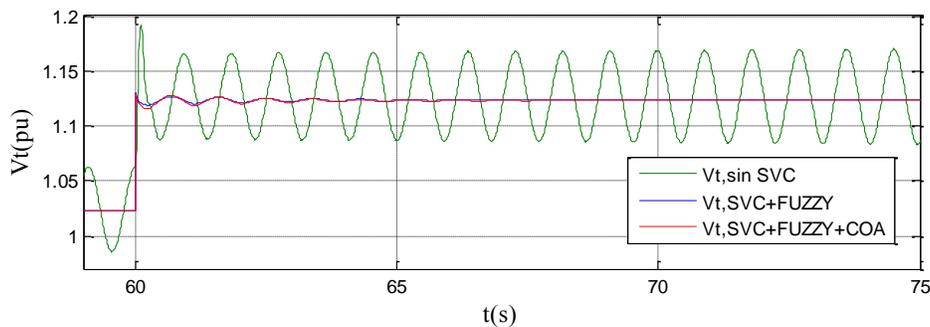


Figura 83: V_t sin SVC, V_t con SVC +FUZZY y FUZZY +COA, en sobrecarga y ante un aumento del 10% en la tensión de referencia

Tabla 33. Parámetros de respuesta V_t del sistema SMIB con SVC y COA, en sobrecarga

	SMIB	SMIB+SVC+FUZZY	SMIB+SVC+FUZZY+COA
ts(s)	-	0,4	0.35
Mp(%)	-	0.55	0.54

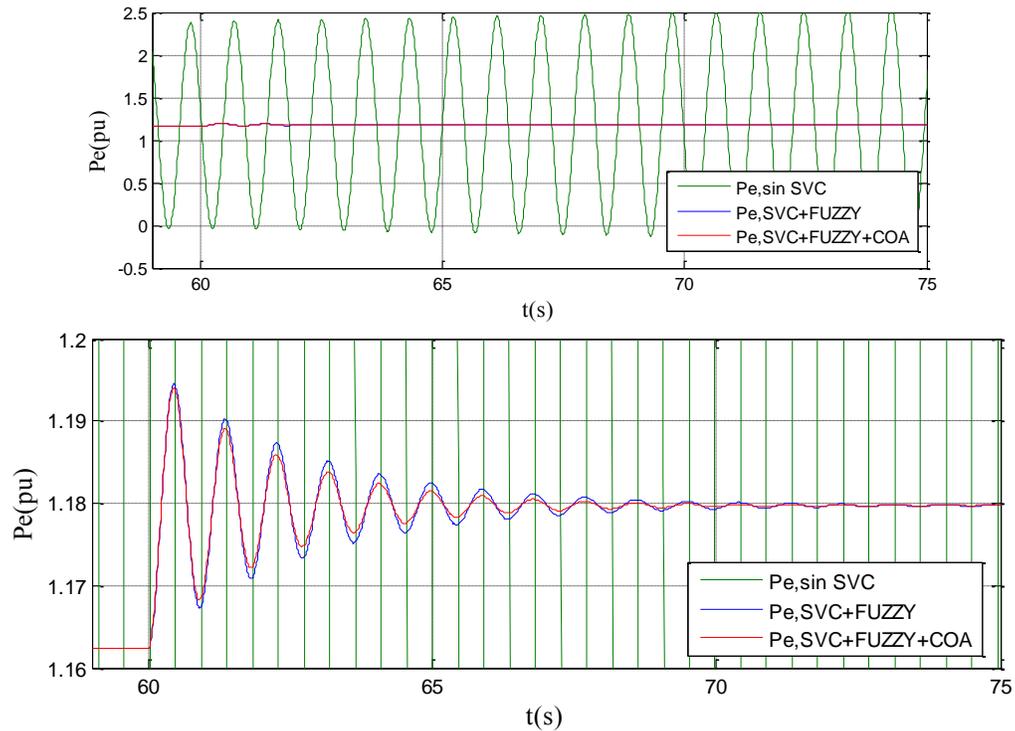


Figura 84: P_e sin SVC, P_e con SVC+FUZZY y FUZZY +COA, en sobrecarga y ante un aumento del 1.5% en la potencia mecánica

Se observa que el comportamiento del sistema con controlador de oscilaciones de tipo difuso presenta un buen desempeño para cualquier condición de operación. Sin embargo, el controlador sintonizado con COA logra una mayor disminución en la amplitud de las oscilaciones que el controlador ajustado heurísticamente.

Capítulo 9

COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL STATCOM Y DEL SVC CON LOS DIFERENTES CONTROLES

En este capítulo se comparan los resultados obtenidos con los controladores de oscilaciones de tipo difuso del STATCOM y del SVC, sintonizados con las técnicas AG, PSO y COA.

9.1. Comparación de resultados de los métodos de ajuste del controlador de oscilaciones de tipo difuso del STATCOM

La Figuras 84 y 85 muestran la respuesta de la tensión en terminales y de la velocidad del rotor del sistema, para una perturbación en la tensión de referencia y en la potencia mecánica, respectivamente. En la tabla 34, se comparan los resultados de los métodos de sintonización del controlador de oscilaciones de tipo difuso del STATCOM.

Tabla 34. Comparación métodos de ajuste del controlador de oscilaciones del STATCOM

Método de ajuste STATCOM	Ganancias control difuso			Parámetros de respuesta	Índice de desempeño
	Gpc	Gintc	Guc	Mp(%)	ITSE
Empírico	3.0000	0.0100	2.0000	1.02	0.0002130
AG	9.7293	2.0374	2.5685	1.06	0.0000481
PSO	9.6878	0.9439	2.9287	0.98	0.0000430
COA	9.5585	5.7056	2.8773	0.99	0.0000445

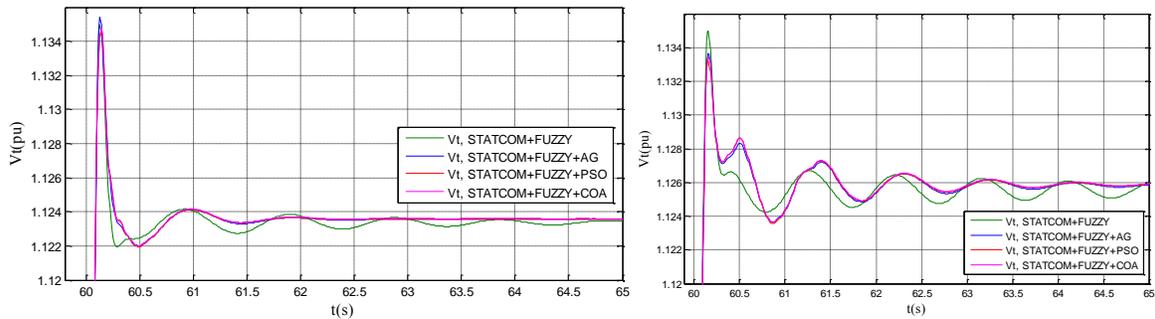


Figura 85: Respuestas para V_t en condiciones de operación (a) nominal (b) sobrecarga. STATCOM con FUZZY, AG, PSO y COA, ante un aumento del 10% en la tensión de referencia

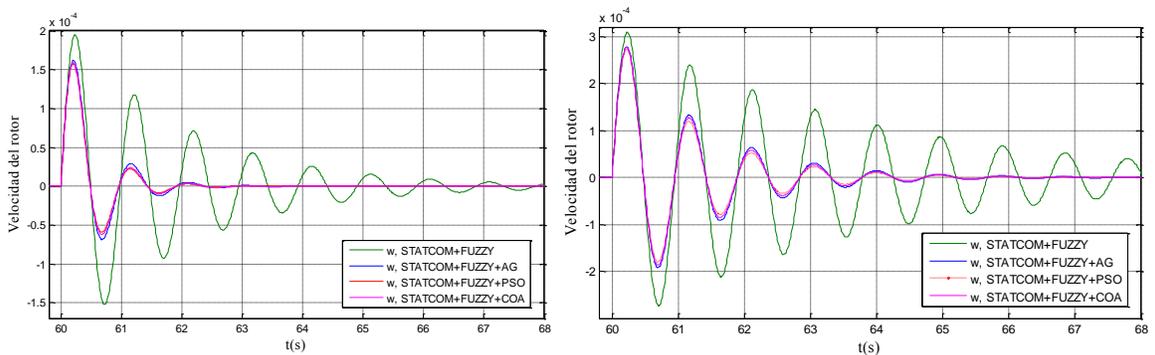


Figura 86: Respuestas para ω en condiciones de operación (a) nominal (b) sobrecarga. STATCOM con FUZZY, AG, PSO y COA, ante un aumento del 1.5% en la potencia mecánica

Como se puede observar, es evidente que el rendimiento del controlador ajustado mediante el método empírico es menor que el obtenido con los métodos AG, PSO y COA. También, se muestra que el método de ajuste con PSO posee una mejor amortiguación de las oscilaciones que el AG y el COA.

9.2. Comparación de resultados de los métodos de ajuste del controlador de oscilaciones de tipo difuso del SVC

A continuación se muestra la comparación de respuestas de la tensión en terminales V_t y la velocidad del rotor ω , del sistema SMIB con SVC, bajo la acción del controlador de oscilaciones de tipo difuso sintonizado con AG, PSO y COA.

Tabla 35. Comparación métodos de ajuste del controlador de oscilaciones del SVC

Método de ajuste SVC	Ganancias control difuso			Parámetros de respuesta	Índice de desempeño
	Gp	Gint	Gu	Mp(%)	ITSE
Empírico	0.0814	0.9493	6.0000	0.418	0.0003597
AG	0.2408	0.8796	2.4739	0.409	0.0003069
PSO	0.2921	0.8095	2.5493	0.409	0.0002677
COA	0.2745	1.8304	2.7452	0.409	0.0002374

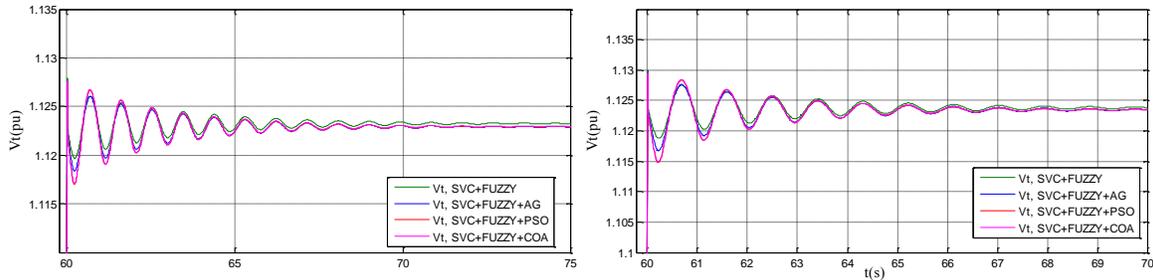


Figura 87: Respuestas para V_t en condiciones de operación (a) nominal (b) sobrecarga. SVC con FUZZY, AG, PSO y COA, ante un aumento del 10% en la tensión de referencia

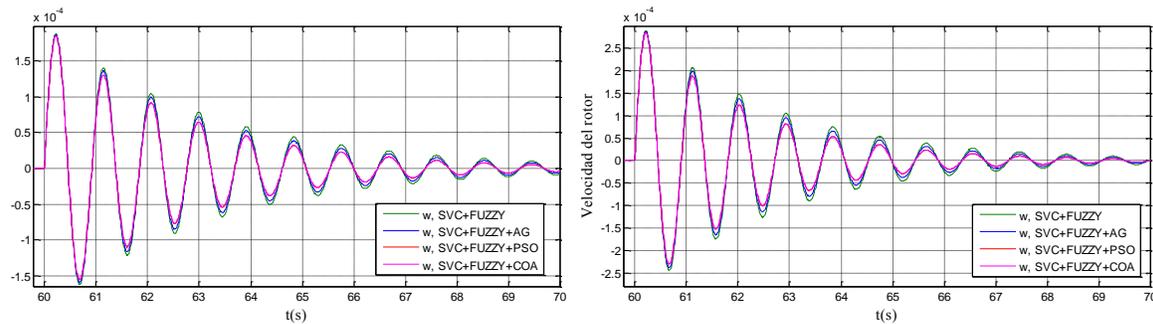


Figura 88: Respuestas para ω en condiciones de operación (a) nominal (b) sobrecarga. SVC con FUZZY, AG, PSO y COA, ante un aumento del 1.5% en la potencia mecánica

Se observa que el desempeño del controlador de oscilaciones de tipo difuso, es muy similar con los diferentes métodos de ajuste (empírico, AG, PSO y COA). Es decir, presentan un nivel amortiguamiento de oscilaciones muy semejante.

Finalmente, en las figuras 89 a 92 se muestra la comparación de respuestas del sistema SMIB con STATCOM y con SVC, bajo la acción del controlador de oscilaciones de tipo difuso sintonizado con AG, PSO y COA; y ante múltiples perturbaciones (tren de pulsos) en la tensión de referencia y en la potencia mecánica.

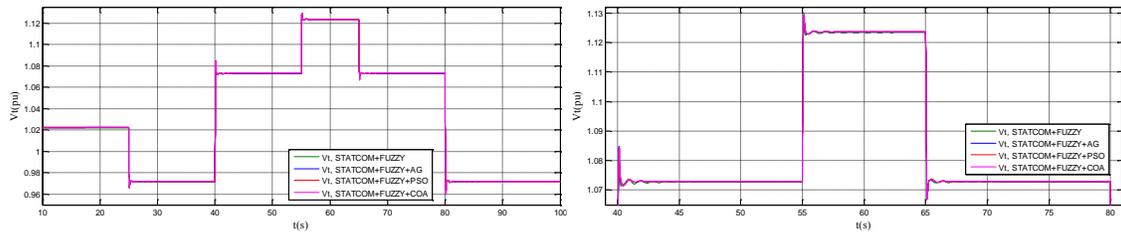


Figura 89: Respuesta en condición de operación nominal para V_t del STATCOM con FUZZY, AG, PSO y COA, ante diferentes perturbaciones en la tensión de referencia.

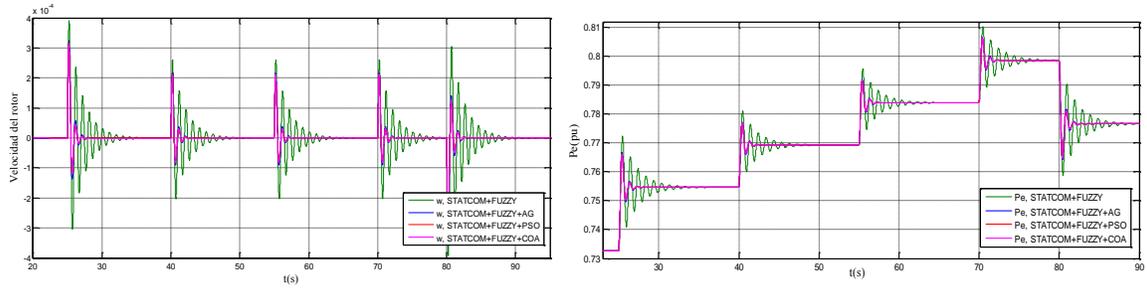


Figura 90: Respuestas en condición de operación nominal de (a) Velocidad del rotor ω (b) Potencia eléctrica P_e , del STATCOM con FUZZY, AG, PSO y COA. Ante diferentes perturbaciones en la potencia mecánica.

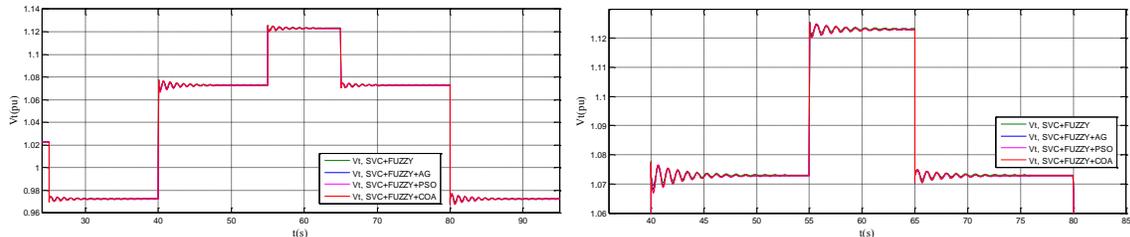


Figura 91: Respuesta en condición de operación nominal para V_t del SVC con FUZZY, AG, PSO y COA, ante diferentes perturbaciones en la tensión de referencia.

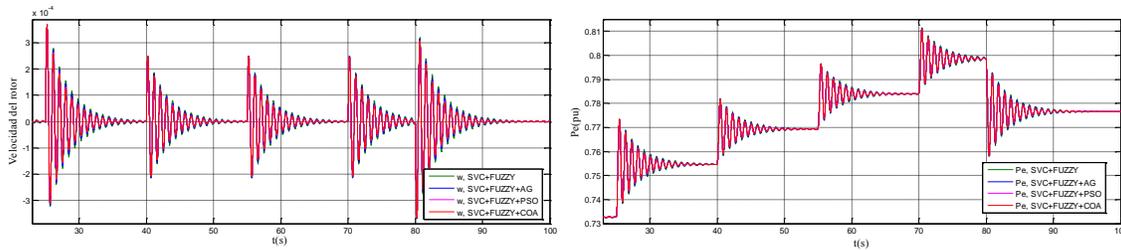


Figura 92: Respuestas en condición de operación nominal de (a) Velocidad del rotor ω (b) Potencia eléctrica P_e , del SVC con FUZZY, AG, PSO y COA. Ante diferentes perturbaciones en la potencia mecánica.

Conclusiones, contribuciones y recomendaciones para trabajos futuros

Conclusiones

El trabajo presentado se orienta a la aplicación del control inteligente en el amortiguamiento de oscilaciones usando FACTS (STATCOM y SVC). Con la aplicación de la metodología propuesta en este trabajo, se sintonizan las mejores ganancias para el control difuso obteniéndose, en consecuencia, controladores capaces de operar de manera satisfactoria sobre un amplio rango de condiciones operativas del sistema.

Se obtuvieron respuestas estables para condiciones de operación nominal y baja carga, obteniendo el menor tiempo de establecimiento cuando el sistema se encuentra en puntos cercanos a la condición de operación nominal. Mientras que para la condición de sobrecarga del sistema SMIB sin tener incluido ningún dispositivo FACTS (SVC- STATCOM), se presenta una respuesta con oscilaciones crecientes y no amortiguadas, y por lo tanto inestable.

Los algoritmos de optimización (AG, PSO y COA) se usaron únicamente para sintonizar las ganancias del controlador difuso.

Se comprobó la efectividad de los controladores de oscilaciones de tipo difuso del STATCOM y del SVC, ajustados heurísticamente, los cuales proporcionan un aumento en la amortiguación de las oscilaciones.

El ajuste del control difuso con AG, COA ó PSO, presenta un mejor comportamiento que el control difuso ajustado a ensayo y error; como puede observarse en el sistema SMIB con STATCOM incluido.

En este trabajo, se observa la mejora en el sistema SMIB al incluir un dispositivo FACTS (STATCOM, SVC), bajo la acción del control difuso. Con la inclusión del STATCOM o del SVC se mejora notablemente el comportamiento de las salidas, al disminuir las oscilaciones.

Los algoritmos de optimización empleados en la sintonización del control difuso, tienen como ventaja que realizan una búsqueda sobre el espacio de estado completo, encontrando la mejor solución para el sistema de control.

El buen desempeño de algunos métodos de control inteligente, en el amortiguamiento de oscilaciones usando FACTS, se demostró bajo diferentes condiciones de operación.

Contribuciones

Los principales aportes de este trabajo son:

- Aplicación del control inteligente (Control Difuso, AG, PSO y COA) en el amortiguamiento de oscilaciones usando dispositivos FACTS (STATCOM y SVC).
- Resultados del comportamiento de dos dispositivos FACTS (STATCOM y SVC), implementados en un sistema SMIB, bajo la acción de un controlador de oscilaciones de tipo difuso ajustado con AG, PSO y COA.
- Aplicación y desarrollo de técnicas como Algoritmos Genéticos (AG), Optimización por Enjambre de Partículas (PSO) y Algoritmos de Optimización Caótica (COA), para la sintonización de las ganancias del controlador de oscilaciones de tipo difuso de los dispositivos FACTS (STATCOM y SVC).
- Procedimientos y resultados que sirven como experiencia y base para los diseños de controladores de tipo difuso de otros dispositivos FACTS.
- El estudio de control para el amortiguamiento de oscilaciones de compensadores FACTS (STATCOM y SVC), que permite el avance en la línea de Sistemas Flexibles de Transmisión en Corriente Alterna (FACTS) del grupo de investigación.
- Aplicación del algoritmo de optimización caótica COA en la sintonización del control difuso que según la revisión bibliográfica, hecha hasta el momento, no se ha aprovechado su simplicidad y fácil implementación en la sintonización del controlador de oscilaciones (POD) de tipo difuso de ningún dispositivo FACTS.

Recomendaciones para trabajos futuros

De acuerdo con los resultados e información recopilada en esta tesis, se establecen algunos criterios para emplearse como referencia en futuros trabajos relacionados con el control inteligente y los dispositivos FACTS en el amortiguamiento de oscilaciones, como por ejemplo:

- Aplicar el control inteligente en el amortiguamiento de oscilaciones usando el controlador unificado de flujo de potencia (UPFC), el cual permite controles de potencia activa y reactiva.
- Desarrollar métodos de ajuste de los controladores con algoritmos de simulación en línea, que no solo ajusten las ganancias del control difuso sino también la base de reglas difusas y las funciones de pertenencia, logrando adaptarse a cada modificación de los parámetros del sistema o del comportamiento de la carga.
- Aplicar la metodología propuesta en sistemas a gran escala con características reales, para evaluar su comportamiento y desempeño considerando dispositivos FACTS.

BIBLIOGRAFÍA

- [1]. K. Ellithy, K. El-Metwally, "A Self Organizing Fuzzy Controller for SVC Stabilizer Design in the Presence of Load Characteristics Uncertainty", Journal of Electrical and Computer Engineering, vol. 7, No. 1, 2008, Winter-Spring.
- [2]. Khosravi, Mohsen, Banejad, Mahdi, "Design of SVC controller Based on Fuzzy Logic for Damping of Low Frequency Oscillations in Power Systems", The International Conference on Electrical Engineering, 2008
- [3]. B. Andrea, G. Chrystiam. "Estabilidad de pequeña señal de un sistema SMIB con UPFC", Tesis pregrado, UTP, Departamento de Ingeniería Eléctrica, 2011.
- [4]. M. H. Rashid, "Electrónica de Potencia. Circuitos, dispositivos y aplicaciones", Cap. 13, 3ª Edición, Prentice Hall, 2004.
- [5]. DÁVALOS, Ricardo y RAMÍREZ, Juan. "Características funcionales del STATCOM". CINVESTAV- I.P.N. – Unidad Guadalajara, 2001. Segundo Congreso Bienal, CIGRÉ-México, 13 – 15 de junio del 2001, Irapuato, Gto.
- [6]. CORONADO, Ixtláhuatl, ZÚÑIGA, Pável y RAMÍREZ, Juan. "FACTS: soluciones modernas para la industria eléctrica". Avance y Perspectiva, vol. 20, Julio-agosto de 2001.
- [7]. H. F. Wang. "Phillips-Heffron model of power systems installed with STATCOM and applications", "IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.", vol.146, N° 5, September 1999.
- [8]. M. Aliakbar , M. Zarringalami, "Coordinated Design of PSS and STATCOM Parameters for Power System Stability Improvement Using Genetic Algorithm". Iranian Journal of electrical and Computer Engineering, vol. 8, N° 2, 2009.
- [9]. A. G. Alfonso, M. David, "Aplicación del control difuso en un STATCOM", *Scientia et Technica Año XIII, No 34, Mayo de 2007*.
- [10]. S. M. Hassan Hosseini, J. Olamaee, H. Samadzadeh, "Power Oscillations Damping by Static Var Compensator Using an Adaptive Neuro-Fuzzy Controller", ELECO 7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, December 2011, pp. 1-4.
- [11]. D Harikrishna, K. N. Sahu, N V Srikanth, "Power System Dynamic Stability Enhancement Using Fuzzy Controlled STATCOM", Electrical and Electronic Engineering 2011; 1(2): 72-78
- [12]. A. G. Alfonso, T.P. Carlos, R. P. Carlos, "Control de un STATCOM en un sistema de potencia mediante reubicación de polos y LQR", *Scientia et Technica Año XIV, No 39, Septiembre de 2008*.
- [13]. S.S. Shoorangiz, R. H. Farahani, "Comparison of Artificial Intelligence Strategies for STATCOM Supplementary Controller Design", World Applied Sciences Journal 7 (11): 1428-1438, 2009
- [14]. M. Stella, P.K. Dash, K.P. Basu, "A fuzzy variable structure controller for STATCOM", Electric Power Systems Research, No 65, 2003, pp. 23-34.
- [15]. N.Karpagam, D.Devaraj, "Fuzzy Logic Control of Static Var Compensator for Power System Damping". International Journal of Electrical Power and Energy Systems Engineering. Vol. 2, 2010.
- [16]. S. A. Taher, R. Hematti, A. Abdolalipour, "Decentralized Controller Design for Static Synchronous Compensator Using Robust Quantitative Feedback Theory Method", American J. of Engineering and Applied Sciences, 2008, pp. 67-76.
- [17]. P. Kumkratug, "STATCOM Stabilizer based on Fuzzy Logic Control for Damping Power Oscillation". American Journal of Applied Sciences, Vol. 8, No.10, 2011, pp. 1041-1044.
- [18]. KL. Liou, Y.Y. Hsu, "Damping Of Generator Oscillations Using Static Var Compensator", IEEE Transactions on AES, Vol. 22, No. 5. 1986, pp. 605-617.
- [19]. N. G. Hingorani and Laszlo Gyugyi, "Understanding FACTS". IEEE Press, 2000.
- [20]. R. Tapia, "Un criterio óptimo para coordinar estabilizadores enfocado mediante una técnica global heurística". Tesis Maestría en Ciencias, CINVESTAV del IPN Unidad Guadalajara, Departamento de Ingeniería Eléctrica, 2002. 120p.
- [21]. Coronado Ixtláhuatl, "FACTS: soluciones modernas para la industria eléctrica", Avance y Perspectiva vol. 20, No. 3, pp. 173-179, 1995.
- [22]. D. Stevenson, William, "Análisis de sistemas eléctricos de potencia", McGraw-Hill, 2000, cap.14.
- [23]. P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, 1994, cap.12.
- [24]. S. L. Nilsson, "Security aspects of flexible AC transmission system controller applications", Electrical Power and Energy Systems, Vol. 17, No. 3, pp. 173-179, 1995.
- [25]. M. Pavella, P. G. Murthy, "Transient Stability of Power Systems, Theory and Practice" Jonh Wiley & Sons, England (1994).
- [26]. K. Ellithy, K. El-Metwally, "A Self Organizing Fuzzy Controller for SVC Stabilizer Design in the Presence of Load Characteristics Uncertainty", Journal of Electrical and Computer Engineering, vol. 7, No. 1, 2008, Winter-Spring.
- [27]. A. L. B. Do Bomfim, G. N. Taranto, D. M. Falcao. "Simultaneous tuning of power system damping controllers using genetic algorithms". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No. 1, February 2000, pp. 163-169.
- [28]. G. N. Taranto and D. M. Falcao. "Robust decentralized control design using genetic algorithm in power system damping control". IEE Proc.- Gener. Transm. Distrib., Vol. 145, No. 1, Jan. 1998, pp. 1-6.
- [29]. H. F. Wang. "Phillips-Heffron model of power systems installed with STATCOM and applications", IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., vol.146, N° 5, September 1999.
- [30]. CERDA, Sebastián André. "Modelación e Incorporación del Controlador Unificado de Flujo de Potencia en el Flujo de Potencia Óptimo". Trabajo de grado Ingeniero Civil Electricista.: Universidad de Chile. Facultad de Ciencias físicas y matemáticas. Departamento de Ingeniería Eléctrica, 2005. 139p.
- [31]. Singh S. N., Verma K. S., Gupta H. O., "Optimal Power Flow Control in Open Power Market Using Unified Power Flow Controller", IEEE PES Summer Meeting, Vancouver, Canada, 2001.
- [32]. A. G. Alfonso, "Control Difuso".
- [33]. A. G. Alfonso, H. Mauricio, E. Andrés, "Uso de algoritmos genéticos en la sintonización de ganancias de un controlador difuso pid", *Scientia et Technica*.

- [34]. H.Hasanvand, B. Mozafari, S. Soleymani, “*Design of Optimal Power Swing Damping and Fuzzy Logic Controller for SVC Using Improved Particle Swarm Optimization Algorithm*”, IEEE, International Conference on Computer Applications and Industrial Electronics (ICCAIE), 2011.
- [35]. A. Álzate, J. A. Herrera, O. E. Castro, “*Efecto de un Compensador De VAR Estático En El Amortiguamiento de las Oscilaciones*”, Scientia et Technica N° 21, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, 2003.
- [36]. K. Ellithy, “*Tuning of SVC stabilizers over a wide range of load parameters using pole-placement technique*”, International Conference on Communication, Computer & Power, IEEE, 2007.
- [37]. C. F. Gallardo, “*Estabilidad y Amortiguamiento de Oscilaciones en Sistemas Eléctricos con Alta Penetración Eólica*”, Tesis doctoral Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Automática de la Universidad Carlos III de Madrid, 2009.
- [38]. S. Gomáriz, D. Biel, “*Teoría de Control: Diseño electrónico*”, Edicions UPC, 1998, cap.5.
- [39]. C. Gloria. “*Estabilidad de sistemas eléctricos de potencia PSSs*”, Tesis pregrado, Universidad Nacional De Colombia, Departamento de Ingeniería Eléctrica, 2009.
- [40]. R. Tapia, “*Un criterio óptimo para coordinar estabilizadores en sistemas eléctricos de potencia*”. Tesis Doctorado en Ciencias, CINVESTAV del IPN Unidad Guadalajara, Departamento de Ingeniería Eléctrica, 2002. 131p.
- [41]. A. L. B. Do Bomfim, G. N. Taranto, D. M. Falcao. “*Simultaneous tuning of power system damping controllers using genetic algorithms*”. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No. 1, February 2000, pp. 163-169.
- [42]. G. N. Taranto and D. M. Falcao. “*Robust decentralized control design using genetic algorithm in power system damping control*”. IEE Proc.- Gener. Transm. Distrib., Vol. 145, No. 1, Jan. 1998, pp. 1-6.
- [43]. D. E. Goldberg. “*Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*”. Addison-Wesley, 1989.
- [44]. M. Gen, R. Cheng. “*Genetic algorithms & Engineering Design*”. John Wiley & Sons, Inc., 1997.
- [45]. Juan M. Ramírez, Arredondo, Isidro Castillo Toledo, and Bernardino Castillo, “*PSS and FDS Coordination by a Genetic Algorithm*” Artículo sometido al International Journal of Electrical Power and Energy Systems de Elsevier, Junio, 2001.
- [46]. Isidro Castillo T., Juan M. Ramírez and Rubén Tapia “*A Genetic Algorithm Applied to Enhance the Damping of Multi-machine Power System*”. NAPS Proceedings, College Station, Texas, October 2001.
- [47]. Christopher R. Houck, Jeffery, A. Joines and Michael G. Kay “*A Genetic Algorithm for Function Optimization: A Matlab Implementation*”, North Carolina State University, Pp. 1-14.
- [48]. M. F. Kandlawala, “*An Optimized Fuzzy Logic-based Control of Static VAR Compensator in a Power System With Wind Generation*”, IEEE 2009.
- [49]. N. A. M. Kamari, I. Musirin, Z. A. Hamid, M. N. A. Rahim, “*Optimal design of svc-pi controller for damping improvement using new computational intelligence approach*”, Journal of Theoretical and Applied Information Technology, Vol. 42, No. 2. 2005
- [50]. R. Nicolás. “*Control de voltaje de un compensador estático de VARs utilizando lógica difusa sintonizado por TABÚ*”, Tesis Maestría, Instituto Politécnico Nacional, Departamento de Ingeniería Eléctrica, 2006.
- [51]. D. Driankov, M. Hellendoorn, “*An Introduction to fuzzy control*”, New York 1996.
- [52]. J. Klir, A. George, “*Fuzzy sets uncertainty and information*”, New York 1992.
- [53]. Kosko, Bart, “*Neural networks and fuzzy systems*”, Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall, 1992.
- [54]. H. Andrés, O. Javier, “*Determinación de los parámetros del motor de inducción utilizando un algoritmo de optimización por cúmulo de partículas (PSO)*”. Tesis, Universidad Tecnológica de Pereira, Departamento de Ingeniería Eléctrica, 2010. 104p.
- [55]. H. José, “*Optimización mediante PSO del perfil resistivo de un monopolo cargado para aplicaciones UWB*”. Tesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2008. 52p.
- [56]. G. José, “*Algoritmos basados en cúmulos de partículas para la resolución de problemas complejos*”. Tesis, 2006. 113p.
- [57]. J. Kennedy, R. Eberhart, “*Particle swarm optimization*”, Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks, Vol. 4, pp. 1942-1948, 1995.
- [58]. J. John, G. Luis, “*Sintonización del D-STATCOM por medio del método de organización PSO*”. Tesis, Universidad Tecnológica de Pereira, Departamento de Ingeniería Eléctrica, 2013. 78p.
- [59]. H. Chen, J. Li, “*PSO-based self-tuning PI control for STATCOM*”, 7th International Power Electronics and Motion Control Conference - ECCE Asia, IEEE, 2012.
- [60]. S. Farahani, M. Nikzad, M. Bigdeli, “*STATCOM control using a PSO-based IP controller*”, Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, Pp. 768-774, 2012.
- [61]. A. Safari, H. Shayeghi, H.A. Shayanfar, “*A chaotic optimization algorithm to output feedback damping controller design for a STATCOM*”, International Journal on “Technical and Physical Problems of Engineering” (IJTPE), Iss. 4, Vol. 2, No. 3, 2010.
- [62]. A. Jalilvand, A. Safari, “*Damping Controller-Based UPFC Design Using Chaotic Optimization Algorithm*”, IEEE, 2009.
- [63]. H. Shayeghi, H.A. Shayanfar, S. Jalilzadeh, A. Safari, “*Multi-machine power system stabilizers design using chaotic optimization algorithm*”, Energy Conversion and Management, 1572-1580, No. 51, 2010.
- [64]. D. Yang, G. Li, G. Cheng, “*On the efficiency of chaos optimization algorithms for global optimization*”, Chaos, Solitons and Fractals, 1366-1375, No. 34, 2007.
- [65]. M. Farahani, S. Ganjefar, M. Alizadeh, “*PID controller adjustment using chaotic optimisation algorithm for multi-area load frequency control*”, IET Control Theory Appl., 2012, Vol. 6, Iss. 13, pp. 1984-1992.
- [66]. S. Jalilzadeh, R. Noroozian, M. Sabouri, S. Behzadpoor, “*PSS and SVC Controller Design Using Chaos, PSO and SFL Algorithms to Enhancing the Power System Stability*”, Energy and Power Engineering, 3, 87-95, 2011.
- [67]. S. Jalilzadeh, H. Shayeghi, A. Safari, E. Aliabadi, “*Robust Coordinated Design of UPFC Damping Controller and PSS Using Chaotic Optimization Algorithm*”, IEEE, 2009.
- [68]. S. Jalilzadeh, H. Shayeghi, A. Safari, H.A. Shayanfar, “*Robust PSS Design Using Chaotic Optimization Algorithm for a Multimachine Power System*”, IEEE, 2009.
- [69]. H. Shayeghi, A. Safari, H.A. Shayanfar, “*Robust State Feedback Controller Design of STATCOM Using Chaotic Optimization Algorithm*”, Serbian Journal of Electrical Engineering, Vol. 7, No. 2, 253-268, 2010.
- [70]. L.D. Coelho, “*Tuning of PID controller for an automatic regulator voltaje system using chaotic optimization approach*”, Chaos, Solitons and Fractals, 1504-1514, 2009.

APÉNDICE A

Lista de Símbolos

H	Constante de inercia ($M = 2H$)
X_{LB}	Reactancia de la línea de transmisión del STATCOM
X_{SDT}	Reactancia de salida del transformador del STATCOM
X_e	Reactancia de la línea de transmisión del SVC
X_B	Reactancia del transformador boosting (BT)
X_d	Reactancia síncrona de eje directo del generador en estado estable
X_q	Reactancia síncrona de eje en cuadratura del generador en estado estable
X'_d	Reactancia síncrona transitoria de eje directo del generador
P_e	Potencia eléctrica del generador
P_m	Potencia mecánica de entrada del generador
V_t	Tensión en los terminales del generador
V_B	Tensión del barraje infinito
V_{DC}	Tensión en el link DC
C_{DC}	Capacitor del link DC
m	Índice de modulación del STATCOM
ψ	Angulo del voltaje inyectado del STATCOM
T_a	Constante de tiempo del sistema de excitación
K_a	Ganancia del sistema de excitación
FACTS	Flexible Alternating Current Transmission Systems
STATCOM	Static Synchronous Compensator
SVC	Static Var Compensator
TCR	Thyristor Controlled Reactor
VSI	Voltage Source Inverter

Parámetros del sistema SMIB:

Generador

$$H = 4;$$

$$M = 8;$$

$$D = 3;$$

$$T'_{do} = 5.044;$$

$$x_e = 0.6;$$

$$x_d = 1;$$

$$x_q = 0.6;$$

$$x'_d = 0.3;$$

$$R_s = 0;$$

$$x'_q = 0.25;$$

Excitación

$$K_A = 400;$$

$$T_A = 0.050;$$

Condiciones de Operación

$$V_t = 1.025;$$

$$V_B = 1;$$

$$P = 0.7;$$

$$Q = 0.3;$$

$$f = 60\text{Hz}$$

APÉNDICE B

Constantes de linealización del modelo Heffron-Phillips del sistema SMIB

A continuación se plantea el cálculo matemático de las 6 constantes de linealización $K_1 \rightarrow K_6$ del modelo lineal del sistema SMIB, mejor conocido como “Modelo Heffron-Phillips”.

$$K_1 = -\frac{1}{\Delta} [I_q V_\infty (x'_d - x_q) \{(x_q + X_e) \sin(\delta) - R_e \cos(\delta)\} \\ + V_\infty \{(x'_d - x_q) I_d - E'_q\} \{(x'_d + X_e) \cos(\delta) + R_e \sin(\delta)\}]$$

$$K_2 = \frac{1}{\Delta} [I_q \Delta + I_q (x'_d - x_q) (x_q + X_e) - R_e (x'_d - x_q) I_d + R_e E'_q]$$

$$\frac{1}{K_3} = 1 + \frac{(x_d - x'_d)(x_q + X_e)}{\Delta}$$

$$K_4 = \frac{V_\infty (x_d - x'_d)}{\Delta} [(x_q + X_e) \sin(\delta) - R_e \cos(\delta)]$$

$$K_5 = \frac{1}{\Delta} \left\{ \frac{V_d}{V_t} x_q [R_e V_\infty \sin(\delta) + V_\infty \cos(\delta) (x'_d + X_e)] \right. \\ \left. + \frac{V_q}{V_t} \left[x'_d (R_e V_\infty \cos(\delta) - V_\infty (x_q + X_e) \sin(\delta)) \right] \right\}$$

$$K_6 = \frac{1}{\Delta} \left\{ \frac{V_d}{V_t} x_q R_e - \frac{V_q}{V_t} x'_d (x_q + X_e) \right\} + \frac{V_q}{V_t}$$

$$\Delta = R_e^2 + (X_e + x_q)(X_e + x'_d)$$

APÉNDICE C

Constantes de linealización del sistema SMIB con STATCOM

$$\begin{aligned}
 K_{1S} &= (E'_{qo} + (X_q - X'_d)I_{tLdo}) \left(\frac{V_B \cos(\delta)}{A} \right) + ((X_q - X'_d)I_{tLqo}) \left(\frac{V_B \text{sen}(\delta)}{B} \right) \\
 K_{2S} &= I_{tLqo} + ((X_q - X'_d)I_{tLqo}) \left(\frac{1 + \frac{X_{LB}}{X_{SDT}}}{B} \right) \\
 K_{Pc} &= (E'_{qo} + (X_q - X'_d)I_{tLdo}) \left(\frac{X_{LB} V_{DCO} \cos(\psi_o)}{A X_{SDT}} \right) + ((X_q - X'_d)I_{tLqo}) \left(-\frac{X_{LB} V_{DCO} \text{sen}(\psi_o)}{B X_{SDT}} \right) \\
 K_{Pdc} &= (E'_{qo} + (X_q - X'_d)I_{tLdo}) \left(\frac{X_{LB} c_o \cos(\psi_o)}{A X_{SDT}} \right) + ((X_q - X'_d)I_{tLqo}) \left(-\frac{X_{LB} c_o \text{sen}(\psi_o)}{B X_{SDT}} \right) \\
 K_{P\psi} &= (E'_{qo} + (X_q - X'_d)I_{tLdo}) \left(-\frac{X_{LB} c_o V_{DCO} \text{sen}(\psi_o)}{A X_{SDT}} \right) + ((X_q - X'_d)I_{tLqo}) \left(-\frac{X_{LB} c_o V_{DCO} \cos(\psi_o)}{B X_{SDT}} \right) \\
 K_{3S} &= 1 + (X_d - X'_d) \left(\frac{1 + \frac{X_{LB}}{X_{SDT}}}{B} \right) \\
 K_{4S} &= (X_d - X'_d) \left(\frac{V_B \text{sen}(\delta)}{B} \right) \\
 K_{Qc} &= (X_d - X'_d) \left(-\frac{X_{LB} V_{DCO} \text{sen}(\psi_o)}{B X_{SDT}} \right) \\
 K_{Qdc} &= (X_d - X'_d) \left(-\frac{X_{LB} c_o \text{sen}(\psi_o)}{B X_{SDT}} \right) \\
 K_{Q\psi} &= (X_d - X'_d) \left(-\frac{X_{LB} c_o V_{DCO} \cos(\psi_o)}{B X_{SDT}} \right) \\
 K_{5S} &= \left(\frac{X'^2_d I_{tLdo} - X'_d E'_{qo}}{V_{to}} \right) \left(\frac{V_B \text{sen}(\delta)}{B} \right) + \left(\frac{X_q^2 I_{tLqo}}{V_{to}} \right) \left(\frac{V_B \cos(\delta)}{A} \right) \\
 K_{6S} &= \left(\frac{E'_{qo} - X'_d I_{tLdo}}{V_{to}} \right) \left(\frac{X'^2_d I_{tLdo} - X'_d E'_{qo}}{V_{to}} \right) \left(\frac{1 + \frac{X_{LB}}{X_{SDT}}}{B} \right) \\
 K_{Vc} &= \left(\frac{X'^2_d I_{tLdo} - X'_d E'_{qo}}{V_{to}} \right) \left(-\frac{X_{LB} V_{DCO} \text{sen}(\psi_o)}{B X_{SDT}} \right) + \left(\frac{X_q^2 I_{tLqo}}{V_{to}} \right) \left(\frac{X_{LB} V_{DCO} \cos(\psi_o)}{A X_{SDT}} \right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
K_{Vdc} &= \left(\frac{X_d'^2 I_{tLd0} - X_d' E'_{q0}}{V_{t0}} \right) \left(-\frac{X_{LB} c_o \text{sen}(\psi_o)}{B X_{SDT}} \right) + \left(\frac{X_q^2 I_{tLq0}}{V_{t0}} \right) \left(\frac{X_{LB} c_o \cos(\psi_o)}{A X_{SDT}} \right) \\
K_{V\psi} &= \left(\frac{X_d'^2 I_{tLd0} - X_d' E'_{q0}}{V_{t0}} \right) \left(-\frac{X_{LB} c_o V_{DCO} \cos(\psi_o)}{B X_{SDT}} \right) + \left(\frac{X_q^2 I_{tLq0}}{V_{t0}} \right) \left(-\frac{X_{LB} c_o V_{DCO} \text{sen}(\psi_o)}{A X_{SDT}} \right) \\
K_{7S} &= \left(\frac{c_o}{C_{DC}} \cos(\psi_o) \right) \left(-\frac{X_d' + X_{tL}}{X_{SDT}} \right) \left(\frac{V_B \text{sen}(\delta)}{B} \right) + \left(\frac{c_o}{C_{DC}} \text{sen}(\psi_o) \right) \left(-\frac{X_q + X_{tL}}{X_{SDT}} \right) \left(\frac{V_B \cos(\delta)}{A} \right) \\
K_{8S} &= \left(\frac{c_o}{C_{DC}} \cos(\psi_o) \right) \left(\frac{1}{X_{SDT}} + \left(-\frac{X_d' + X_{tL}}{X_{SDT}} \right) \left(\frac{1 + \frac{X_{LB}}{X_{SDT}}}{B} \right) \right) \\
K_{Dc} &= \left(\frac{c_o}{C_{DC}} \cos(\psi_o) \right) \left(\left(-\frac{V_{DCO} \text{sen}(\psi_o)}{X_{SDT}} \right) + \left(-\frac{X_d' + X_{tL}}{X_{SDT}} \right) \left(-\frac{X_{LB} V_{DCO} \text{sen}(\psi_o)}{B X_{SDT}} \right) \right) \\
&\quad + \left(\frac{c_o}{C_{DC}} \text{sen}(\psi_o) \right) \left(\left(\frac{V_{DCO} \cos(\psi_o)}{X_{SDT}} \right) + \left(-\frac{X_q + X_{tL}}{X_{SDT}} \right) \left(\frac{X_{LB} V_{DCO} \cos(\psi_o)}{A X_{SDT}} \right) \right) \\
K_{Ddc} &= \left(\frac{c_o}{C_{DC}} \cos(\psi_o) \right) \left(\left(-\frac{c_o \text{sen}(\psi_o)}{X_{SDT}} \right) + \left(-\frac{X_d' + X_{tL}}{X_{SDT}} \right) \left(-\frac{X_{LB} c_o \text{sen}(\psi_o)}{B X_{SDT}} \right) \right) \\
&\quad + \left(\frac{c_o}{C_{DC}} \text{sen}(\psi_o) \right) \left(\left(\frac{c_o \cos(\psi_o)}{X_{SDT}} \right) + \left(-\frac{X_q + X_{tL}}{X_{SDT}} \right) \left(\frac{X_{LB} c_o \cos(\psi_o)}{A X_{SDT}} \right) \right) \\
K_{D\psi} &= \left(\frac{c_o}{C_{DC}} \cos(\psi_o) \right) \left(\left(-\frac{c_o V_{DCO} \cos(\psi_o)}{X_{SDT}} \right) + \left(-\frac{X_d' + X_{tL}}{X_{SDT}} \right) \left(-\frac{X_{LB} c_o V_{DCO} \cos(\psi_o)}{B X_{SDT}} \right) \right) \\
&\quad + \left(\frac{c_o}{C_{DC}} \text{sen}(\psi_o) \right) \left(\left(-\frac{c_o V_{DCO} \text{sen}(\psi_o)}{X_{SDT}} \right) + \left(-\frac{X_q + X_{tL}}{X_{SDT}} \right) \left(-\frac{X_{LB} c_o V_{DCO} \text{sen}(\psi_o)}{A X_{SDT}} \right) \right)
\end{aligned}$$