



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

PLANIFICACIÓN DE LA EXPANSIÓN DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICO CONSIDERANDO EQUIPOS FACTS

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN
CIENCIAS DE LA INGENIERÍA, MENCIÓN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA

JUAN PABLO RODRIGO MALDONADO GUZMÁN

**PROFESOR GUIA:
LUIS VARGAS DÍAZ**

**MIEMBRO DE LA COMISION:
LUIS MORÁN TAMAYO
CLAUDIA RAHMANN ZUÑIGA**

**SANTIAGO DE CHILE
MARZO 2014**

RESUMEN DE TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN
CIENCIAS DE LA INGENIERÍA, MENCIÓN INGENIERÍA ELÉCTRICA
POR: JUAN PABLO RORIGO MALDONADO GUZMÁN

FECHA: 13/03/2014

PROF. GUÍA: SR. LUIS VARGAS DÍAZ

“PLANIFICACIÓN DE LA EXPANSIÓN DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN
ELÉCTRICO CONSIDERANDO EQUIPOS FACTS”

El dinamismo asociado al desarrollo de la generación Chile y el incremento constante de la demanda, ponen un acento especial en la tarea de planificar la expansión del sistema de transmisión, dado que las redes eléctricas centrales (SIC y SING) deben ser capaces de cumplir con su tarea de transportar la energía desde donde se producirá hasta donde se consumirá en el horizonte planificado, de forma técnica y económicamente eficiente.

Entendiendo que las inversiones en el ámbito de la red principal de transmisión son fuertes y los esfuerzos requeridos para la obtención de servidumbres y las consiguientes compensaciones son complejos, en este trabajo se propone la inclusión de equipos FACTS en la planificación del sistema, de modo que esta inversión sea más flexible e implique un menor costo en elementos tradicionales de expansión (líneas y transformadores).

La solución del problema de planificación de la expansión para un horizonte fijo (problema estático) se obtiene mediante un algoritmo genético propuesto sobre un modelo lineal de la red eléctrica en corriente continua con re-despacho de carga y que considera pérdidas eléctricas.

La validación de este algoritmo se hace por medio de dos sistemas de pequeño y mediano tamaño ampliamente estudiados en la bibliografía internacional. Finalmente, se aplica el algoritmo propuesto sobre un modelo de 50 barras del Sistema Interconectado Central proyectado en demanda y generación al año 2022.

Los resultados obtenidos tanto en la validación como en la aplicación sobre el modelo del SIC muestran la efectividad del algoritmo para encontrar una solución óptima (conocida en el primer caso), y que la utilización de equipos FACTS permite determinar planes de inversión en líneas, e incluso total, de menor costo, tanto en el caso con como sin pérdidas.

En este sentido, el principal aporte de este trabajo es la integración de las pérdidas y equipos FACTS a los elementos y modelos tradicionales del problema de planificación de la expansión del sistema de transmisión.

*A la vida por este desafío
a mi familia por su apoyo
a mis amigos por su compañía.
En estas páginas hay un poco
de cada uno y cada una*

Agradecimientos

Primero que todo me gustaría agradecer a mi profesor guía Luís Vargas, por su apoyo en el desarrollo de este trabajo, pero más por su comprensión y paciencia en este largo camino. Junto a él, quiero agradecer también a la profesora Claudia Rahmann y el profesor Luís Morán, por su tiempo y correcciones que realizaron a mi trabajo.

Recordar también a gente que me ayudo a entender diferentes temas de esta tesis y que con sus sugerencias me sacaron de más de un apuro como el profesor Marcelo Cortés, Felipe Valdez, Eduardo Zamora, entre otros, que espero me disculpen si no los he mencionado.

A Esteban, por acompañarme y escucharme tantas veces en este periplo, a Claudio por las tardes infinitas de estudio, juegos y anime, a Rodrigo que con su humor me enseñó a enfrentar las cosas con más alegría y energía, a Ricardo por sus consejos y particular forma de apoyarme, y a Cristóbal, que entre chistes y bromas también me sacó sonrisas cuando el trabajo se sentía más difícil.

Agradecer a Héctor por su apoyo, que incluso escribiendo me emociona. Por levantarme, y acompañarme antes, ahora y siempre. A la Gladys, que sin la ayuda de ella y sus santos quizá no estaría ahora escribiendo esto. En general, a toda mi familia, quienes en distintos momentos y situaciones han estado presentes para entregarme su cariño. A mis queridos cachorros por su compañía incondicional.

A todos aquellos que se me quedan en el tintero, las más infinitas gracias por el aporte que significaron en distintos instantes de este largo recorrido.

Por último, gracias a mi padres. Ellos fueron más que espectadores, protagonistas de este trabajo. Fueron, con todo su cariño, retos, apoyo, fuerza, confianza, sacrificios y amor los arquitectos de quien soy ahora y me dieron las capacidades que hoy se traducen en un logro que va más allá de cualquier trabajo de tesis o título universitario, es una recompensa a los 27 años que han dedicado gran parte de sus vidas acompañándome en la mía.

Esto es para ustedes. Los amo.

Tabla de contenido

Tabla de contenido	IV
Índice de tablas	VII
Índice de figuras	VIII
Capítulo 1 Introducción.....	1
1.1 Motivación.....	1
1.2 Alcances	2
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo general	3
1.3.2 Objetivos específicos	3
1.4 Estructura de la tesis	4
Capítulo 2 Antecedentes generales	6
2.1 Planificación del sistema de transmisión en Chile	6
2.1.1 Proyección de la demanda.....	6
2.1.2 Proyección de la generación.....	7
2.2 Norma técnica de seguridad y calidad de servicio de Chile.....	9
2.3 Equipos de compensación flexibles en sistemas de corriente alterna FACTS.....	11
2.3.1 Compensadores en paralelo.....	12
2.3.2 Compensadores en serie.....	14
2.3.3 Otros equipos de compensación	15
Capítulo 3 Definiciones y estado del arte.....	20
3.1 Modelación de la red eléctrica.....	20
3.1.1 Modelo DC.....	21
3.2 Generación en TNEP	24
3.3 Demanda en TNEP	26
3.4 Pérdidas eléctricas en TNEP	27
3.5 Equipos FACTS en TNEP.....	28
3.6 Algoritmo genético para planificación de la expansión del sistema de transmisión ..	30
Capítulo 4 Metodología propuesta.....	34
4.1 Modelo de la red eléctrica para TNEP.....	34
4.2 Metaheurística propuesta	35

4.2.1	Función de población inicial (<i>pob_inicialfinal</i>)	36
4.2.2	Función de evaluación (<i>evaluacion</i>)	38
4.2.3	Función de fitness (<i>fitness</i>)	38
4.2.4	Función de selección (<i>seleccion</i>)	38
4.2.5	Función de recombinación y mutación (<i>crossmuta</i>)	39
4.2.6	Funciones de flujo de potencia (<i>flujodc – flujodcloss</i>)	40
4.3	Validación del algoritmo genético propuesto	41
4.3.1	Algoritmo constructivo para TNEP	41
4.3.2	Sistemas de validación	42
4.3.3	Conclusiones sobre la validación del algoritmo propuesto	47
4.4	Resolución del problema de TNEP considerando equipos FACTS	48
4.4.1	Modelo de la red eléctrica con equipo de compensación serie	49
4.4.2	Algoritmo genético considerando equipos FACTS como alternativas para la expansión	50
4.4.3	Aplicación del algoritmo propuesto en los sistemas de prueba considerando equipos FACTS	52
4.4.4	Conclusiones sobre la utilización de equipos FACTS en los sistemas de prueba	55
4.5	Comentarios sobre el desempeño del algoritmo propuesto	56
Capítulo 5 Aplicación en el modelo reducido del SIC		58
5.1	Modelo reducido del Sistema Interconectado Central	58
5.1.1	Centrales generadoras	58
5.1.2	Sistema de transmisión	59
5.1.3	Proyección de la demanda	60
5.2	Aplicación del algoritmo al modelo reducido del SIC	60
5.2.1	Análisis de sensibilidad del algoritmo	62
5.2.2	Planes de expansión para sistema reducido del SIC	76
5.3	Comentarios sobre la aplicación al modelo reducido del SIC	90
Capítulo 6 Conclusiones		93
6.1	Conclusiones sobre el trabajo de tesis	93
6.2	Trabajos futuros	97
Anexo A Datos de los sistemas de validación		98

A.1 Sistema de 6 barras de Garver.....	98
A.2 Sistema IEEE 24 Bus.....	99
Anexo B Datos de flujo de potencia de los planes de expansión óptimos para los sistemas de validación	101
Anexo C Diagramas unilineales de las expansiones de los sistemas de prueba.....	105
Anexo D Datos, diagramas unilineales y resultados obtenidos para el modelo reducido SIC	108
D.1 Datos del modelo reducido de 50 barras del SIC	108
D.2 Datos del modelo reducido de 50 barras del SIC	112
D.3 Resultados para el modelo reducido de 50 barras del SIC.....	114
Bibliografía.....	123

Índice de tablas

Tabla 1: Proyección de demanda total del SIC periodo 2012 - 2027	7
Tabla 2: Obras de generación en construcción.....	8
Tabla 3: Plan de Obras de generación recomendado	8
Tabla 6: Rangos de tensión en barras del sistema.	9
Tabla 7: Rangos de frecuencia permitidos para estado normal y de alerta.....	10
Tabla 8: Resultados obtenidos con los algoritmos propuestos para el sistema de Garver	43
Tabla 9: Resultados obtenidos con los algoritmos propuestos para el sistema IEEE 24 bus....	45
Tabla 10: Resultados obtenidos con algoritmo genético considerando equipos FACTS para el sistema de Garver.....	53
Tabla 11: Resultados obtenidos con los algoritmos propuestos considerando FACTS para el sistema IEEE 24 bus	54
Tabla 12: Tiempos por función del algoritmo propuesto.....	65
Tabla 13: Generación promedio de detención por escenario considerando población (nopb=150, kstop=0,1*Kmax).....	66
Tabla 14: Costos de inversión, tiempo y pérdidas de planes de expansión obtenidos para el modelo reducido del SIC.....	82
Tabla 15: Valores modulares de línea y transformadores.....	88
Tabla A 1: Datos de líneas del sistema de Garver	98
Tabla A 2: Datos de generación y demanda del sistema de Garver	98
Tabla A 3: Datos de línea sistema IEEE 24 Bus	99
Tabla A 4: Datos de generación y demanda del sistema IEEE 24 Bus.....	100
Tabla B 1: Flujo de potencia de planes de expansión óptimos para el sistema de Garver.....	101
Tabla B 2: Flujo de potencia de planes de expansión óptimos para el sistema IEEE-24	102
Tabla D 1: Datos de generación y demanda del sistema reducido de 50 barras del SIC.....	108
Tabla D 2: Datos de líneas y transformadores del sistema reducido de 50 barras del SIC.....	109
Tabla D 3: Planes óptimos de expansión modelo SIC – 50 barras, para vector de costos A..	114
Tabla D 4: Flujo de potencia de planes de expansión óptimos para el sistema SIC-50	116
Tabla D 5: Planes óptimos de expansión modelo SIC – 50 barras, para vector de costos B..	121

Índice de ilustraciones

Figura 1: Sistema de dos máquinas con compensador reactivo ideal en el punto medio (a), características de potencia activa y reactiva v/s ángulo (b).....	13
Figura 2: Múltiples compensadores en paralelo para una línea.....	14
Figura 3: Sistema de dos máquinas con capacitor en serie (a) y características de potencia activa y reactiva v/s ángulo (b).....	15
Figura 4: Sistema básico de dos máquinas con regulador de ángulo de fase (a) y potencia transmitida versus ángulo (b).	16
Figura 5: Característica de transmisión de potencia versus ángulo del elevador de tensión en cuadratura	17
Figura 6: Modelo de implementación de UPFC por medio de dos convertidores con fuente de voltaje (a) e implementación de IPFC con n convertidores (b).....	19
Figura 7: Diagrama de bloques del algoritmo genético propuesto	36
Figura 8: Diagrama unilineal del sistema de Garver	43
Figura 9: Diagrama unilineal del plan óptimo de expansión del sistema de Garver sin pérdidas	44
Figura 10: Diagrama unilineal IEEE 24 Barras.....	47
Figura 11: Diagrama unilineal sistema reducido del SIC de 50 barras.....	61
Figura 12: Tiempo versus npob y kmax por escenario	63
Figura 13: Esquema del algoritmo genético propuesto con y sin FACTS	64
Figura 14: Tiempo versus número de equipos FACTS.....	65
Figura 15: Valor de inversión promedio y mínimo versus tiempo para variaciones del tamaño de la población (npob) y el máximo de generaciones (kmax).....	68
Figura 16: Valor promedio de inversión versus tasa de recombinación para los casos sin y con FACTS	70
Figura 17: Valor mínimo de inversión versus tasa de recombinación para los casos sin y con FACTS	71
Figura 18: Valor promedio de inversión versus tasa de mutación para los casos sin y con FACTS	72
Figura 19: Valor mínimo de inversión versus tasa de mutación para los casos sin y con FACTS	73
Figura 20: Inversión promedio total, en FACTS, líneas y mínima versus número de equipos FACTS	74

Figura 21: Dispersión de valor de inversión en equipos FACTS (nfacts=0.2)	75
Figura 22: Inversión en líneas de la inversión total mínima vs número de equipos FACTS....	76
Figura 23: Flujo de potencia modelo reducido del SIC sin expansión y sin pérdidas.....	77
Figura 24: Diagramas unilineales de los planes óptimos de expansión sin (izquierda) y con (derecha) FACTS para el sistema reducido del SIC modelado sin pérdidas	80
Figura 25: Diagramas unilineales de los planes óptimos de expansión sin (izquierda) y con (derecha) FACTS para el sistema reducido del SIC modelado con pérdidas	81
Figura 26: Diagramas unilineales de los planes óptimos de expansión sin (izquierda) y con (derecha) FACTS, sin pérdidas, para el vector de costos de inversión B	86
Figura 27: Diagramas unilineales de los planes óptimos de expansión sin (izquierda) y con (derecha) FACTS, con pérdidas, para el vector de costos de inversión B	87
Figura C 1: Diagrama unilineal de expansión del sistema de Garver con pérdidas	105
Figura C 2: Diagrama unilineal de expansión del sistema IEEE 24 Bus sin pérdidas	106
Figura C 3: Diagrama unilineal de expansión del sistema IEEE 24 Bus con pérdidas	107
Figura D 1: Diagrama unilineal ampliado del modelo reducido de 50 barras del SIC (sector norte-centro)	112
Figura D 2: Diagrama unilineal ampliado del modelo reducido de 50 barras del SIC (sector centro-sur)	113

Capítulo 1 Introducción

1.1 Motivación

A medida que el país va creciendo tanto económica como industrialmente, los requerimientos por energía también lo hacen. Chile tiene, hasta ahora, una correlación en el crecimiento del consumo eléctrico con el del PIB, estando el primero por sobre el último, de forma regular, en 1 o 2 puntos porcentuales, en los últimos años [57].

En consecuencia, un aumento del consumo eléctrico viene de la mano con un incremento en la generación, y por consiguiente, en la exigencia al sistema de transmisión. Mientras que la demanda aumenta y nuevas centrales generadoras aparecen con cierta dificultad a causa de diversos factores (costos de inversión, medio ambientales, sociales, políticos), la expansión del sistema de transmisión no aparece como un tema libre de complicaciones.

El costo de las líneas de transmisión y las dificultades que se encuentran para construir nuevas líneas, pueden a menudo limitar la capacidad de transmisión disponible. Por otra parte, mientras la transferencia de potencia aumenta, el sistema se vuelve más complejo de operar y las contingencias más difíciles de manejar. Sumado a lo anterior, la falta de planificación a largo plazo, y la necesidad de brindar libre acceso a todos los actores del sector, van creando una tendencia hacia un sistema menos seguro, pudiendo traducirse en la entrega de un producto eléctrico de menor calidad.

Sin ser una solución definitiva para todos estos problemas, los equipos FACTS representan una tecnología capaz de aliviar algunas de estas dificultades, facilitando un mejor uso de los sistemas de transmisión actuales y aquellos nuevos que se deseen instalar, y mejorando la confiabilidad de la red. La posibilidad de controlar la corriente que circula por los circuitos, a un costo razonable, permite un aumento en la capacidad utilizable de las líneas existentes. Esta oportunidad surge gracias a la capacidad que poseen los dispositivos FACTS de manejar los parámetros que gobiernan la operación de los sistemas de transmisión, como la impedancia, la corriente, el voltaje y el ángulo de fase. De esta manera, proveyendo mayor flexibilidad, los equipos FACTS pueden permitir a las líneas transportar potencia cercana a sus límites térmicos [80].

La inclusión de este tipo de elementos dentro de un sistema de transmisión, de modo que sea de real utilidad y no solo una mejora aislada, debe ser considerada dentro de un problema más amplio como lo es la planificación de la red eléctrica.

El problema de la planificación de la expansión del sistema de transmisión (en inglés *Transmission Network Expansion Planning*, TNEP) tiene el objetivo de determinar qué, cuándo y dónde construir y/o implementar los elementos que permitan un funcionamiento económica y

confiablemente óptimo. Mientras que la búsqueda del qué y el dónde son comunes en todo tipo de análisis, el cuándo se remite al problema de TNEP de tipo dinámico, es decir, cuando existe un horizonte de planificación y se estudian los cambios periodo a periodo (por ejemplo, año a año). En cambio, si se habla de un problema estático, será solo un periodo el que se tome en consideración.

Sin duda, para que exista un óptimo funcionamiento del sistema eléctrico en general, sin grandes costos tanto para generadores como clientes y distribuidores, los elementos de transmisión toman un papel central, razón por la que éste es un tema ampliamente estudiado, para el cual una vasta gama de algoritmos se ha planteado.

Entre los distintos métodos que buscan una solución óptima al TNEP se pueden mencionar Algoritmos Genéticos (GA), Búsqueda Tabú (TS), Simulated Annealing (SA), Estrategias Evolutivas (ES), entre otros. Muchos de estos copian la lógica de distintos procesos y/o comportamientos de la naturaleza, y son implementados para encontrar soluciones a diversos problemas en muchos campos de la ingeniería y ciencia en general.

Regularmente, todo algoritmo para ser llevado a cabo se implementa con la ayuda de herramientas computacionales, dado que el procesamiento de estos requiere un tiempo considerable, dependiendo del tamaño del problema que se tiene en manos, es decir, la cantidad de variables que son analizadas. Sin duda, para el caso del TNEP, el tamaño representa un punto álgido. La amplitud de los sistemas eléctricos, su continuo crecimiento, sumándose nuevos centros de generación y demanda, se traduce en una gran cantidad de lugares y elementos que pueden ser utilizados para lograr el objetivo antes planteado. Encontrar un óptimo entre todas las soluciones posibles, solo para un periodo, ya es bastante complejo y exigente en su obtención. Más aún, si se considera el caso de un análisis dinámico y su cantidad de variables, ya son palabras mayores. Es por esto que el método que se implemente para resolver el problema de TNEP debe ser se fácil aplicación y óptimo en la búsqueda de una solución, para poder destacar por sobre otras metodologías.

En este trabajo, se busca determinar una expansión óptima del Sistema Interconectado Central (SIC) proyectado al año 2022 [57], considerando como alternativas de expansión: líneas de transmisión, transformadores y equipos FACTS, con un algoritmo genético. De esta manera, se presentarán las diferencias en las inversiones cuando se utilizan equipos FACTS y cuando estos no son considerados.

1.2 Alcances

En este trabajo se presenta un algoritmo genético para determinar soluciones óptimas del problema estático de TNEP con un modelo DC de la red, para dos sistemas de prueba de los cuales se conocen resultados óptimos, y para un modelo reducido del SIC proyectado al año 2022.

La diferencia esencial de este trabajo respecto de la literatura correspondiente al problema de TNEP es la consideración conjunta de equipos FACTS y de elementos tradicionales (líneas y transformadores) para determinar el plan óptimo de expansión, junto con un modelo DC de la red considerando pérdidas eléctricas.

Dentro de todos los equipos FACTS disponibles se modelan los del tipo compensación en serie. Esto se debe a la ventaja que presentan en el aumento de la capacidad de transmisión de una línea (hasta su límite térmico) directamente, por sobre los equipos de compensación en paralelo, que tienen mayor influencia en el control de tensión [80]. Otro tipo de dispositivos, como equipos de compensación angular, presentan modelos que son equivalentes al modelo de los equipos en serie, mientras que equipos más complejos como compensadores combinados (UPFC e IPFC) quedan fuera del alcance, dado que son alternativas con mayor funcionalidad que los equipos en serie pero que no poseen características superiores en el modelo que se utiliza.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

El objetivo general de este trabajo es desarrollar una metodología que permita planificar la expansión del sistema de transmisión eléctrico para un periodo determinado considerando equipos FACTS y un modelo lineal de la red que incluya las pérdidas eléctricas en las líneas de transmisión.

1.3.2 Objetivos específicos

- Realizar una revisión bibliográfica de los métodos existentes para resolver el problema de TNEP, además de conocer en profundidad los distintos equipos FACTS y sus capacidades.
- Estudiar la modelación del sistema de transmisión eléctrico, poniendo énfasis en la implementación de un modelo en corriente continua con re-despacho de generación, desprendimiento de carga y pérdidas eléctricas de las líneas.
- Aplicar un algoritmo genético utilizando el programa MATLAB ® para resolver el problema estático de TNEP con y sin equipos FACTS, para el tipo de modelo que se implemente del sistema eléctrico, y así obtener un plan de expansión óptimo o cercano al óptimo para los sistemas de prueba.

- Generar un modelo reducido del Sistema Interconectado Central de 50 barras proyectado para el año 2022.
- Implementar el algoritmo propuesto en el modelo del SIC.
- Determinar un plan de expansión para el modelo reducido del SIC, tanto con equipos FACTS, como sin ellos.
- Analizar la conveniencia de la utilización de equipos FACTS en el problema de TNEP desde el punto de vista de la inversión.

1.4 Estructura de la tesis

Este trabajo de tesis cuenta con 6 capítulos, más 6 apartados de anexos. El capítulo 1 presenta la introducción al trabajo, en donde se especifica la motivación y los objetivos y alcances que lo delimitan, además de la estructura del documento que aquí se especifica.

En el capítulo 2, se presentan antecedentes generales que dan un marco y contexto al tema que se está tratando. Aquí se habla de cómo se realiza el proceso de planificación de la expansión del sistema de transmisión en Chile y como afectan las energías renovables no convencionales a los sistemas eléctricos. Además se presentan una descripción de los equipos FACTS y se especifican cada uno de los tipos de compensadores y sus fundamentos teóricos

El capítulo 3 explica en qué consiste el problema de TNEP, considerando los distintos elementos de la red eléctrica que pueden ser modelados dentro del análisis, además de los enfoques que se le puede dar en el estudio mismo del problema. Junto a esto, se presenta un estudio bibliográfico de los distintos algoritmos existentes para resolver el problema de TNEP.

El capítulo 4 describe el algoritmo propuesto para resolver el problema TNEP, además del modelo utilizado para representar a la red. Dentro de este apartado se muestra la aplicación de este algoritmo, su validación por medio de sistemas de prueba y la comparación con resultados obtenidos desde la bibliografía. Por otra parte, se aplica a los mismos sistemas de prueba pero considerando equipos FACTS (describiendo también los cambios realizados sobre el algoritmo para considerar estos equipos dentro del TNEP y la modelación de la red).

Los resultados obtenidos para el modelo reducido del Sistema Interconectado Central, SIC, se encuentran en el capítulo 5, junto a un análisis del desempeño del algoritmo al ser aplicado a este sistema.

Por último, el capítulo 6 presenta las conclusiones de este trabajo, y los anexos contienen los datos de los sistemas utilizados, además de los resultados de flujo de potencia obtenidos para los sistemas de prueba, los diagramas unilineales de las soluciones óptimas encontradas para estos sistemas y los planes de expansión determinados para el SIC.

Capítulo 2 Antecedentes generales

2.1 Planificación del sistema de transmisión en Chile

El proceso de determinar cómo, cuándo y dónde se deben sumar elementos a la red en el sistema de transmisión troncal en Chile es dirigido y coordinado, de acuerdo a la Ley General de Servicios Eléctricos [55], por la Comisión Nacional de Energía. Este estudio se lleva a cabo cada cuatro años, y determina los principales refuerzos que requiere el sistema de transmisión troncal, agregando y cambiando líneas, y transformadores.

La expansión del sistema de transmisión se hace en conjunto con la expansión del parque generador, de forma tal que para distintas alternativas de centrales y líneas, se determina la suma de los costos de inversión, operación y falla. Así, se desarrolla un proceso iterativo de comparación de planes de expansión por medio de la minimización de los costos mencionados, sujeto a restricciones operativas del sistema.

Previo a esto, se debe determinar la demanda futura que enfrentará el sistema en el horizonte de expansión, base y motor principal de la expansión.

2.1.1 Proyección de la demanda

Para determinar el plan de expansión del sistema de transmisión, se necesita la demanda a la cual estará sujeto durante el periodo de planificación el sistema en estudio, que en este caso es el Sistema Interconectado Central. En consideración de esta necesidad, es que se utiliza la proyección de la demanda del SIC presente en la “Revisión del Estudio de transmisión troncal” (ETT) preparado por la Dirección de Peajes del CDEC - SIC, del 1 de octubre de 2012 [56].

En el ETT, para obtener la proyección de la demanda para el periodo 2012 – 2027 se utilizan las tasas de crecimiento zonales definidas en el Informe Técnico de Precios de Nudo Definitivo de la CNE de abril de 2012 [57]. Además, se ajustan los consumos por barra agregando proyectos que se encuentran en desarrollo.

Es importante mencionar que el informe presentado por la CNE considera un horizonte de proyección hasta el año 2022, por lo que para los años restantes (hasta 2027) se repiten las tasas de crecimiento del último año presentado.

En la tabla 1 se pueden observar las demandas proyectadas para el periodo 2012-2027, junto con las tasas de crecimiento esperado.

Tabla 1: Proyección de demanda total del SIC periodo 2012 - 2027

Año	Demanda (GWh)	Crecimiento (%)
2012	46.219	6,15
2013	49.062	6,01
2014	52.011	5,87
2015	55.065	5,77
2016	58.245	5,53
2017	61.469	5,12
2018	64.619	5,03
2019	67.868	5,03
2020	71.283	4,94
2021	74.803	4,95
2022	78.506	4,95
2023	82.396	4,96
2024	86.480	4,96
2025	90.769	4,96
2026	95.273	4,96
2027	100.003	4,96

2.1.2 Proyección de la generación

Respecto del plan de obras de generación para el periodo de estudio, el Estudio de Transmisión Troncal, tal como en el caso de la proyección de la demanda, considera la proyección de la generación realizada por la CNE en el Informe de Precio de Nudo. Éste considera las obras en construcción y recomienda la construcción de centrales. En las tablas 2 y 3 se pueden observar el plan de obras para cada caso.

Para los años de diferencia entre el horizonte del informe de la CNE y el ETT, se adicionan tres centrales para entrar en funcionamiento en el periodo 2023 – 2027. Estas centrales son escogidas de manera tal que mantengan los costos marginales sin grandes variaciones en el SIC luego del año 2022: Hidroeléctrica XIV Región (400 MW) entrando en enero 2023 y centrales a Carbón Ancoa (325 MW) y Maitencillo (370 MW) en enero 2027.

Tabla 2: Obras de generación en construcción

Fecha de Entrada		Obras en construcción de generación	Potencia [MW]	Barra
Mes	Año			
Mayo	2012	Viñales	32	Itahue 154
Julio	2012	Santa María	343	Charrúa 220
Septiembre	2012	San Andrés	40	Tinguiririca 154
Septiembre	2012	Providencia	13	Maule 154
Septiembre	2012	Bocamina 02	342	Hualpén 220
Noviembre	2012	Talinay Oriente	99	Los Vilos 220
Diciembre	2012	Puleifu	9,4	Osorno 066
Marzo	2013	Campinche	242	Nogales 220
Julio	2013	El Paso	40	Tinguiririca 154
Noviembre	2013	El Arrayán	115	Pan de Azúcar 220
Diciembre	2013	Angostura	316	Mulchén 220
Febrero	2017	San Pedro	144	Ciruelos 220

En general, son varios los criterios utilizados por la CNE para determinar las obras recomendadas, entre estos, la utilización de diversas fuentes energéticas y que fueran técnica y económicamente factibles de ser desarrolladas en el horizonte de planificación. Especial énfasis se pone en las centrales eólicas y geotérmicas que aportan 400 MW y 160 MW de potencia instalada, respectivamente, en virtud de los requerimientos que dispone la ley N°20.257, que obliga a los comercializadores de energía a hacer retiros de 10% en energías renovables no convencionales de su demanda total (en caso de la capacidad del sistema sea mayor a 200 MW).

Tabla 3: Plan de Obras de generación recomendado

Fecha de Entrada		Centrales	Potencia [MW]	Barra
Mes	Año			
Abril	2014	Hidroeléctrica VII Región 01	30	Ancoa 220
Julio	2014	Hidroeléctrica VII Región 02	20	Ancoa 220
Julio	2014	Central Des. For. VII Región 01	10	Itahue 154
Julio	2014	Eólica IV Región 01	50	Pan de Azúcar 110
Abril	2015	Hidroeléctrica VIII Región 02	20	Charrúa 220
Enero	2016	Eólica Concepción 01	50	Concepción 220
Enero	2016	Geotérmica Calabozo 01	40	Calabozo 220
Marzo	2016	Central Des. For. VIII Región 01	9	Arauco 066
Abril	2016	Carbón VIII Región 01	343	Charrúa 220
Abril	2016	Hidroeléctrica RM 01	256	Los Almendros 220
Junio	2016	Hidroeléctrica VIII Región 01	136	Ancoa 220
Julio	2016	Taltal CC GNL	120	Paposo 220
Octubre	2016	Hidroeléctrica RM 02	275	Los Almendros 220
Octubre	2017	Geotérmica Calabozo 02	40	Calabozo 220
Diciembre	2017	Eólica IV Región 02	50	Pan de Azúcar 110
Marzo	2018	Quintero CC FA GNL	35	San Luis 220

Marzo	2018	Quintero CC GNL	120	San Luis 220
Junio	2018	Geotérmica Potrerillos 01	40	Colbún 220
Agosto	2018	Eólica IV Región 03	50	Los Vilos 220
Septiembre	2018	Central Des. For. VII Región 02	15	Itahue 154
Octubre	2018	Central Des. For. VII Región 03	10	Itahue 154
Diciembre	2018	Eólica Concepción 02	50	Concepción 220
Mayo	2019	Carbón Maitencillo 01	342	Maitencillo 220
Agosto	2019	Carbón Maitencillo 02	135	Maitencillo 220
Octubre	2019	Hidroeléctrica VII Región 03	20	Ancoa 220
Diciembre	2019	Eólica IV Región 04	50	Los Vilos 220
Marzo	2020	Eólica IV Región 05	50	Pan de Azúcar 110
Marzo	2020	Carbón Pan de Azúcar 01	250	Pan de Azúcar 220
Octubre	2020	Eólica Concepción 03	50	Concepción 220
Enero	2021	Hidroeléctrica VIII Región 03	20	Charrúa 220
Enero	2021	Geotérmica Calabozo 03	40	Calabozo 220
Abril	2021	Módulo 01	660	Lo Aguirre 500
Marzo	2022	Módulo 02	500	Lo Aguirre 500
Diciembre	2022	Módulo 04	770	Lo Aguirre 500

2.2 Norma técnica de seguridad y calidad de servicio de Chile

La NTSyCS indica los límites permitidos para tensión, frecuencia, recuperación dinámica, etc. que deben cumplir instalaciones de generación y transmisión durante la operación normal del sistema y ante distintos escenarios de contingencias (entre muchos otros temas). El no cumplimiento de estos requerimientos, pueden significar multas para las centrales, e incluso daños a los usuarios o al sistema mismo.

A continuación se presentan algunos de estos estándares de funcionamiento que resultan relevantes para la operación del sistema:

- La magnitud de tensión en las barras del sistema, para sus diferentes estados, deberán estar comprendidas entre:

Tabla 4: Rangos de tensión en barras del sistema.

Nivel de tensión	Estado Normal		Estado alerta		Estado emergencia	
	Límite inferior	Límite superior	Límite inferior	Límite superior	Límite inferior	Límite superior
$V \geq 500$ [kV]	0,97	1,03	0,96	1,04	0,95	1,05
$500 > V \geq 200$ [kV]	0,95	1,05	0,93	1,07	0,90	1,10
$V \leq 200$ [kV]	0,93	1,07	0,91	1,09	0,90	1,10

- La frecuencia nominal del sistema es de 50 Hz, pero se aceptarán en régimen permanente para estado normal y de alerta que la frecuencia, medida en intervalos de 10 segundos en un periodo de 7 días seguidos, se encuentre en los siguientes rangos:

Tabla 5: Rangos de frecuencia permitidos para estado normal y de alerta.

Aporte Hidroeléctricas	99% del periodo (<60%) 97% del periodo (>60%)		0,5% del periodo (>60%) 1,5% del periodo (<60%)		0,5% del periodo (>60%) 1,5% del periodo (<60%)	
	Límite inferior	Límite superior	Límite inferior	Límite superior	Límite inferior	Límite superior
> 60%	49,8	50,2	49,3	49,8	50,3	50,7
< 60%	49,8	50,2	49,3	49,8	50,3	50,7

- Para estado de emergencia se aceptarán variaciones de un $\pm 1,0\%$, es decir, un valor mínimo de 49,50 Hz y máximo de 50,50 Hz, durante el 99% del tiempo de cualquier periodo de control.
- Estando en estado normal, al ocurrir una contingencia hasta severidad 7¹, la tensión no deberá descender debajo de 0,70 p.u. luego de 10 ms despejada la contingencia. Tampoco podrá permanecer debajo de 0,80 p.u. por más de 1 segundo. La tensión en todas las barras deberá entrar a una banda de tolerancia de 10% en no más de 20 segundos.
- En contingencia simple, la frecuencia puede bajar hasta 48,30 Hz en el sistema troncal, mientras que podrá estar por debajo de este valor en sistemas de sub-transmisión, por no más de 200 ms.
- **Fluctuaciones de tensión.** Se clasifican en dos categorías de acuerdo a su duración: corta duración, desde 10 milisegundos hasta un minuto y larga duración, superiores a un minuto. Las fluctuaciones de corta duración se clasifican en:
 - Instantáneas, de duración típica entre 10 milisegundos y 600 milisegundos y de magnitud típica entre 10% y 92,5% de la tensión nominal y entre 107,5% y 180%.
 - Momentáneas, de duración típica entre 600 milisegundos y 3 segundos y de magnitud típica entre 10% y 92,5% de la tensión nominal y entre 107,5% y 140%.
 - Temporales, de duración típica entre 3 segundos y un minuto y de magnitud típica entre 10% y 92,5% de la tensión nominal y entre 107,5% y 120%.

Las fluctuaciones de larga duración se clasifican en:

¹ La norma técnica define una clasificación por medio de severidades para definir la gravedad de una contingencia.

- Caída de tensión de duración típica mayor que un minuto y de magnitud típica entre 80% y 92,5% de la tensión nominal.
- Subida de tensión de duración típica mayor que un minuto y de magnitud típica entre 107,5% y 120%.

Las disminuciones de tensión de magnitud típica bajo el 10% de la tensión nominal, serán interrupciones de tensión clasificadas según lo siguiente:

- Momentáneas: de duración típica entre 10 milisegundos y 3 segundos.
- Temporal: de duración típica entre 3 segundos y un minuto.
- Sostenida: de duración típica mayor que un minuto y de magnitud típica nula.

A pesar de que existe clasificación para las fluctuaciones de tensión en la norma actual, no existe un límite máximo admisible, indicado por los CDEC.

Dado que es una obligación de los participantes de la red eléctrica el cumplir con la normativa vigente del país, regularmente se ha optado por la utilización de equipos de compensación estáticos, como bancos de condensadores, reactores, etc., y a pesar de que aún estos elementos se presentan como alternativas de expansión, sobre todo en subestaciones para control de tensión, los equipos FACTS, gracias a los avances en electrónica de potencia, representan una alternativa importante para el manejo de las variables del sistema.

2.3 Equipos de compensación flexibles en sistemas de corriente alterna FACTS

De acuerdo a la definición presentada por la IEEE, los controladores FACTS son “sistemas de transmisión de corriente alterna que incorporan controladores estáticos basados en electrónica de potencia para mejorar la controlabilidad e incrementar la capacidad de transferencia de potencia” [75].

A través de la manipulación de los flujos de potencia activa y reactiva en una línea (manejando reactancia, diferencia de ángulos entre las barras y tensión en cada barra), los equipos FACTS pueden mejorar la controlabilidad e incrementar la capacidad de potencia transferible [43]. Dentro de los beneficios que estos equipos ofrecen al sistema, se pueden contar:

- Control del flujo de potencia. Puede ser utilizado para: cumplir un contrato, asegurar un flujo de potencia óptimo, manejar contingencias, o una combinación de todas estas situaciones.

- Aumentar la capacidad de carga de las líneas a su límite térmico. Esto se puede lograr a través de la superación de otros límites (de estabilidad y dieléctrico), y la repartición de potencia entre líneas de acuerdo a sus capacidades.
- Proveer mayor flexibilidad en las necesidades de nueva generación.
- Reducción de los flujos de potencia reactiva, permitiendo un aumento de la potencia activa que puede ser transportada.

Cada equipo FACTS posee características particulares y cumple con tareas determinadas de acuerdo al criterio con el cual fue diseñado. Considerando la forma de conexión que tienen los equipos FACTS se pueden clasificar de la siguiente manera: [80]

- Compensadores en paralelo
- Compensadores en serie
- Reguladores de tensión y ángulo de fase
- Compensadores combinados

Gran parte de las definiciones y caracterizaciones presentadas a continuación sobre los distintos equipos FACTS son extraídas de la referencia [80]. Además, en los anexos complementarios se presentan en mayor detalle los diferentes equipos existentes, junto a la descripción de las mejoras que estos ofrecen al ser utilizados en el sistema.

2.3.1 Compensadores en paralelo

La compensación en paralelo permite manejar el perfil de tensión en la línea, con distintos efectos dependiendo donde es conectado el equipo. Luego, cuando es ubicada a la mitad del tramo se produce un efecto de segmentación de la línea, mientras que al colocar el dispositivo en un extremo se puede realizar un control dinámico de la tensión, previniendo inestabilidad de esta variable eléctrica además de incrementar la estabilidad transitoria y la amortiguación de oscilaciones de potencia.

Para comprender mejor su efecto, en la Figura 1 (a) se encuentra una representación de un sistema con compensación en paralelo en el punto medio. La compensación, que tiene tensión igual a la de ambos extremos (por lo tanto, son todas iguales, y de magnitud V), divide la línea de transmisión en dos partes independientes, ambas con impedancia $X/2$.

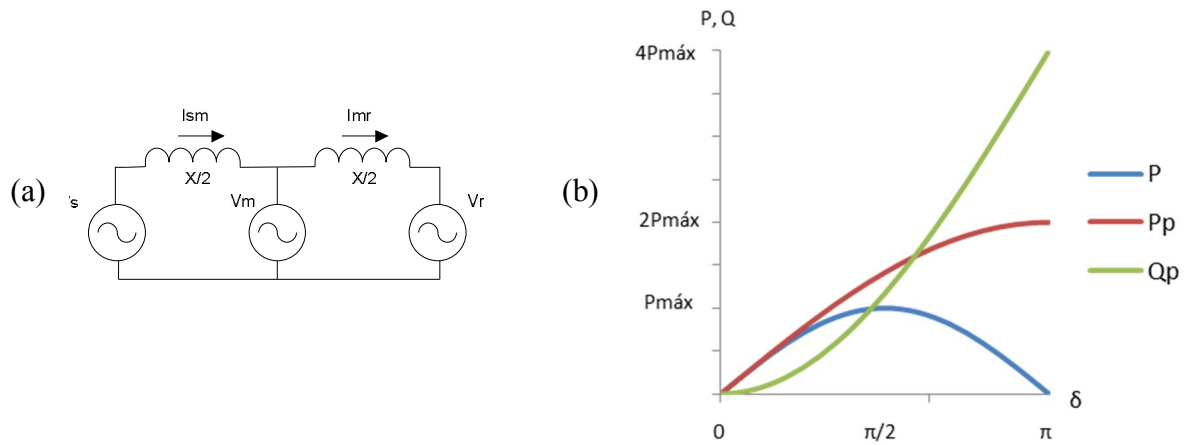


Figura 1: Sistema de dos máquinas con compensador reactivo ideal en el punto medio (a), características de potencia activa y reactiva v/s ángulo (b).

Las corrientes y tensiones en el sistema, quedan como sigue:

$$V_{sm} = V_{mr} = V \cos \frac{\delta}{4} \quad (2.1)$$

$$I_{sm} = I_{mr} = I = \frac{4V}{X} \operatorname{sen} \frac{\delta}{4} \quad (2.2)$$

Luego, las potencias transmitidas serán:

$$P = 2 \frac{V^2}{X} \operatorname{sen} \frac{\delta}{2} \quad (2.3)$$

$$Q = \frac{4V^2}{X} (1 - \cos \frac{\delta}{2}) \quad (2.4)$$

La relación entre \$P\$, \$Q\$ y el ángulo \$\delta\$ para el caso de un compensador paralelo ideal, se puede observar en la Figura 1(b). Se puede ver que este tipo de compensación puede aumentar notablemente la potencia transmitida, pero a un alto costo de potencia reactiva.

El concepto de la compensación en paralelo en el punto medio de la línea se debe a que la caída de tensión en este punto es máxima. La idea de esto es que al instalar una mayor cantidad de estos equipos en la línea, esta quedaría segmentada en una mayor cantidad de partes, por lo que la caída de tensión sería cada vez menor, acercándose así al caso ideal de un perfil constante de voltaje, lo que optimizaría la transmisión de energía.

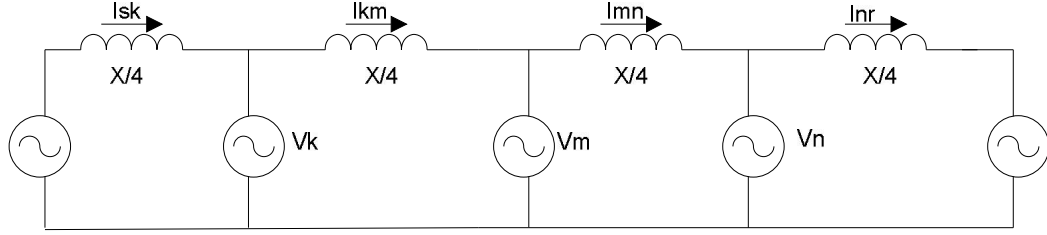


Figura 2: Múltiples compensadores en paralelo para una línea.

2.3.2 Compensadores en serie

La compensación en serie (en este caso compensación capacitiva serie) mejora la capacidad de transmisión por medio de la cancelación de parte de la reactancia inductiva de la línea, característica que influye mayormente sobre su capacidad de transmisión. Considerando un sistema como el de la Figura 3(a) que presenta compensación capacitiva, la impedancia efectiva de línea, X_{eff} se expresa como sigue:

$$X_{eff} = X - X_C = (1 - k)X \quad (2.6)$$

Donde X_C es la impedancia del condensador en serie, X es la impedancia de la línea y k es el grado de compensación en serie, es decir:

$$k = X_C/X \quad 0 \leq k \leq 1 \quad (2.7)$$

Asumiendo que $V_S = V_r = V$, la corriente en la línea compensada, y la potencia activa transmitida quedarán como sigue:

$$I = \frac{2V}{(1-k)X} \text{sen}\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (2.8)$$

$$P = V_m * I = \frac{V^2}{(1-k)X} \text{sen}(\delta) \quad (2.9)$$

La potencia reactiva entregada por el condensador serie será:

$$Q_C = I^2 X_C = \frac{2V^2}{X} \frac{k}{(1-k)^2} (1 - \cos\delta) \quad (2.10)$$

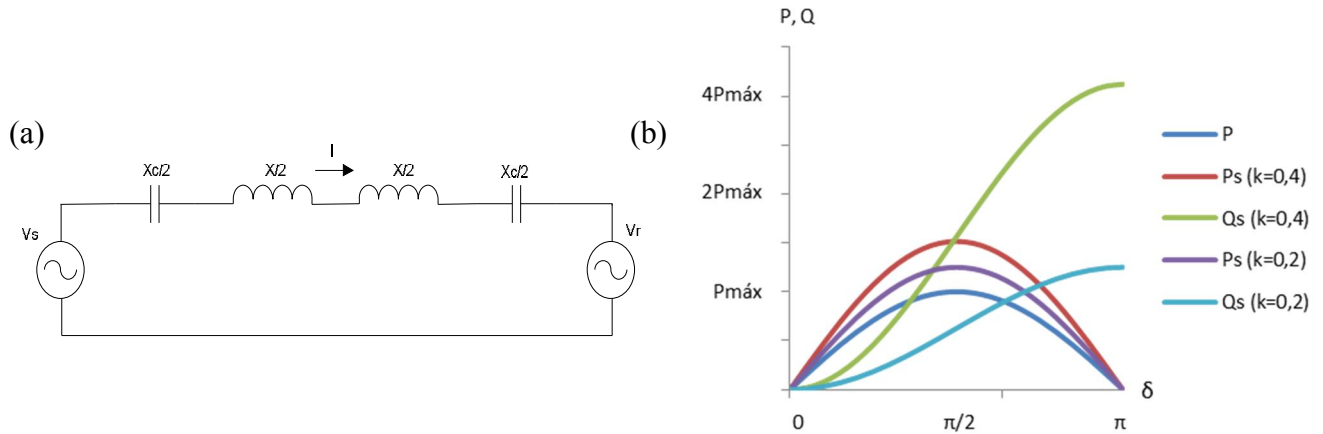


Figura 3: Sistema de dos máquinas con capacitor en serie (a) y características de potencia activa y reactiva v/s ángulo (b).

La relación entre la potencia activa P , la potencia reactiva del condensador serie Q_C y el ángulo δ se puede observar para distintos grados de compensación k en la Figura 3(b). Fácilmente se puede concluir que la potencia transmitida aumenta con el grado de compensación k , al igual como lo hace la potencia reactiva entregada por el capacitor.

Así como la compensación en paralelo, la compensación en serie permite aumentar el límite de estabilidad de voltaje. Esto lo hace cancelando una parte de la reactancia de la línea, proveyendo así de una fuente de voltaje “fija” a la carga. Para aumentar el límite de estabilidad de voltaje para transmisión en líneas aéreas, la compensación en serie es mucho más efectiva que la compensación en paralelo para la misma cantidad de MVA.

2.3.3 Otros equipos de compensación

Mientras que la compensación en paralelo actúa sobre la tensión y la compensación en serie, sobre la impedancia de la línea, los reguladores de tensión y ángulo de fase manejan, tal como su nombre lo indica, la tensión y ángulo de fase de la transmisión de energía. El concepto básico de la regulación de voltaje y ángulo de fase es la adición de una componente en fase o en cuadratura a la tensión de un nodo, con la intención de cambiar su magnitud o ángulo a un valor específico.

La regulación de voltaje se puede lograr, teóricamente, con una fuente de voltaje de amplitud variable, en serie con el sistema AC y el terminal regulado. Un voltaje ajustable se puede proveer por medio del cambiador de fase de un transformador trifásico, a través del primario de un transformador de inserción en serie, que es inyectado para conseguir la regulación de voltaje requerida.

De manera similar, se puede conseguir la regulación del ángulo de fase a través de una fuente regulable de tensión, que inyecta un voltaje con una fase de $\pm 90^\circ$, respecto del voltaje del sistema.

Luego, con un regulador de fase compensando el sistema, las potencias activa y reactiva en el extremo de demanda serán:

$$P = \frac{V^2}{X} \sin(\delta - \sigma) \quad (2.11)$$

$$Q = \frac{V^2}{X} (1 - \cos(\delta - \sigma)) \quad (2.12)$$

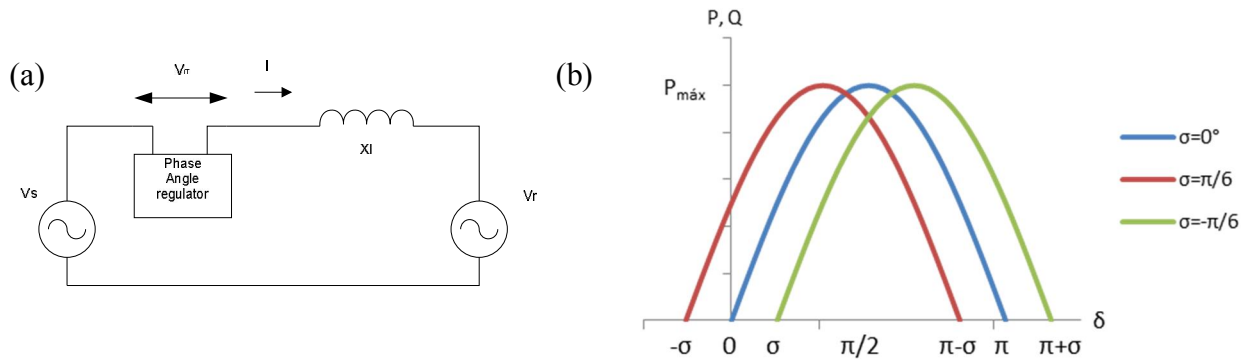


Figura 4: Sistema básico de dos máquinas con regulador de ángulo de fase (a) y potencia transmitida versus ángulo (b).

Cuando la regulación se hace con un ángulo de $\pm 90^\circ$, es decir, con un regulador de ángulo del tipo elevador de tensión en cuadratura, la potencia transmitida corresponde a:

$$P = \frac{V^2}{X} \left(\sin\delta + \frac{V_\sigma}{V} \cos\delta \right) \quad (2.13)$$

A partir de esta ecuación y de la Figura 5, se puede observar que el elevador de tensión en cuadratura permite aumentar el nivel máximo de transmisión de potencia, ya que aumenta la magnitud de la tensión efectiva del nodo transmisor.

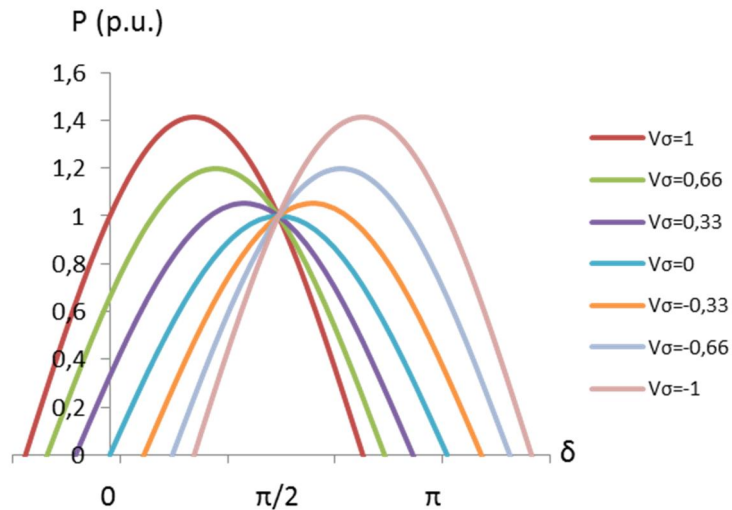


Figura 5: Característica de transmisión de potencia versus ángulo del elevador de tensión en cuadratura

A diferencia de los compensadores en serie y paralelo, el regulador de ángulo de fase tiene que manejar tanto potencia activa como reactiva. Por otra parte, también es capaz de mejorar la estabilidad transitoria y amortiguar oscilaciones de potencia.

Cuando existe la necesidad de intercambiar tanto potencia activa como reactiva, es decir, poder desplazar el funcionamiento de un equipo por los cuatro cuadrantes del plano $P+jQ$, se puede conseguir con dos convertidores con fuente de voltaje, uno operado en serie y el otro en paralelo con la línea de transmisión, con un condensador DC común en conexión back-to-back de los convertidores. De esta manera, el convertidor en serie se encarga del intercambio total de VA correspondiente al voltaje serie inyectado y la corriente principal de línea. Además, internamente genera la componente reactiva del total de VA, pero transfiere la parte real al convertidor paralelo a través de la conexión back-to-back, encargándose este último de proveer o absorber esta componente y transferirla a la red.

Los compensadores combinados consisten en arreglos de convertidores de tipo fuente de voltaje en conexión back-to-back, y poseen un gran potencial dentro de los controladores FACTS. Estos arreglos ofrecen tres posibilidades. En el primero, un controlador se encuentra en serie, mientras que el segundo se ubica en paralelo con la red. Este tipo de controlador se conoce como Controlador Unificado de Flujo de Potencia (UPFC, sigla en inglés de *Unified Power Flow Controller*). En el segundo arreglo, ambos controladores se conectan en serie, y es conocido como Controlador Interlineal de Flujo de Potencia (IPFC, sigla en inglés de *Interline Power Flow Controller*). El tercero corresponde a una combinación de dos convertidores en paralelo con la red. Este último es análogo a la conexión back-to-back en HVDC (corriente continua en alto voltaje), y no será considerado dentro de esta tesis.

El UPFC fue ideado para el control en tiempo real y compensación dinámica de sistemas de transmisión AC. Este equipo es capaz de controlar, de forma simultánea o selectivamente, todos

los parámetros que afectan el flujo de potencia en una línea de transmisión (es decir, voltaje, impedancia y ángulo de fase). Además puede manejar en forma independiente el flujo de potencia activa y reactiva en la línea.

Si se considera el sistema clásico de dos máquinas sin compensación, se tiene que las potencias real y reactiva transmitidas de acuerdo al ángulo δ , corresponden a:

$$P_0(\delta) = \frac{V^2}{X} \sin\delta \quad (2.14)$$

$$Q_0(\delta) = -\frac{V^2}{X} (1 - \cos\delta) \quad (2.15)$$

Luego, para el sistema compensado por un UPFC, teniendo en cuenta que este equipo permite entregar una tensión variable tanto en magnitud como en ángulo, las potencias transmitidas real y reactiva se encontrarán en el rango:

$$P_0(\delta) - \frac{VV_{pqmax}}{X} \leq P_0(\delta) \leq P_0(\delta) + \frac{VV_{pqmax}}{X} \quad (2.16)$$

$$Q_0(\delta) - \frac{VV_{pqmax}}{X} \leq Q_0(\delta) \leq Q_0(\delta) + \frac{VV_{pqmax}}{X} \quad (2.17)$$

El UPFC es capaz de controlar la magnitud y ángulo de la tensión inyectada en tiempo real, de modo de mantener o variar el flujo de potencia real y reactiva en la línea para poder satisfacer las condiciones de operación del sistema.

El IPFC provee compensación serie controlable de reactivos independiente de cada línea y además de la capacidad de transferir directamente potencia real entre las línea compensadas. Esto permite igualar las potencias reales y reactivas entre las líneas, reducir la carga de líneas sobrecargadas, compensar caídas de voltaje y la demanda reactiva correspondiente, e incrementar la efectividad de la compensación total del sistema ante perturbaciones dinámicas. En otras palabras, el IPFC puede potencialmente proveer un esquema efectivo de manejo de potencia en subestaciones de varias líneas.

El UPFC puede entregar compensación a una sola línea, mientras que el IPFC provee compensación activa y reactiva a múltiples líneas, lo que se puede ver con mayor claridad en la Figura 6. Sin embargo, la suma de potencia activa intercambiada por el IPFC debe ser cero, por lo que, en caso de que las líneas que se encargan de eliminar carga de la línea “principal” (la con mayor sobrecarga) se encuentren sobrecargadas, esta característica se puede transformar en un problema. Para resolver este inconveniente, se pueden combinar las características del UPFC y el IPFC en un IPFC generalizado, agregando al arreglo de convertidores en serie, un convertidor en paralelo. Con este esquema, la diferencia de potencia neta en el terminal DC de los convertidores serie es absorbida o entregada por el convertidor paralelo, e intercambiada al sistema AC por el bus paralelo.

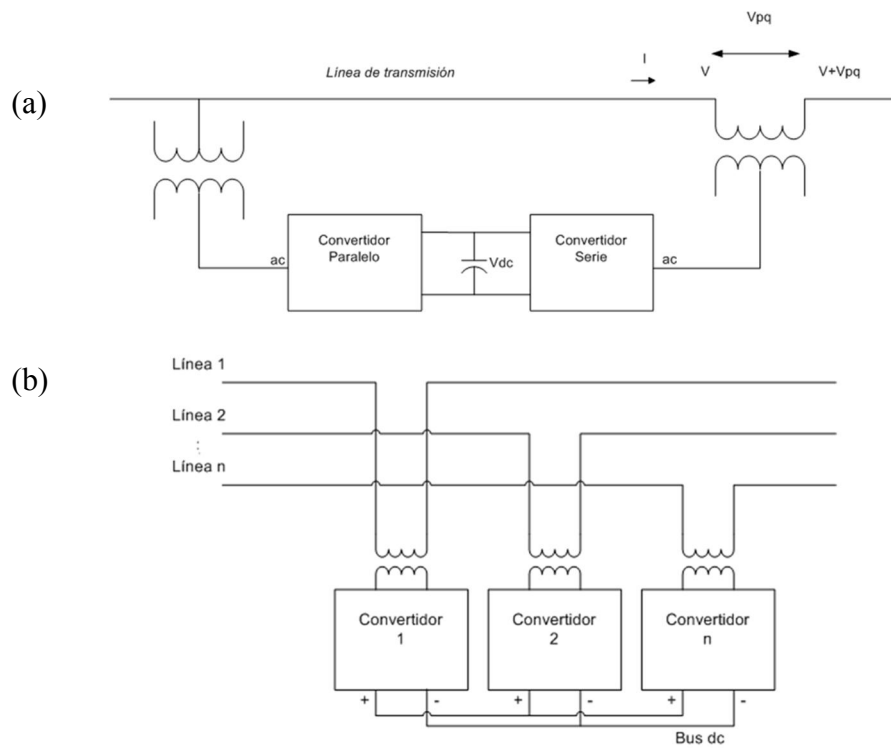


Figura 6: Modelo de implementación de UPFC por medio de dos convertidores con fuente de voltaje (a) e implementación de IPFC con n convertidores (b)

Considerando el enfoque tradicional del control de flujo, donde la potencia activa transmitida se controla por medio del voltaje, la impedancia o el ángulo de fase, el IPFC generalizado con cada uno de sus controladores tiene la capacidad de poder utilizarlos en forma independiente como controladores tradicionales, y cambiar de una funcionalidad a otra (control de tensión, impedancia o ángulo de fase). Sumado a lo anterior, y aún más importante, el IPFC generalizado tiene la posibilidad de conectar sus controladores por medio de un canal común DC, entregando una capacidad mucho aún más amplia de control de la transmisión.

Capítulo 3 Definiciones y estado del arte

El objetivo de la planificación de la expansión del sistema de transmisión eléctrico (*Transmission Network Expansion Planning, TNEP*) es definir dónde, cuándo, y qué instalar en la red eléctrica para cumplir con las necesidades de abastecimiento de energía, bajo un conjunto de requerimientos de operación, seguridad y calidad de servicio, dentro de un horizonte determinado de años, a un costo mínimo de inversión, operación y falla [1], [5], [53].

La forma de abordar este problema se encuentra estrechamente relacionada con los criterios que determine el planificador que son importantes de considerar para obtener un plan óptimo de expansión. De esta manera, el problema se puede clasificar como: dinámico o estático, dependiendo de si la planificación se hace para varios periodos o para uno solo, respectivamente; con o sin pérdidas, si es que las pérdidas que se generan en las líneas son modeladas dentro del planteamiento del problema; determinístico o probabilístico, de acuerdo a la naturaleza de la información que se utiliza para elementos como la generación y la demanda; DC o AC, según el tipo de modelación que se utilice para representar a la red (en DC se pueden contabilizar distintos modelos de acuerdo al nivel de simplicidad con el que se caracteriza la red); con enfoque de mercado o de confiabilidad; entre otras consideraciones.

En general, todas estas características se encuentran fuertemente enlazadas al tamaño que posee el sistema. A medida que aumenta el tamaño de la red, el número de variables que interviene en la optimización crece exponencialmente, y con ello, la cantidad de posibles soluciones. En consecuencia, la probabilidad de encontrar mínimos locales durante la búsqueda del óptimo global, es bastante alta, y más aún la de estancarse en éstos. A lo anterior se debe sumar la cantidad de recursos computacionales que se deben utilizar para procesar la información utilizada para implementar cualquier tipo de algoritmo matemático que busque encontrar una solución óptima para el TNEP [2].

Hablando en términos matemáticos, y considerando la naturaleza de las variables que se manejan, el TNEP es un problema de gran tamaño, complejo, y de programación entera-mixta no lineal (tomando en cuenta que no se pueden agregar partes de elementos a la red, sino que elementos completos como 2 líneas, 1 transformador, etc., y que variables como los flujos de potencia, ángulos, generación, corresponden a números reales) [33].

3.1 Modelación de la red eléctrica

La tarea de planificar la expansión del sistema de transmisión, requiere del procesamiento de una cantidad importante de variables y datos, que en consecuencia requiere de tiempos altos de cómputo. Por esta razón, se generan modelos simplificados que representen el funcionamiento del sistema y que sean manejables para la optimización. A pesar de esto, por ser una aproximación del funcionamiento real de la red, las soluciones obtenidas por los modelos deben

pasar por pruebas de factibilidad que determinen si corresponden a soluciones aplicables [53]. A continuación se presenta una descripción de las principales características del modelo de la red eléctrica utilizado en este trabajo, mientras que en los anexos complementarios se detallan otras particularidades asociadas a este tema.

3.1.1 Modelo DC

En la literatura pertinente sobre el tema de expansión de la transmisión, el modelo más usado para representar la red eléctrica es el flujo de potencia DC [1] – [20].

El flujo de potencia DC permite obtener el estado del sistema en forma bastante aproximada y confiable [53], y responde perfectamente para resolver el problema de TNEP al considerar diferentes escenarios de generación, demandas, topologías y contingencias, permitiendo incluso agregar elementos como pérdidas eléctricas del sistema [1] e incertidumbre de ciertos elementos [3].

De acuerdo a [53], el modelo de flujo de potencia DC consiste en “despreciar las resistencias series de las líneas, las admitancias en derivación de los elementos y asumir un perfil de voltaje plano e igual a 1 en p.u.”. De esta manera, el flujo de potencia activa entre dos nodos del sistema quedará determinado por los ángulos de sus voltajes, y por la reactancia de la línea que los une. Luego, el flujo entre los nodos i y j es:

$$f_{ij} = \frac{(\theta_i - \theta_j)}{x_{ij}} \quad (3.1)$$

Donde x_{ij} corresponde a la reactancia de la línea que une los nodos i y j . El flujo por una línea se encontrará limitado por su capacidad para transportar energía, por lo tanto:

$$-\bar{f}_{ij} \leq f_{ij} \leq \bar{f}_{ij} \quad (3.2)$$

La relación (3.1) se encarga de representar cada línea y transformador de la red, y equivale a la ley de Ohm para corriente continua. La unión de todos estos elementos se hace a través de la primera ley de Kirchhoff, realizando el balance de potencias en cada nodo, es decir, de la potencia generada, la potencia demandada y los flujos entrantes y salientes: [53]

$$P_{gi} - \sum_i f = P_{di} \quad (3.3)$$

Donde P_{gi} es la potencia activa generada en nodo i y P_{di} es la potencia activa demandada en nodo i .

Las ecuaciones (3.1) y (3.3) representan cada línea y cada nodo del sistema, respectivamente, permitiendo pronosticar el funcionamiento de la red para una configuración dada. Matricialmente, tomando en cuenta las relaciones antes mencionadas, el sistema quedará representado por las ecuaciones (3.4) y (3.5):

$$P_g - I \cdot f = P_d \quad (3.4)$$

$$f - \gamma \cdot I^t \cdot \theta = 0 \quad (3.5)$$

Donde

P_g	:	Vector de potencias activas generadas
P_d	:	Vector de potencias activas demandadas
I	:	Matriz de incidencia
γ	:	Matriz diagonal de susceptancias de las líneas ($\gamma_{ij} = 1/x_{ij}$)
θ	:	Vector de ángulos de tensión de nudos

A partir del modelo de flujo de potencia DC, representado por las ecuaciones (3.4) y (3.5), se puede derivar un modelo simplificado, llamado de transporte, el cual solo considera la primera ley de Kirchhoff (correspondiente a la relación (3.4)). En 1970, Garver [24] presenta un trabajo de programación lineal para resolver el problema de la expansión del sistema de transmisión, en el cual representa la red a través de un modelo de transporte, en una de sus primeras utilidades.

En adelante, el modelo de transporte ha sido utilizado como parte del mismo método de Garver para inicializar algoritmos de optimización [22], [25], [26], ya que es una forma rápida de obtener soluciones que no corresponden al óptimo pero que resultan ser puntos de partida buenos y confiables.

Otra variante del modelo de flujo de potencia DC corresponde al modelo híbrido. Este divide la red en dos partes, siendo una representada por las ecuaciones del flujo de potencia (3.4) y (3.5), mientras que en la segunda se utiliza el modelo de transporte. Regularmente, este tipo de modelo se utiliza para representar, por un lado, la red existente con flujo de potencia DC, mientras que la red candidata (opciones de expansión) es representada por el modelo de transporte [46].

Modelación de redes candidatas en flujo DC

Para incluir en el modelo DC de la red eléctrica las nuevas líneas que pueden ser incorporadas, se agregan variables de decisión que indicarán la existencia o no de una de éstas. Desde luego, estas

variables afectarán la existencia de flujo por estas líneas, y por lo tanto su cálculo, dependiendo si el modelo es del tipo transporte o flujo DC. Esto se representa a través de las siguientes ecuaciones:

$$P_g - I_1 \cdot f_1 - I_2 \cdot f_2 = P_d \quad (3.6)$$

$$x \cdot (f_2 - \gamma_2 \cdot I_2^t \cdot \theta_2) = 0 \quad (3.7)$$

$$-x \cdot \bar{f}_2 \leq f_2 \leq x \cdot \bar{f}_2 \quad (3.8)$$

Donde

- f_1, f_2 : Vector de flujos por líneas existentes y candidatas, respectivamente
- I_1, I_2 : Matriz de incidencia de líneas existentes y candidatas, respectivamente
- x : Vector de variables de decisión de inversión
- γ_2 : Matriz diagonal de susceptancias de las líneas existentes
- θ_2 : Vector de ángulos de tensión de nudos conectados por líneas candidatas
- \bar{f}_2 : Vector de límites de potencia por líneas candidatas

Utilizando las variables de inversión como variables de optimización, se puede determinar el plan de expansión óptimo tal que el gasto en nuevos elementos para el sistema sea mínimo.

Es importante notar que la relación (3.7) debe existir solo cuando el elemento candidato es construido, sino no debe ser utilizada. Para resolver este inconveniente se proponen dos formas de representar (3.7): (i) un modelo no lineal entero; y, (ii) un modelo lineal disyuntivo [53].

En el caso de (i), la ecuación (3.7) se reemplaza por la (3.9):

$$f_{ij}^{(2)} - x_{ij} \cdot \gamma_{ij}^{(2)} \cdot (\theta_i - \theta_j) = 0 \quad \forall i, j \in C \quad (3.9)$$

Donde C corresponde al conjunto de candidatos.

De esta manera, si el elemento se construye, es decir, $x_{ij} = 1$, la ecuación (3.9) queda como (3.7). Por otro lado, si no se invierte ($x_{ij} = 0$), la línea no debe existir y por lo tanto, el flujo debe ser cero. Esto se garantiza gracias a la relación (3.8).

En cuanto a (ii), la formulación disyuntiva divide (3.7) en dos relaciones:

$$f_{ij}^{(2)} - \gamma_{ij}^{(2)} \cdot (\theta_i - \theta_j) \leq M(1 - x_{ij}) \quad \forall i, j \in C \quad (3.10a)$$

$$f_{ij}^{(2)} - \gamma_{ij}^{(2)} \cdot (\theta_i - \theta_j) \geq M(1 - x_{ij}) \quad \forall i, j \in C \quad (3.10b)$$

Un ejemplo de utilización de este tipo de representación se encuentra en [11]. Este tipo de formulación es útil cuando se desea resolver un problema lineal. La desventaja es que el valor de M debe ser grande para obtener planes factibles, pudiendo provocar inestabilidad numérica del algoritmo.

3.2 Generación en TNEP

En el proceso de planificación de la expansión de la transmisión, la generación de energía eléctrica puede enfrentarse de diferentes maneras de acuerdo a las consideraciones del planificador. En los modelos más simplificados, la generación en cada nodo puede ser fija, es decir, que solo cumple con el balance entre producción y demanda para el sistema. Por lo tanto, la generación es un dato. En el lejano trabajo de Garver [24] se puede ver un ejemplo de esta situación. El problema que presenta la rigidez de la generación en este caso es que ante cambios en la red que pueden producir sobrecargas, no se podrá redistribuir la generación para eliminar las sobrecargas en las líneas y/o cumplir con la demanda. El re-despacho óptimo de carga ayuda a superar este problema, programando las unidades generadores para que sirvan la demanda al mínimo costo de operación, considerando las restricciones del sistema y de la central [5].

Para considerar el re-despacho de carga en el proceso de planificación, se agrega como restricción al modelo de optimización los límites de generación en cada uno de los nodos del sistema (dependiendo de si existe generación en el nodo o no). Además se suma a la función objetivo la minimización de los costos de generación del sistema. En [53], se puede observar el modelo de re-despacho:

$$\text{Min } c_g P_g \quad (3.11)$$

s. a

$$P_g - I \cdot f = P_d \quad (3.11a)$$

$$f - \gamma \cdot I^t \cdot \theta = 0 \quad (3.11b)$$

$$P_g^{\min} \leq P_g \leq P_g^{\max} \quad (3.11c)$$

$$-\bar{f}_{ij} \leq f_{ij} \leq \bar{f}_{ij} \quad (3.11d)$$

Donde

c_g : Vector de costos de generación
 P_g^{min}, P_g^{max} : Vectores de generación mínima y máxima, respectivamente

El límite superior de generación se encuentra determinado por la capacidad máxima de un generador o de una central, mientras que el mínimo dependerá del valor que requieren las unidades generadoras para mantener su operación (mínimo técnico) [54].

A medida que los modelos se tornan más sofisticados, y buscan aproximarse más a la realidad, son más los elementos y condiciones que son considerados para incluirse en el problema de TNEP. En este sentido, la generación es uno de estos elementos que poseen distintas características que pueden ser modeladas, como por ejemplo la disponibilidad que puede tener una unidad generadora y su efecto sobre la congestión de las líneas [5], la variabilidad que entregan las energías renovables debido a la naturaleza de sus materias primas [7] [30] [52], el impacto de la masificación de la generación distribuida [19], entre otras.

Diferentes métodos han sido implementados para manejar cada una de estas cualidades, primando el enfoque probabilístico que se le puede dar a la generación.

Golestani, Tadayon y Mahdipour [5] proponen resolver en forma simultánea el TNEP y el despacho de carga, a través del uso de un algoritmo genético (que se revisará posteriormente). Gracias a la naturaleza aleatoria de los mecanismos del algoritmo genético se puede modelar la incertidumbre asociada a la generación de cada unidad generadora, de modo de poder determinar cuáles son las líneas con mayor probabilidad de congestión.

Por otro lado, para tratar la incertidumbre introducida por la generación de energías renovables, se han presentado varios enfoques interesantes. En la referencia [7], se utiliza el ensayo de arreglo ortogonal de Taguchi (TOAT) que considera la incertidumbre a través de la evaluación de un número mínimo escenarios de generación. En comparación al método de Monte Carlo, que también introduce la incertidumbre al evaluar escenarios, TOAT ocupa un número mucho menor de escenarios y el tiempo de computación es menor. Al estudio de escenarios, se suma un factor de penalización por cortes en la transmisión de energías renovables, para eliminar sobrecargas que disminuyan el transporte de este tipo de energías.

El Midwest ISO (operador independiente del sistema de medio oeste en Estados Unidos que considera a 15 estados) para considerar la incertidumbre de la generación renovable utiliza “futuros”, que corresponden a escenarios específicos de generación con un nivel alto de probabilidad de ocurrencia en el futuro (por ejemplo, políticas de un 20% de energía eólica, o de

carbón, o nuclear, entre otras), similar al caso anterior pero más apegado a los posibles proyectos que posee el país del norte [30].

Un ejemplo de generación distribuida en TNEP se presenta en [19], que toma en cuenta su potencial penetración a gran escala. La generación distribuida (GD) influye profundamente las necesidades de transmisión, ya que su producción permite reducir las demandas locales, y por lo tanto, afecta el requerimiento de mayor capacidad en la transmisión. Por otro lado, en el caso que la GD crezca tanto como para comenzar a exportar energía, los generadores necesitarán utilizar la red de transmisión. De uno u otro modo, la GD es un factor que influirá intensamente en el sistema de transmisión y la planificación de su expansión. En este trabajo, con la utilización de dos procesos estocásticos, se evalúa el valor de inversión de distintas opciones de generación en diferentes ubicaciones. De esta manera se obtienen escenarios de generación, que combinados a un TNEP multi-objetivo y una propuesta del método de Monte Carlo, permiten obtener el plan de expansión considerando la colocación de generación distribuida.

3.3 Demanda en TNEP

Ante la ocurrencia de una falla o contingencia en el sistema, la primera herramienta de amortiguación de sus efectos es el re-despacho de generación, es decir, que las unidades generadoras absorban los déficit de demanda que puedan presentarse. En caso de que esto no sea suficiente, la demanda simplemente no puede ser suplida, lo cual puede traer inestabilidad y desequilibrio en el sistema, además de los problemas que esto pueda provocar a los clientes y las multas asociadas a interrupción del servicio eléctrico [55]. Luego, para mantener un nivel determinado de seguridad de servicio (que estará asociado a la cantidad de carga que el cliente está dispuesto a ceder con tal de mantener la continuidad del servicio) y replicar las acciones que en la operación real del sistema se realizarían para conseguirlo, dentro del TNEP se considera un modelo para el desprendimiento de carga [53].

El objetivo tras modelar el desprendimiento de carga, es lograr que sea el menor posible. De esta manera, asignando un costo a la carga perdida, el desprendimiento óptimo de carga se modela como sigue [53]:

$$\text{Min } c_g P_g + c_r P_r \quad (3.12)$$

s. a

$$P_g + P_r - I \cdot f = P_d \quad (3.12a)$$

$$f - \gamma \cdot I^t \cdot \theta = 0 \quad (3.12b)$$

$$0 \leq P_r \leq P_d \quad (3.12c)$$

$$P_g^{\min} \leq P_g \leq P_g^{\max} \quad (3.12d)$$

$$-\bar{f}_{ij} \leq f_{ij} \leq \bar{f}_{ij} \quad (3.12e)$$

Donde

c_r : Vector de costo de desprendimiento de carga
 P_r : Vector de potencia a desprender

La potencia desprendida se modela como un “generador ficticio” que cumple con la demanda no suplida debido a la falla del sistema. En una gran cantidad de trabajos el desprendimiento óptimo de carga forma parte de la formulación del TNEP [1] [3] [4] [7] [9] [16] [22] [23].

La naturaleza de la demanda en el TNEP, de manera similar a la generación, depende del criterio y las consideraciones del planificador. Cuando se consideran factores de incertidumbre, los modelos matemáticos de estos se pueden clasificar como probabilísticos, difusos, de intervalo o ciegos [3]. Cada clasificación le entregará una naturaleza propia al factor de incertidumbre, en este caso, a la demanda.

En el trabajo de Peng, Chuanquan, Jie y Cheng [3], la demanda es modelada en intervalos con el fin de utilizar un modelo simple pero que permita incluir uno de los factores de incertidumbre más importantes del sistema. De esta manera, la demanda queda representada por un número dentro del intervalo, con límites superior e inferior y que se incluyen en la formulación del TNEP en una sola restricción.

Otro ejemplo de incertidumbre modelada por intervalos se encuentra en [6]. En este trabajo cada carga nodal es seleccionada desde una distribución estadística normal, en la cual su centro es seleccionado entre los valores límites de la demanda.

También se puede analizar la incertidumbre en la demanda utilizando TOAT, como en el caso de la generación, para crear escenarios de demanda y estudiar los efectos de su variación en el TNEP [7].

Para manejar la demanda en un TNEP dinámico (considera varios periodos de planificación), a diferencia de la planificación multi-etapa convencional, en [36] se considera el crecimiento futuro de la carga en cada etapa tomando en cuenta la velocidad y aceleración con la que lo hace para cambiar el nivel de demanda. A este proceso se le conoce como reprogramación de la demanda. La idea de esta reprogramación es modificar el nivel de carga de una etapa de acuerdo a la situación de crecimiento de la demanda de los años venideros.

3.4 Pérdidas eléctricas en TNEP

Con el afán de facilitar la modelación de la red eléctrica para formular el problema de TNEP, son muchos los elementos que se simplifican o se omiten. Esto último es lo que regularmente sucede con las pérdidas óhmicas en las líneas de transmisión, las cuales en un importante número de trabajos no son consideradas dentro del planteamiento del problema. Esto ha cambiado en la última década, donde su incorporación se ha hecho más notoria, debido al afán

de que las soluciones propuestas a los planes de expansión se acerquen cada vez más al real funcionamiento de la red eléctrica.

Debido a la no linealidad de las pérdidas eléctricas (función cuadrática de la corriente), regularmente se utilizan modelos lineales para poder resolver un problema más simple de optimización y para el cual existen enfoques tradicionales de resolución. A pesar de esto, la “linealización” puede generar planes de expansión más costosos [1]. Por esta razón, Rider, García y Romero en [1] proponen un modelo DC de la red considerando pérdidas, simplemente incluyendo adecuadamente la conductancia y la susceptancia de las líneas a la primera ley de Kirchhoff.

Otra forma de incluir las pérdidas se presenta en [9]. En este caso, dada la solución de la programación lineal de una configuración, las pérdidas son calculadas usando los ángulos de los voltajes nodales obtenidos. Luego, las pérdidas son distribuidas como cargas entre los buses que la línea conecta, recibiendo cada uno la mitad. Así, se vuelve a realizar la programación lineal con las nuevas cargas, y los nuevos ángulos son obtenidos.

Por otro lado, en [44] se incluyen las pérdidas considerando un modelo AC de la red eléctrica. Así, las pérdidas por un circuito son función de su conductancia, de los voltajes de los nodos que la línea une y del ángulo entre los nodos. La ventaja de considerar las pérdidas en un modelo AC es que permite agregar el cálculo de las pérdidas reales del sistema, y no una aproximación como en el caso DC.

3.5 Equipos FACTS en TNEP

Las distintas características y capacidades que poseen los equipos FACTS han mostrado que esta clase de dispositivos tienen un potencial importante en el control de flujo de potencia y permiten un aumento de la utilización real que se hace de las líneas de transmisión (siendo el límite térmico el máximo alcanzable por sobre otro tipo de límites). Estas propiedades son de gran utilidad e implican un gran avance en la tarea de la planificación de la transmisión.

En la planificación clásica, es decir, en la cual solo se consideran adiciones de líneas y/o de transformadores, la flexibilidad tanto del sistema como de la inversión no son considerados, siendo en este último caso el retraso de la instalación de un nuevo elemento la máxima capacidad que posee la planificación para entregar flexibilidad [43].

Dado que en la mayor parte de los actuales sistemas eléctricos, la descentralización del mercado eléctrico es el nuevo paradigma, la cantidad de incertidumbres en el sistema ha crecido. Esta incertidumbre hace que el proceso de planificación se haga más complejo. Este ámbito le da otro nivel de importancia a la flexibilidad que pueda poseer el sistema para manejar las variaciones de su operación.

Los equipos FACTS intervienen en estos dos problemas. Por un lado, gracias a su capacidad de control de flujos, permiten aumentar la flexibilidad del sistema, y por lo tanto, permite manejar de mejor manera los cambios que ocurren en éste [70]. Además, solucionan problemas de congestión que se deben a la falta de control de flujos, problemas que una nueva línea no necesariamente soluciona (pudiendo incluso causar congestiones en otros sectores del sistema) [43]. Por otra parte, la reducción de los costos en electrónica de potencia ha transformado a los FACTS en una alternativa tentadora de inversión, que proporciona la libertad de ser “movibles” [69]. Esto hace referencia a que pueden ser reubicados en un lugar donde, dada la evolución del sistema, cumplan una labor más efectiva. Luego, la inversión en estos equipos es más efectiva que la inversión en elementos clásicos, en términos de reutilización, además de evitar una posible sobre-instalación del sistema junto a todos los problemas que esto pueda traer (altos costos asociados a servidumbres, dificultades para su obtención, complicaciones con el emplazamiento de nuevas líneas en áreas con poco espacio disponible, etc.).

Para incluir los equipos FACTS en el proceso de planificación de la expansión de la transmisión, y dependiendo del equipo que se desee incluir, son varios los criterios que se han considerado. En [43] se busca reflejar la mejora en la flexibilidad que genera la adición de uno de estos dispositivos; en [66] se estudia la disminución de la congestión por medio de la expansión de la red y/o la adición de equipos FACTS; en [68] y [71] se presenta la búsqueda de la ubicación óptima de los equipos FACTS con el objetivo de mejorar la cargabilidad² del sistema.

En cuanto al tipo de equipo a usar, aunque todos son útiles de alguna forma en el funcionamiento y operación del sistema de transmisión, son los equipos de compensación en serie y los desfases los más considerados, dado que permiten modificar directamente el flujo de potencia activa por una línea [66]. En algunos casos se hacen representaciones generalizadas de los equipos, como en [66], donde los equipos desfases son representados por una inyección de compensación que entra en el nodo transmisor y sale en el nodo receptor, mientras que la compensación en serie es representada directamente como una variación en la reactancia de la línea en la cual es agregada, variando además sus límites de flujo. Algo similar se plantea en [74], con la salvedad que los equipos desfases, en este caso, se representan por medio de una variación en la matriz de admitancias, en el elemento de la línea en la cual se conecta el equipo. Por otro lado, en [43] se presenta el modelo de un equipo TCSC, a través de la variación que hace de la reactancia de la línea de acuerdo al grado de compensación que incluye. Para evitar la sobrecompensación, en este trabajo el grado de compensación del TCSC fluctúa entre -0,7 y 0,2. También se toma en cuenta un aumento arbitrario de la capacidad de la línea de un 12% debido a la mejora en la estabilidad. Un transformador desfasador controlado por tiristores (en inglés *thyristor controlled phase shifter transformer*, TCPST) es modelado en [71]. Este es representado por un ángulo de fase variable, que es ponderado con la matriz de admitancias y considerando su presencia a través de la utilización de variables binarias. Por último, en la referencia [68] se modelan un TCSC, un TCPST, un UPFC y un SVC. Cabe destacar que en este caso, todos los equipos considerados se encuentran dentro de un marco de modelación AC de la red eléctrica, es decir, se consideran flujos reactivos, y tensiones diferentes de 1 (p.u.).

² Habilidad de un sistema para transmitir potencia [71]

Finalmente, los costos de inversión de estos equipos también poseen un trato particular. Aunque se encuentran distintas representaciones del costo de instalación de equipos FACTS, por su simplicidad se consideran aquellas presentadas en [66]. En este trabajo se definen los costos para un desfásador y un equipo de compensación en serie, en términos generales. Así, el costo de inversión de un desfásador es constante y depende solo de la capacidad del circuito en el cual está instalado. Se considera que la capacidad máxima de desfase que puede incluir el equipo se debe fijar entre 0° y 10° . Con esto, el costo de inversión es linealmente proporcional a la capacidad, y quedará definido como:

$$CI_{des} = c \cdot S_{base} \cdot \bar{f}_{ij} \cdot \sigma_{ij}$$

Donde

c	:	Costo específico de un equipo FACTS (\$/MVA)
S_{base}	:	Potencia base del sistema en MVA
\bar{f}_{ij}	:	Límite de flujo de la línea ij
σ_{ij}	:	Ángulo máximo de desfase

Para el caso de la compensación en serie, el costo de inversión se define como:

$$CI_s = c \cdot X_c \cdot \bar{f}_{ij}^2 / S_{base}$$

Donde

X_c	:	Reactancia máxima de compensación
-------	---	-----------------------------------

La capacidad de compensación se fija como función de la reactancia de la línea en la cual está conectado el equipo en serie, por el grado de compensación ($k \cdot X_{ij}$).

3.6 Algoritmo genético para planificación de la expansión del sistema de transmisión

La planificación de la expansión del sistema de transmisión es un problema complejo, de programación entera mixta, y de gran tamaño. Esta última característica, sumada a la naturaleza combinatorial del problema, hace que la cantidad de combinaciones posibles para conformar

planes de expansión crezca exponencialmente con el tamaño del sistema. Por otro lado, al ser el TNEP multimodal, la probabilidad de quedarse estancado en mínimos locales crece también con el tamaño del problema [22].

Para sobrellevar estas dificultades, se han propuesto una gran cantidad de algoritmos, algunos basados en métodos optimización clásicos como programación lineal [24], descomposición de Benders [13], [15], [27] y *Branch and Bounds* [1], [21], [32], [38], [52], y otros basados en metaheurísticas como *Simulated Annealing* [23], [41], [53], búsqueda tabú [4], [22], algoritmo genético [5], [6], [25], [34], [42], [45], enjambre de partículas [2], [29], [36], entre otros.

A continuación se hace una revisión del uso de algoritmos genéticos utilizados en este trabajo, mientras que en los anexos complementarios se entrega un mayor detalle del resto de los algoritmos aplicados para resolver el problema de TNEP.

El algoritmo genético (GA, del inglés *genetic algorithms*) proviene de una familia más grande conocida como algoritmos de computación evolucionaria (EC, del inglés *evolutionary computation*), los cuales están inspirados en la capacidad de la naturaleza de evolucionar a entidades que se adaptan bien a su entorno. Son tres las categorías de algoritmos EC: Programación Evolucionaria, concebida con el fin de generar inteligencia para máquinas; Estrategias Evolucionarias, válida para representaciones continuas y discretas; y los algoritmos genéticos aplicados en su mayoría para resolver problemas combinatoriales de optimización [60]. Por esta razón, GA es ampliamente utilizado para resolver el problema de TNEP [5], [6], [25], [34], [42], [45].

GA permite resolver problemas combinatoriales de optimización de mediano y gran tamaño con excelentes soluciones y bajo costo computacional. Basado en la capacidad de la naturaleza de evolucionar, GA sigue el principio de selección natural en el cual el ser más apto tiene mayor probabilidad de supervivencia y de pasar sus genes a las siguientes generaciones [34].

Hay tres mecanismos que son transversales a los algoritmos genéticos: selección, recombinación y mutación. El proceso de selección modela el concepto de la supervivencia del más apto, la recombinación trata la forma en la que dos cromosomas (o individuos) aportan sus genes para generar la descendencia, y la mutación es simplemente el cambio de un gen en un individuo (utilizado para introducir diversificación artificial) [6], [25]. Cada uno de estos mecanismos dependerá de la implementación que hace el planificador del algoritmo genético.

En [5] se encuentra una implementación de codificación entera para GA, para resolver el TNEP considerando la incertidumbre del despacho de generación. En ésta, la disponibilidad de las unidades del sistema se modela a través de la definición del cromosoma, tal que cada dígito que posee representa el tiempo que la unidad se encuentra en línea o no. Luego, evaluando el costo de operación de cada cromosoma (que representará un “escenario” determinado de generación) se analiza el potencial de cada configuración de despacho, que influirá en la probabilidad de que un individuo genere descendencia y pase sus características a la siguiente generación. El mecanismo

de recombinación se puede realizar seleccionando uno o más puntos de cruce (los cuales determinarán qué partes se intercambiarán entre los cromosomas para generar la descendencia), preocupándose en este caso solo de mantener unida la información de cada unidad. Finalmente la mutación se realiza cambiando uno de los valores del cromosoma generado. Uno de los elementos novedosos de este enfoque es la adición de dos operadores: uno de “perturbación”, el cual es un caso especial de mutación y que se aplica a los mejores individuos, cambiando uno de sus dígitos, elegido al azar, sumando +1 o -1; y otro de eliminación de exceso de potencia, que verifica si, al sacar una unidad generadora que se encuentra en su mínima capacidad, la demanda es suplida.

En [6] se presenta, un GA real compuesto con un método de consecución de valores objetivos. En este, la codificación toma una importancia especial ya que es un factor importante en la representación de los candidatos. Cada cromosoma se representa a través de un vector cuyos genes corresponden a la cantidad de circuitos que serán adicionados a una línea. Además se incluye el desprendimiento de carga en cada nodo, seleccionado aleatoriamente. Para el proceso de selección se utiliza un mecanismo de “ruleta”, el cual entrega un número al azar que determinará el cromosoma que será seleccionado. Los cromosomas se ordenan en un ranking de acuerdo a su función de “aptitud” (*fitness*). En la recombinación, se destacan tres procedimientos, similares entre ellos: para generar la descendencia, los padres son ponderados por un factor aleatorio elegido de un rango determinado, distinto uno del otro, para luego ser sumados de modo de obtener los dos descendientes (se intercambia el factor de multiplicación entre padres para obtener las dos descendencias correspondientes). El mecanismo de mutación planteado en este trabajo es dinámico, es decir, que el grado de mutaciones que suceden puede ser controlado (esto significa que también podría ser estático y mantenerse constante durante todo el proceso) y se lleva a cabo mediante la alteración de uno de los genes del progenitor por medio de una relación definida.

También se han desarrollados algoritmos especializados de GA utilizados para TNEP. Tal es el caso del trabajo presentado en [34], en donde se describe un algoritmo genético con ciertas características especiales, conocido como algoritmo genético de Chu-Beasley (CBGA). Este enfoque utiliza una función de aptitud para identificar el valor de la función objetivo, pero también una función de “ineptitud” (*unfitness*) para cuantificar que tan no factible es una configuración. Otras características que posee son las siguientes: solo un individuo es alterado en cada iteración; en las primeras etapas, las configuraciones no factibles no son descartadas, sino que son agregadas a la población hasta que converjan a un punto donde todas lo sean; y el proceso de convergencia hace a la población converger uniformemente. La mayor eficiencia que presenta CBGA sobre GA se debe a:

- Todas las soluciones almacenadas en la población actual son distintas, previniendo una convergencia prematura del algoritmo.
- Soluciones no factibles son almacenadas en caso de que las factibles no sean suficientes.
- La fase de mejora local permite una evolución más eficiente de GA.
- Las soluciones son descartadas solo cuando su descendencia es mejor.

Manteniendo la estructura básica de funcionamiento de un GA, se pueden encontrar en la literatura variaciones en algunos de sus mecanismos. Por ejemplo, en [42], al ya mencionado proceso de selección mediante “ruleta”, se suma la selección por “torneo” que consiste en dividir la población en sub-poblaciones tal que de cada una se obtenga el individuo con mejor valor de función de aptitud. En este trabajo se utiliza una selección por torneo modificada en la cual una parte de los individuos de la generación previa que poseen un valor de *fitness* superior al promedio de su generación, pasan a formar parte de la nueva población.

Capítulo 4 Metodología propuesta

Dentro de las metaheurísticas revisadas en la bibliografía, por la simpleza de su implementación y conocida eficacia al resolver el problema de TNEP, el algoritmo genético ha sido seleccionado en el desarrollo de este trabajo. A continuación se detalla la modelación del sistema que es utilizada y la formulación del algoritmo genético que se ha implementado, que corresponde a una variación del trabajo presentado por Monticelli et al en la referencia [25].

4.1 Modelo de la red eléctrica para TNEP

De acuerdo a las diferentes características presentadas para la modelación del sistema eléctrico, en este trabajo se considera un modelo DC de la red con re-despacho de carga y pérdidas eléctricas de transmisión:

$$\text{Min } c_g P_g + c_r P_r + cx \quad (4.1)$$

s. a

$$P_g - I_1 \cdot f_1 - I_2 \cdot f_2 = P_d \quad (4.1a)$$

$$f_1 - \gamma_1 \cdot I_1^t \cdot \theta_1 = 0 \quad (4.1b)$$

$$-\bar{f}_1 \leq f_1 \leq \bar{f}_1 \quad (4.1c)$$

$$x \cdot (f_2 - \gamma_2 \cdot I_2^t \cdot \theta_2) = 0 \quad (4.1d)$$

$$-x \cdot \bar{f}_2 \leq f_2 \leq x \cdot \bar{f}_2 \quad (4.1e)$$

$$0 \leq P_r \leq P_d \quad (4.1f)$$

$$P_g^{\min} \leq P_g \leq P_g^{\max} \quad (4.1g)$$

$$x \in N \cup \{0\} \quad (4.1h)$$

Dónde:

c : Vector de costo de inversión en nuevas líneas

Las pérdidas eléctricas son agregadas al sistema como se explicó en el punto 3.4, acorde a lo presentado en [9].

El problema (4.1) es un esquema general del problema que se busca resolver. En este trabajo se utilizan algunas variaciones de este planteamiento. Por una parte, se implementa un modelo de transporte relajado en la obtención de la población inicial para el algoritmo genético, es decir, no se consideran las relaciones (4.1b) y (4.1d) del modelo anterior, y la condición de naturalidad de (4.1h) se reemplaza por (4.2):

$$x \geq 0 \tag{4.2}$$

Por otro lado, el modelo (4.1) es utilizado sin considerar las variables de inversión, para obtener el flujo de potencia de la red en evaluación y determinar su validez, es decir, si permite que la generación cumpla con la demanda (recordar que se busca que la generación ficticia P_r sea cero). Por lo tanto, las ecuaciones (4.1d), (4.1e) y (4.1h) no son consideradas para este caso. Esto se hace para evaluar la red tanto en la situación sin pérdidas como en aquella con pérdidas.

4.2 Metaheurística propuesta

Un algoritmo genético obtiene una solución óptima por medio de los mecanismos de selección, recombinación y mutación, aplicados a una población de individuos, a través de varias generaciones, replicando la capacidad de los seres vivos para evolucionar y adaptarse a su entorno.

La metaheurística propuesta sintetiza lo anterior por medio de un proceso iterativo de los mecanismos mencionados sobre una población inicial, basada principalmente en el trabajo propuesto en [25].

El algoritmo recibe como datos de entrada toda la información requerida del sistema, además de los parámetros propios del algoritmo genético, que corresponden al tamaño de la población y las tasas de mutación y recombinación. Además, se definen el número máximo de generaciones y la cantidad de generaciones en las que un individuo se mantiene como solución óptima del problema para que el algoritmo se detenga. Con estos datos, se determina la población inicial que corresponderá a la primera generación. Los individuos de esta generación, que corresponden a planes de expansión de la red representados por el número de circuitos agregados a una línea nueva o existente, son evaluados para determinar su costo total de inversión, y luego su función de fitness, y si son planes factibles o no. Dentro de esta generación, aquel individuo que tenga la mayor función de fitness y sea factible, es seleccionado como “óptimo actual”. Luego, se verifica si alguno de los criterios de detención se cumple. De no ser así, la población pasa por los procesos de selección, recombinación y mutación, para crear una nueva generación y repetir el proceso anterior a partir de la evaluación. Si se cumple alguno de los criterios de detención, la configuración que se ha determinado como óptima pasa por un proceso de “revisión”. En este, se verifica, desde la línea con mayor costo de inversión a la menor, si al retirar uno de los nuevos elementos de la configuración nueva, se obtiene un resultado factible, con el fin de conseguir una mejor solución. Terminado este proceso de revisión, se obtiene el óptimo y el costo de inversión asociado. En la Figura 7 se puede ver un diagrama de bloques del algoritmo genético propuesto.

El programa propuesto cuenta con cinco funciones que trabajan sobre cada individuo de la población, además de una función que genera la población inicial y dos que determinan el flujo de potencia de una configuración determinada.

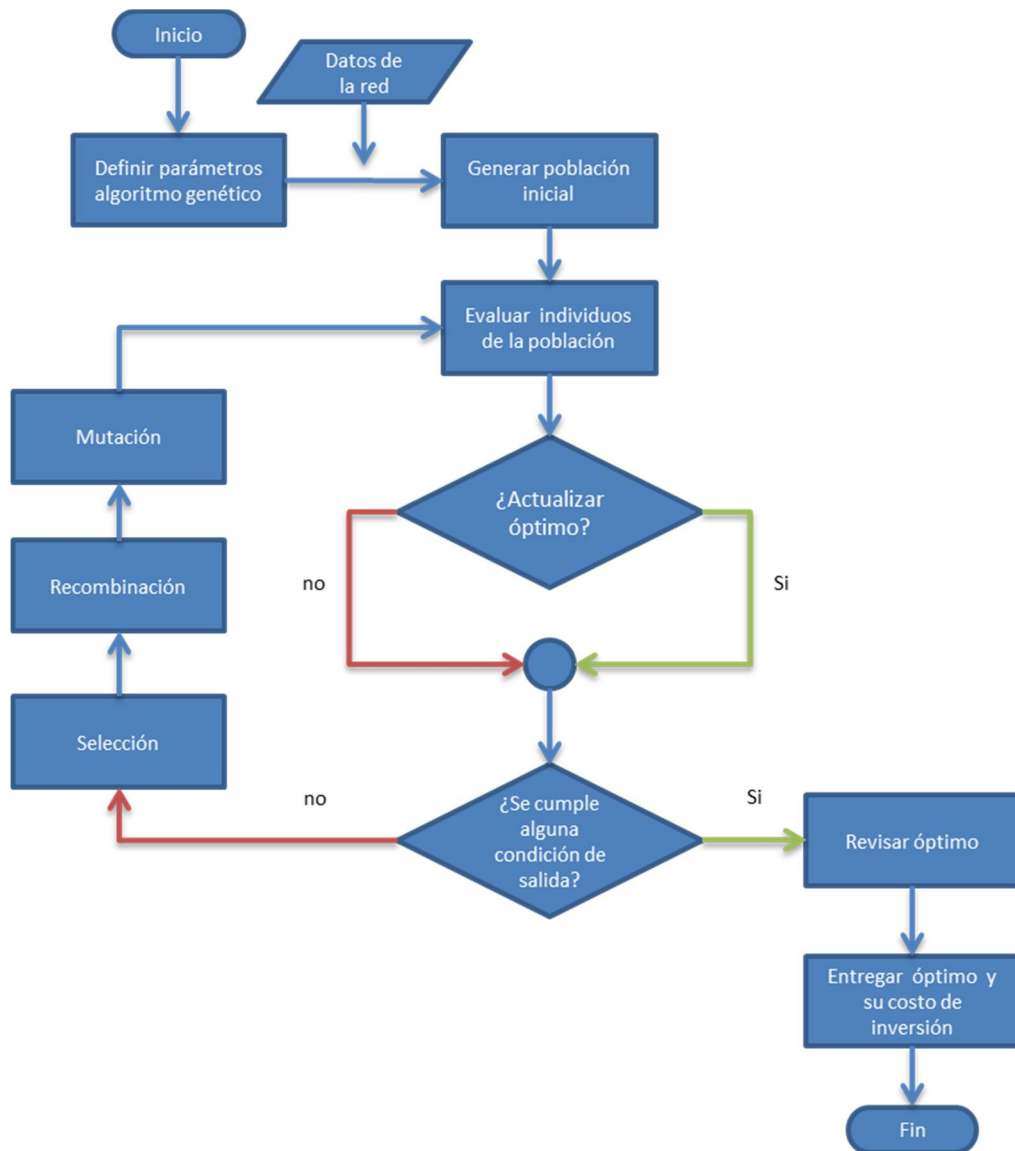


Figura 7: Diagrama de bloques del algoritmo genético propuesto

4.2.1 Función de población inicial (*pob_inicialfinal*)

Para generar la población inicial, se utiliza una variación del método propuesto en [25]. Primero, se determina la expansión óptima por medio de un modelo de transporte de la red con variables continuas, es decir, las variables de inversión relajan su condición de ser enteras. Obtenido el plan de expansión, se agrega a la red existente la parte entera de cada uno de los elementos de este plan, obteniéndose una configuración base. Luego, a partir de cada uno de los elementos de inversión fraccionarios se obtendrá una nueva configuración para la población inicial de la siguiente manera:

1. Se agrega un circuito a la línea del elemento fraccionario, creando una nueva configuración.

2. Se determina si la configuración obtenida en 1 es factible. Si es así, esta configuración se agrega a la población inicial. En caso contrario ir a 3.
3. Se agrega un circuito a la línea que posea el mayor flujo de potencia, obteniendo una nueva configuración, la cual es llevada al punto 2 para determinar factibilidad.

En una segunda etapa, cada una de las configuraciones obtenidas en el paso anterior son “revisadas” para verificar si existe sobre-instalación. Así, tal como en el caso explicado al final del punto 4.2, se obtienen nuevas configuraciones por medio de la eliminación de circuitos redundantes.

Finalmente, y en caso de que no se haya obtenido una cantidad de configuraciones iniciales igual al tamaño de población requerido, se completa la población inicial replicando configuraciones anteriormente obtenidas por medio del mecanismo de la ruleta. Este se implementa de la siguiente manera:

1. Para cada una de las i configuraciones hasta ahora obtenidas se determina un factor igual a:

$$invob_i = \frac{1/inv_i}{\sum_i 1/inv_i} \quad (4.3)$$

Dónde:

inv_i : Costo de inversión de la configuración i .
 $invob_i$: Factor de inversión de la configuración i .

2. Luego, por medio de la función de MATLAB® `rand(1)` se obtiene un número aleatorio entre 0 y 1, el cual determinará qué configuración será replicada y nuevamente agregada a la población inicial como sigue: en orden ascendente de acuerdo a la posición que poseen dentro de la matriz de configuraciones iniciales se irán sumando los factores de inversión hasta que esta suma iguale o supere el número aleatorio previamente obtenido; así la configuración a la cual corresponde el último factor de inversión sumado, será la agregada a la población inicial.

Por medio de los tres procedimientos descritos se obtiene la población inicial para el algoritmo genético, de acuerdo al tamaño de la población requerida.

4.2.2 Función de evaluación (*evaluacion*)

La función de evaluación cumple la labor de determinar el costo de inversión de cada una de las configuraciones de la población actual, además de determinar su factibilidad. Por un lado, el costo de inversión se obtiene directamente de la ponderación de las variables de inversión de cada una de las líneas por el costo de un circuito en esa línea. La factibilidad se verifica a través de la suma de la generación ficticia de cada nodo, y el costo que esta tiene asociado. De esta manera, se fija en forma arbitraria que el costo por generación ficticia no puede ser mayor a 0,005, ya que permite obtener los resultados esperados para los sistemas de prueba. Dependiendo del costo de falla del sistema, este valor implicará una cantidad determinada de potencia de falla permitida para un plan de expansión. Este valor no se fija en 0, ya que de ser así, no se logra la convergencia del algoritmo.

La evaluación se hace en base al modelo que se esté estudiando. Así, se incluye un parámetro llamado “modelo” para determinar qué tipo de sistema se está estudiando, siendo:

- Modelo=1, para el caso de una red en transporte.
- Modelo=2 para el caso de una red en DC
- Modelo=3, para una red en DC con pérdidas.

A pesar de que se ha agregado a la programación, la evaluación en el modelo de transporte no es utilizada para obtener resultados en este trabajo.

4.2.3 Función de fitness (*fitness*)

Esta función permite cuantificar la calidad de una configuración, y por lo tanto, la probabilidad que tiene de pasar sus genes a las generaciones futuras. La relación utilizada es la misma presentada en la ecuación (4.3), para definir el fitness de cada configuración de la población actual. Este valor es utilizado para discriminar cual es la mejor configuración de la población.

4.2.4 Función de selección (*seleccion*)

La selección de las configuraciones que pasarán a las siguientes etapas (recombinación y mutación) para determinar la nueva generación de individuos dependerá del valor de *fitness* de las configuraciones actuales. El proceso de selección se implementa a través del mismo mecanismo de ruleta, explicado en el punto 4.2.1. Además, un porcentaje fijo de la población pasa directamente a la siguiente función. Esto se implementa ordenando el valor de *fitness* de los individuos de la generación actual, y luego seleccionando un número de configuraciones con el mejor *fitness* igual a un porcentaje fijo del tamaño de la población.

4.2.5 Función de recombinación y mutación (*crossmuta*)

Los mecanismos de recombinación y mutación se implementan conjuntamente en una función. La recombinación trata del proceso en el cual dos individuos intercambian genes para poder generar descendientes. En [25] se presentan tres tipos de recombinación: de un punto, de dos puntos y multipunto. En este trabajo se utiliza la recombinación de dos puntos, que consiste en la selección de dos genes, los cuales definirán un tramo dentro de cada individuo. Este conjunto de genes que se encuentra entre los dos seleccionados será el trozo de información de cada configuración que será intercambiado. Se selecciona una configuración de la población actual que pasará por el mecanismo de recombinación dependiendo de la tasa de recombinación (cr), de la siguiente forma:

1. Para la configuración seleccionada (configuración 1), se genera un número aleatorio entre 0 y 1. Si este número es menor a la tasa de crossover, la recombinación se lleva a cabo. En caso contrario, se selecciona la siguiente configuración de la población.
2. Se selecciona en forma aleatoria una de las configuraciones de la población actual (configuración 2), la cual será recombinada con la configuración 1.
3. En forma aleatoria, se determinan los dos puntos que fijarán el tramo a intercambiar, determinando así dos nuevas configuraciones de la población futura.

Este procedimiento continúa hasta completar el tamaño de población requerido para la siguiente generación.

Cuando ya está lista la nueva generación de configuraciones, se aplica el mecanismo de mutación, último paso antes de comenzar una nueva iteración del algoritmo genético. A cada una de estas configuraciones se aplica la mutación, análogo al caso del crossover, dependiendo de la tasa de mutación (mr). Generando un número aleatorio, si este es menor a la tasa de mutación, el mecanismo actúa sobre el plan de expansión. El procedimiento de mutación es el siguiente:

1. Se selecciona al azar un gen de la configuración elegida.
2. Por medio de otro número elegido al azar, y utilizando un valor de 0,5 como umbral, se determina si se suma o se resta un circuito al gen seleccionado. En caso de que el número sea mayor al umbral, se sumará un circuito, mientras que, en el caso contrario, se restará uno. Es importante mencionar que en este procedimiento se resguarda que la mutación no genere un gen que sea menor a cero (un número negativo de circuitos en una línea) o mayor al límite de circuitos permitidos.

Debido a que la mutación es una de las principales características del algoritmo genético para poder escapar de óptimos locales, la tasa de mutación va aumentando a medida que avanza el algoritmo [25]. Por esta razón, en la implementación aquí presentada, se aumenta en un 50% la tasa de mutación cuando el número de generaciones alcanza un tercio del máximo de generaciones y cuando alcanza los dos tercios de este.

4.2.6 Funciones de flujo de potencia (*flujodc* – *flujodcloss*)

El cálculo del flujo de potencia de cada configuración permite determinar, por un lado, los flujos que circulan por cada una de las líneas de la red, además de la potencia que genera cada uno de los generadores para poder satisfacer la demanda del sistema. En caso de que la transmisión no sea suficiente para poder llevar la energía de un punto a otro, los generadores ficticios de cada barra se encargarán de satisfacer su demanda. Así, se puede cuantificar la “no factibilidad” de un plan de expansión por medio del costo de potencia en falla, y por lo tanto, la cantidad de potencia que deja sin servir.

La función *flujodc* resuelve el flujo de potencia por medio del planteamiento del problema (4.1) con las variaciones correspondientes, ya mencionadas en 4.1, de sus restricciones. Su implementación se hace por medio de la función de MATLAB® *linprog*, que permite resolver un problema de minimización con restricciones lineales.

Para el flujo de potencia considerando pérdidas, la función *flujodcloss* utiliza la misma herramienta del flujo DC, además del enfoque de inclusión de pérdidas presentado en [9]. Como se explicó anteriormente, este consiste en determinar el flujo de potencia DC para la red en forma normal (sin pérdidas) y luego, de los flujos obtenidos, calcular las pérdidas en cada línea con la siguiente relación:

$$P_{loss\ ij} = r_{ij}f_{ij}^2 \quad (4.4)$$

Dónde:

$P_{loss\ ij}$: Pérdidas en la línea *ij*
 r_{ij} : Resistencia de la línea *ij*

Posteriormente, las pérdidas son repartidas en partes iguales a la demanda de los nodos que se encuentran conectados por la línea correspondiente. Finalmente, con una nueva demanda, se recalcula el flujo de potencia DC, esta vez, considerando las pérdidas de la red eléctrica.

4.3 Validación del algoritmo genético propuesto

Para probar la eficacia del algoritmo propuesto, se utilizan dos sistemas de prueba, los cuales dentro de la literatura correspondiente al tema de TNEP poseen resultados conocidos. Además, se presentan los resultados obtenidos por medio de un algoritmo constructivo de manera tal de mostrar la utilidad que presta el algoritmo genético en la búsqueda de soluciones en grandes espacios de búsqueda.

4.3.1 Algoritmo constructivo para TNEP

El algoritmo constructivo propuesto cumple con el fin de servir de comparación, no solo en el resultado, sino también en el desempeño del algoritmo genético, sobre todo en términos del tiempo que le toma a este obtener una configuración óptima.

Su desarrollo es bastante simple. Primero, se calcula el flujo de potencia de la red existente para determinar el total de potencia no suministrada. Con esto, se obtiene el costo total de falla del sistema. Así, y mientras el costo de falla no disminuya de un umbral arbitrario, la expansión de la red se realiza de la siguiente forma:

1. Individualmente, a cada línea se le agrega un circuito, obteniéndose así una nueva red, a la cual se le calcula el flujo de potencia para obtener el costo de falla total del nuevo sistema. Al costo de falla del sistema se le suma el costo de inversión de la línea correspondiente, obteniéndose el costo total.
2. Aquella red nueva que posea el menor costo total, y que no supere el número máximo de circuitos que puede poseer una línea, será seleccionada para ser la nueva red existente.
3. Si el costo de falla de la nueva red existente es menor al umbral fijo, el proceso de expansión se termina. En caso contrario, se vuelve al punto 1.

A pesar de que este enfoque no permite obtener el óptimo global del problema, si se acerca bastante en redes pequeñas (como la de Garver), y es bastante conveniente en términos de tiempo de procesamiento.

4.3.2 Sistemas de validación

Los sistemas de prueba utilizados corresponden al sistema de 6 barras de Garver [24], ampliamente utilizado para testear distintos tipos de algoritmos [1] [3] [16] [27] [35] [64], y el sistema IEEE de 24 barras [1] [62] [70] [76].

Se presentan los resultados comparativos entre el desempeño del algoritmo constructivo y el algoritmo genético, además de los distintos sub-óptimos determinados por este último.

Toda la implementación de los distintos algoritmos propuestos y los datos de los sistemas utilizados se ha hecho en el programa MATLAB®, versión 7.9, debido a la simplicidad de su lenguaje de programación, y a las distintas rutinas que posee que permite un desarrollo más simple y fácil del código generado.

a) Sistema de Garver

Planteado por Garver en el año 1970 para resolver el problema de estimación de la red de transmisión eléctrica por medio de programación lineal, este sistema cuenta con: 6 barras, de las cuales 3 poseen generación y 5 tienen centros de consumo; 6 líneas existentes y 15 líneas candidatas para la expansión. Posee un total de 760 MW de demanda y una generación máxima de 1100 MW. Una salvedad importante de este sistema es que posee un nodo de generación desconectado (barra 6) del resto de la red. Los datos de esta red se encuentran en el anexo A.

La utilidad de este sistema radica en que ha sido ampliamente estudiado, y por lo tanto, su expansión óptima global es conocida. En el caso en que se permite re-despacho (que es el caso que en este trabajo se estudia) el óptimo corresponde a una inversión de US\$110, que considera agregar un nuevo circuito en la línea 3-5 y tres en la línea 4-6 [1]. Es importante mencionar que esta solución considera un modelo DC. En la referencia [1], se presenta también una solución para el sistema de Garver, pero considerando un modelo DC con pérdidas no lineales, en cuyo caso, la inversión óptima es de US\$130, agregando las mismas líneas recién mencionadas, más un circuito en la línea 2-3 (con un total de pérdidas de 48,47 MW). En el caso de considerar pérdidas lineales, la inversión asciende a US\$140, agregando dos circuitos en 2-6, uno en 3-5 y dos en 4-6 [64].

Dependiendo del tipo de algoritmo que se utilice para determinar el plan óptimo de expansión, se deberán fijar ciertos parámetros. En el caso del algoritmo constructivo, solo se requiere fijar la cantidad de potencia en falla máxima aceptable. Este valor es arbitrario, pero debe ser mayor a cero para lograr la convergencia, por lo que es fijado en 0,005, que corresponde al máximo costo de falla aceptado por el sistema. Por lo tanto, tomando en cuenta que el costo de falla se fija en 355 US\$/p.u., se aceptará un máximo de 0,000014 p.u. de potencia sin entregar, que con una potencia base del sistema de 100 MVA, corresponde a 0,0014 MVA. La utilización de este valor permite obtener resultados satisfactorios.

Para el algoritmo genético propuesto, se utilizan valores propuestos en la literatura para los distintos parámetros que definen este enfoque [25]: $k_{\max}=40$, $k_{\text{stop}}=8$, tasa de mutación $mr=0,03$, tasa de crossover $cr=0,9$, población inicial=30. En la tabla 8 se encuentran los resultados obtenidos para los dos algoritmos presentados al ser aplicados al sistema de 6 barras de Garver, en donde n_{i-j} representa el número de circuitos agregados a la línea $i-j$.

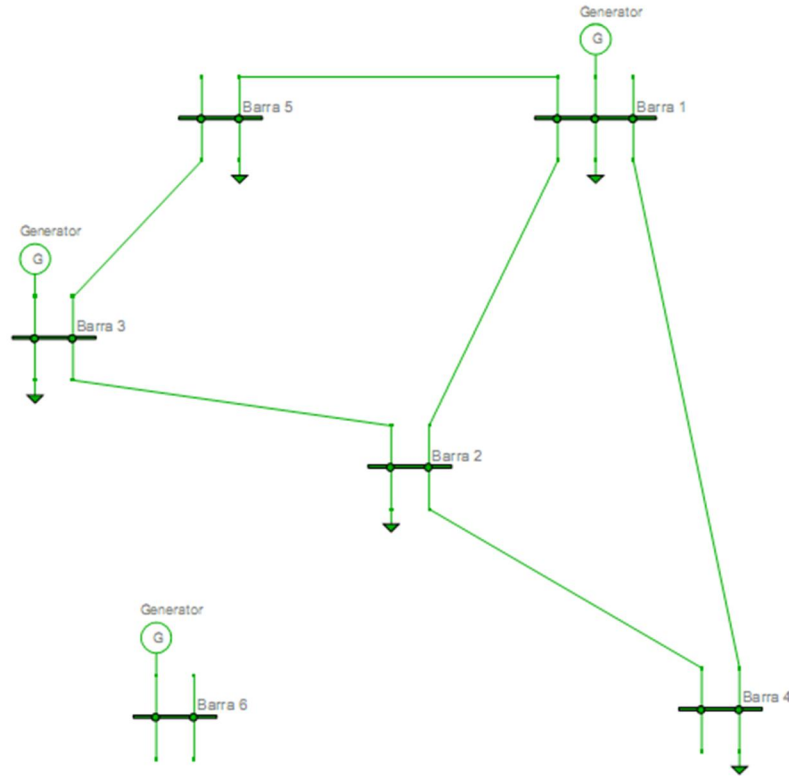


Figura 8: Diagrama unilineal del sistema de Garver

Tabla 6: Resultados obtenidos con los algoritmos propuestos para el sistema de Garver

Algoritmo		Plan de expansión óptimo	Costo [US\$]	Tiempo [s]
Constructivo	S/pérdidas	$n_{2-6} = 1, n_{3-5} = 2, n_{4-6} = 2$	130	0,76
	C/pérdidas	$n_{2-6} = 2, n_{3-5} = 1, n_{4-6} = 2$	140	1,46
Genético	S/pérdidas	$n_{3-5} = 1, n_{4-6} = 3$	110	16,97
	C/pérdidas	$n_{2-6} = 2, n_{3-5} = 1, n_{4-6} = 2$	140	33,13

En la Figura 9 se observa el diagrama unilineal de la expansión del sistema de Garver cuando se considera sin pérdidas. Las líneas rojas corresponden a los circuitos nuevos. En el anexo C, se encuentra el diagrama para la expansión de Garver con pérdidas.

Es importante indicar que el tiempo en el cual se determina el óptimo por medio del algoritmo genético es relativo a la aleatoriedad de sus mecanismos, que utiliza para pasar de una generación a otra. En otras palabras, tanto la selección, como la mutación y la recombinación se basan en la aleatoriedad para cumplir sus respectivas funciones.

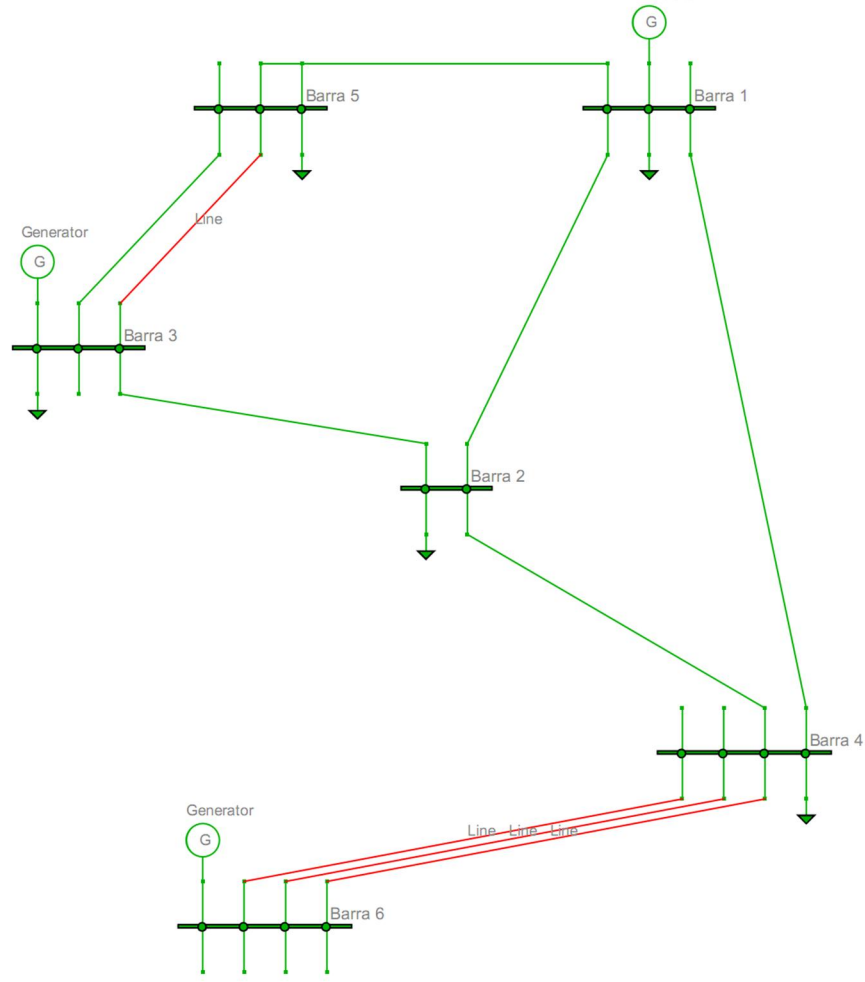


Figura 9: Diagrama unilineal del plan óptimo de expansión del sistema de Garver sin pérdidas

De los resultados de la tabla 8, se demuestra claramente que el algoritmo genético es más eficaz encontrando el óptimo global del sistema de Garver, pero a un costo de tiempo de procesamiento mucho mayor. De todas formas, los resultados obtenidos por la metaheurística son sumamente satisfactorios ya que corresponden a aquellos determinados en [1].

Para el caso con pérdidas, estas ascienden a 0,5638 p.u., es decir, 56,38 MW. Este monto es bastante cercano a los 48,47 MW obtenidos en [1]. Esta diferencia en las pérdidas se debe al modo en el cual son incluidas las pérdidas en el modelo de la red. Por un lado, en [1], la resistencia se agrega al modelo de flujo de potencia directamente en las ecuaciones de flujo, mientras que en el modelo propuesto se obtienen a partir del flujo que circula por las líneas de un modelo preliminar que no considera pérdidas (presentando además una dependencia cuadrática con el flujo).

Cabe mencionar que, con el modelo de pérdidas considerado es imposible llegar al mejor resultado propuesto por el modelo no lineal de [1]. Esto se puede comprobar por medio de la

función *flujodcloss*. Al evaluar la expansión considerando pérdidas de US\$130, se obtiene un total de potencia en falla de 0,08953 p.u. (8,953 MW).

b) Sistema IEEE 24 barras

El sistema IEEE de 24 barras (IEEE-24), corresponde a una de las áreas del sistema de prueba de confiabilidad del IEEE de 1996 [81]. Cuenta con 34 líneas ya existentes, a los cuales se pueden sumar nuevos circuitos con un límite de hasta 3 por línea. Además, existen 7 líneas nuevas que pueden ser considerados dentro de la planificación, pero que queda a criterio su utilización (en el caso de este trabajo, estas 7 nuevas líneas no son consideradas dentro de los posibles nuevos circuitos). Posee 8.550 MW de demanda repartida en 17 nodos de consumo, mientras que el total de la generación posible asciende a 10.215 MW concentrada en 10 barras de generación. Todos los nodos de este sistema de prueba se encuentran conectados a la red. El resto de la información del sistema, como datos de generación, líneas y consumos se encuentran en el anexo A.

Tal como en el caso de Garver, el sistema IEEE-24 ha sido bien estudiado, y aunque no hay registro de un óptimo global, si se encuentran buenas soluciones en la literatura pertinente. Así, en la referencia [1], para el modelo DC sin pérdidas, se presenta una solución óptima de US\$152.000.000, con la siguiente topología: $n_{6-10} = 1$, $n_{7-8} = 2$, $n_{10-12} = 1$, $n_{14-16} = 1$. En este mismo trabajo se hace referencia a [62], trabajo en el que se presenta una inversión para el mismo caso sin pérdidas de US\$224.000.000, para la topología: $n_{1-5} = 1$, $n_{3-24} = 1$, $n_{6-10} = 1$, $n_{7-8} = 2$, $n_{10-12} = 1$, $n_{14-16} = 1$. Para el caso DC con pérdidas, la misma referencia [1] entrega un óptimo con una inversión de US\$207.000.000, asociada a los nuevos circuitos: $n_{1-3} = 1$, $n_{6-10} = 1$, $n_{7-8} = 2$, $n_{10-12} = 1$, $n_{14-16} = 1$. Con el modelo no lineal de pérdidas, el total de éstas asciende a 269,01 MW.

Tabla 7: Resultados obtenidos con los algoritmos propuestos para el sistema IEEE 24 bus

Algoritmo		Plan de expansión óptimo	Costo [10 ⁶ US\$]	Tiempo [s]
Constructivo	S/pérdidas	$n_{1-2} = 1$ $n_{2-6} = 2$ $n_{7-8} = 2$ $n_{9-12} = 1$ $n_{11-13} = 1$, $n_{15-16} = 1$	275	4,11
	C/pérdidas	$n_{2-6} = 2$ $n_{3-24} = 1$ $n_{4-9} = 1$ $n_{7-8} = 2$ $n_{11-13} = 1$ $n_{14-16} = 1$ $n_{15-24} = 1$	401	8,96
Genético	S/pérdidas	$n_{6-10} = 1$ $n_{7-8} = 2$ $n_{10-12} = 1$ $n_{14-16} = 1$	152	37,15
	C/pérdidas	$n_{5-10} = 1$ $n_{6-10} = 1$ $n_{7-8} = 2$ $n_{10-12} = 1$ $n_{14-16} = 1$ $n_{16-17} = 1$	211	69,75

Para este sistema se mantiene el umbral de 0,005 como costo de falla máximo aceptable. En cuanto a los parámetros requeridos para el algoritmo genético, se utilizan los mismos que en el

sistema de Garver, a excepción de la población inicial, la cual es aumentada a 80. En la tabla 9 se observan los resultados obtenidos con los dos algoritmos propuestos.

Al igual que en el caso del sistema de Garver, los resultados determinados para el sistema IEEE-24 son completamente satisfactorios, ya que se alcanza, por un lado, para el modelo sin pérdidas, el mismo resultado entregado en [1], y para el caso con pérdidas, se obtiene un plan de expansión de US\$211.000.000,00 versus el plan entregado en [1] con pérdidas no lineales de US\$207.000.000,00. Tal como se hizo anteriormente, si este último plan de expansión es evaluado por la función de flujo de potencia DC con pérdidas, se determina que el plan no es factible con el modelo de pérdidas utilizado en este trabajo, entregando una potencia en falla de 0,1599 p.u. (15,99 MW). En el anexo C se encuentra el diagrama unilineal para el sistema IEEE-24 con la expansión correspondiente al caso sin pérdidas.

Por otro lado, las pérdidas con el modelo utilizado corresponden a 394,48 MW. A pesar de ser mayores a las pérdidas conocidas para el modelo no lineal (269,01 MW), tampoco se alejan tanto de este resultado, y tiene relación con la cantidad de flujo que circula por las líneas del sistema (hay que recordar que las pérdidas tienen una relación cuadrática con el flujo, por lo que un aumento en el flujo tiene amplia influencia en las pérdidas).

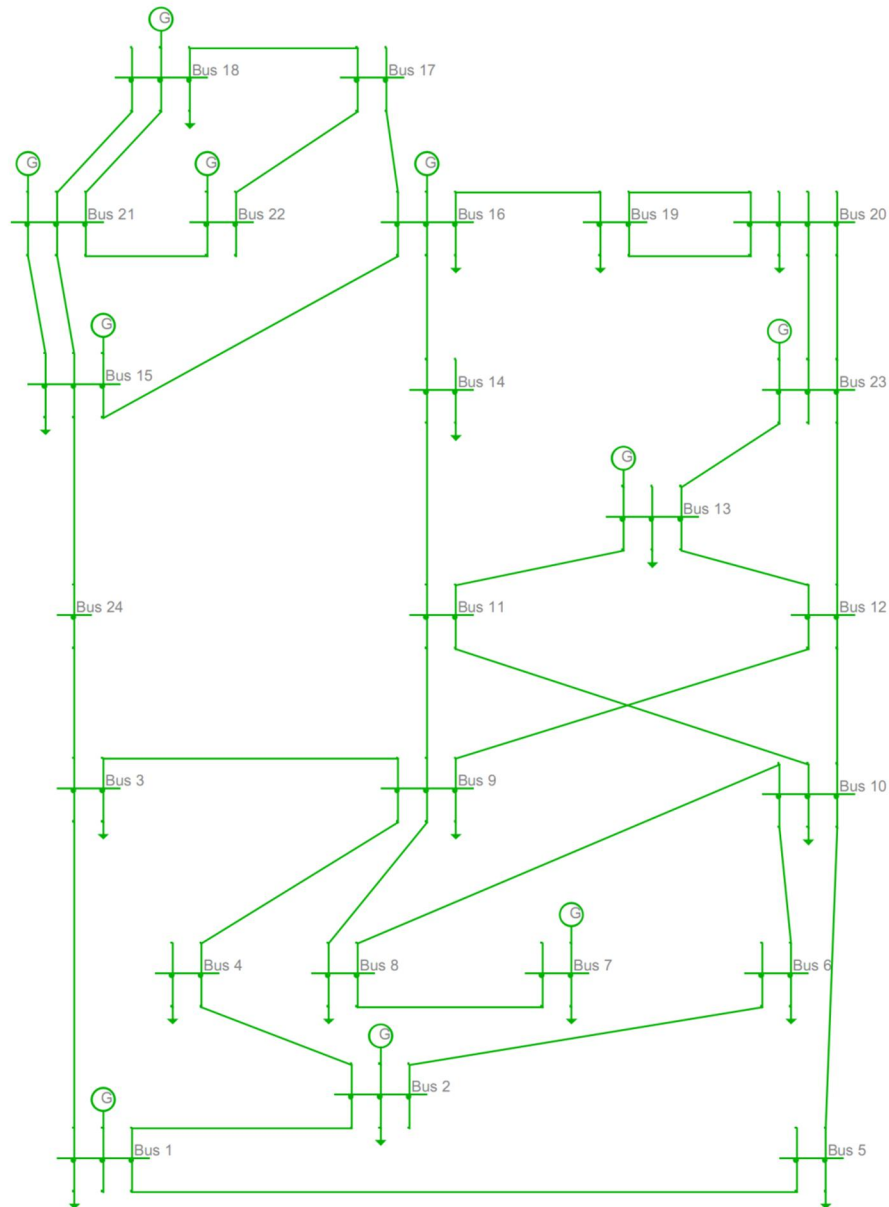


Figura 10: Diagrama unilineal IEEE 24 Barras

4.3.3 Conclusiones sobre la validación del algoritmo propuesto

El propósito de utilizar dos sistemas de prueba cuyos resultados fuesen ampliamente conocidos en la literatura fue demostrar la validez del algoritmo genético propuesto. Los resultados presentados en 4.3.2 se encargan de confirmar esto. Para el caso sin pérdidas, tanto en el sistema de Garver como en el IEEE-24 se determinan los mismos planes de expansión presentados en [1], cuyos valores de inversión son US\$110 y MUS\$152.000, respectivamente, y que corresponden a los mejores óptimos encontrados hasta ahora para estos sistemas (en el caso del sistema de Garver, se ha demostrado que este corresponde al óptimo global [53]). Cuando se incluyen pérdidas en el modelo, para el sistema de Garver se llega al mejor resultado conocido

cuando se utiliza un modelo lineal de pérdidas, y que posee a un valor de inversión de US\$140. Incluso, tal como menciona Romero en [1], la solución en la cual el valor de inversión es de US\$130 es factible, pero solo cuando se considera una cantidad significativa de energía no suministrada, lo cual quedó demostrado también en este trabajo (esta solución lleva a tener prácticamente 9 MW no suministrados). Para el sistema IEEE-24, la situación es la misma, y aunque la solución óptima entregada en la referencia antes mencionada no es alcanzada (nuevamente, dado que no es factible con el modelo lineal de pérdidas y lleva a que el sistema se desprenda de parte de la carga) si se acerca bastante, determinándose un plan cuyo costo de inversión es de MUS\$211.000 (versus los MUS\$207.000 del plan al que se hace referencia).

A lo anterior hay que sumar la comparación realizada con el algoritmo constructivo propuesto, que busca mostrar la efectividad y eficiencia superior de los algoritmos metaheurísticos en la exploración del universo de soluciones. Esto último queda claro si se comparan los resultados presentados en la tabla 8 para el sistema de Garver y en la tabla 9 para el sistema IEEE-24, dado que, aunque la inversión en los planes de expansión determinados para el primer caso son similares (en el caso con pérdidas incluso se llega a la misma configuración), aquellos obtenidos para el segundo sistema son absolutamente diferentes, entregando el algoritmo constructivos valores de inversión de casi el doble de valor de aquellos entregados por el algoritmo genético.

En consecuencia, además de comprobar la superioridad de los algoritmos metaheurísticos por sobre los algoritmos constructivos, queda verificada la validez del algoritmo propuesto en este trabajo para encontrar una solución óptima para el problema de TNEP en sistemas de tamaño pequeño y mediano.

4.4 Resolución del problema de TNEP considerando equipos FACTS

Los equipos FACTS al ser incluidos en el problema de planificación de la expansión del sistema de transmisión tienen principalmente dos efectos sobre el modelo de la red:

- a) Cambio en algún parámetro o variable de la red.
- b) Variación del límite de transmisión.

Como se menciona en el capítulo 3, los equipos que son más utilizados para resolver el problema de TNEP son los compensadores en serie y los equipos desfasadores. En el caso de los primeros, estos tienen un efecto directo sobre la reactancia de la línea en la cual son instalados, aumentándola o disminuyéndola según se requiera, mientras que los desfasadores actúan sobre la diferencia del ángulo de fase entre las barras conectadas por la línea en cuestión.

Por otro lado, gracias a la mejora en términos dinámicos que brindan los equipos FACTS, puede alcanzarse el límite térmico de las líneas de transmisión, superando las barreras de estabilidad (límite de tensión y límite de estabilidad transiente) que normalmente impiden su mejor utilización.

Dado que los desfases pueden ser modelados en forma equivalente a los compensadores en serie por medio de una variación en la reactancia de la línea [74], en este trabajo se consideran equipos de compensación en serie como alternativa de expansión para el sistema, además de los elementos tradicionales, para poder analizar los efectos de utilizar estos dispositivos en el problema de TNEP.

4.4.1 Modelo de la red eléctrica con equipo de compensación serie

Los equipos de compensación serie actúan sobre el sistema eléctrico de diferentes formas, interfiriendo sobre distintos parámetros y/o variables de la red. A pesar de esto, cuando se considera un modelo DC de la red, toman relevancia la variación de la reactancia y el aumento del límite de transmisión de potencia de la línea como efectos a considerar dentro de la modelación del equipo FACTS. En general, otros efectos dinámicos de estos dispositivos guardan relación más con el desempeño operativo instantáneo del sistema, y quedan fuera del alcance de este trabajo.

El cambio de la reactancia de la línea dependerá del nivel de compensación que ofrezca el dispositivo instalado, así como también el costo de inversión depende de este factor. Luego, si se considera que $komp$ es el grado de compensación que introduce el equipo serie, su costo y el cambio en la reactancia quedan como sigue:

$$C_{facts}(k) = c_{facts} \cdot X_C \cdot \bar{f}^2 / S_{base} \quad (4.5)$$

$$\Delta X(k) = komp \cdot X = X_C \quad (4.6)$$

Donde

c_{facts}	:	Costo específico de un equipo FACTS (\$/kVA)
S_{base}	:	Potencia base del sistema en MVA
\bar{f}	:	Límite de flujo de la línea
X	:	Reactancia de la línea

Así, considerando las ecuaciones (4.5) y (4.6) y el cambio de capacidad de transmisión de la línea a su límite térmico, el modelo de la red y el problema que se busca resolver, quedan representados por las ecuaciones (4.7).

$$\text{Min } c_g P_g + c_r P_r + cx + C_{facts}(komp) \quad (4.7)$$

s. a

$$P_g - I_1 \cdot f_1 - I_2 \cdot f_2 = P_d \quad (4.7a)$$

$$f_1 - \gamma_1^* \cdot I_1^t \cdot \theta_1 = 0 \quad (4.7b)$$

$$-\bar{f}_1^* \leq f_1 \leq \bar{f}_1^* \quad (4.7c)$$

$$x \cdot (f_2 - \gamma_2^* \cdot I_2^t \cdot \theta_2) = 0 \quad (4.7d)$$

$$-x \cdot \bar{f}_2^* \leq f_2 \leq x \cdot \bar{f}_2^* \quad (4.7e)$$

$$0 \leq P_r \leq P_d \quad (4.7f)$$

$$P_g^{\min} \leq P_g \leq P_g^{\max} \quad (4.7g)$$

$$x \in N \cup \{0\} \quad (4.7h)$$

$$0 \leq komp \leq komp_{\max} \quad (4.7i)$$

Donde

γ_1^*, γ_2^*	:	Admitancia de línea con variación por equipo FACTS ($\gamma_a^* = \gamma_a / (1 - komp)$)
\bar{f}_1^*, \bar{f}_2^*	:	Límite variable de flujo por la línea
$komp_{\max}$:	Grado máximo de compensación del equipo FACTS

Cabe mencionar que el grado de compensación $komp$ corresponde a una variable dentro del problema.

El límite de flujo por cada línea dependerá de si hay un equipo FACTS conectado a ésta o no. Si no hay ningún equipo, el límite se mantendrá igual, mientras que si se incluye uno de estos equipos, el límite cambiará al límite térmico de la línea.

4.4.2 Algoritmo genético considerando equipos FACTS como alternativas para la expansión

El algoritmo genético propuesto para resolver el TNEP presentado en el punto 4.2, actúa sobre la base de que el modelo DC de la red eléctrica es lineal. Como se puede ver en el problema (4.7), tanto las restricciones de cálculo de flujos (por líneas actuales y candidatas) como los límites de flujo de las líneas candidatas son no lineales, debido a que existe la multiplicación de dos o más variables del problema (en la restricción (4.7b) se pondera el ángulo de fase con el grado de compensación incluido implícitamente en la admitancia, mientras que en (4.7e) se multiplican el grado de compensación con la variable de decisión de inversión en líneas nuevas).

Para resolver esta problemática, se recurre al desacople de los subproblemas de inversión y operación, es decir, se resuelven por separado el problema de que líneas y equipos FACTS se agregarán al sistema y el problema de determinar la factibilidad técnica de la inversión. Este

enfoque es utilizado en la referencia [66], en la cual por medio de la descomposición de Benders se resuelve primero el problema de inversión, para luego probar la factibilidad del plan obtenido y generar nuevas restricciones que se sumarán al problema de inversión, de modo que a través de un proceso iterativo, se obtenga una solución factible.

En general, se mantiene la estructura de la metaheurística propuesta y solo se realizan ciertos cambios para poder adecuar el funcionamiento del algoritmo.

Tal como se explicó en el capítulo anterior, se reciben los datos del sistema y se fijan los parámetros del algoritmo genético. A esto se suma el costo específico de los equipos FACTS (C_{facts}) y la cantidad máxima de estos que se quiere agregar (n_{facts} , que corresponde a un porcentaje del número de líneas del sistema). Luego, se determina la población inicial. Cada individuo de la población contará con tres partes:

- a) Un vector de tamaño $N_{facts} = n_{facts} * N^{\circ} \text{Lineas}$ (vector de ubicación), cuyos valores referencian cada uno una línea distinta del sistema (no se repiten elementos)
- b) Otro vector de tamaño N_{facts} (vector de compensación), con distintos valores de factor de compensación ($komp$), que toman cantidades discretas entre 0 y $komp_{m\acute{a}x}$.
- c) Un vector de tamaño del número de líneas del sistema, que indica la cantidad de nuevas líneas que se instalarán en casa pasaje de la red.

Una modalidad similar para implementar los equipos FACTS en el problema de TNEP con algoritmo genético se encuentra en la referencia [82], con la salvedad de que se consideran distintos equipos FACTS, no se incluyen líneas como posibilidad de expansión del sistema y se utiliza un modelo AC de la red.

Es importante señalar que los vectores de ubicación y compensación se obtienen de forma independiente al vector de líneas nuevas, y viceversa. Para esto se implementa la función pob_{facts} para los primeros, y se mantiene la utilización de la función $pob_inicial$ para el segundo.

Los vectores de ubicación y compensación determinan en que líneas posiblemente se instalen equipos FACTS y cuál será el monto de compensación que estos incluirán (correlativamente entre ambos vectores de acuerdo a la posición dentro de cada vector). En términos prácticos, los valores de estos vectores afectan el límite de flujo y la reactancia de las líneas, siempre y cuando el valor del vector de compensación sea mayor que cero. Así, por ejemplo, si los primeros elementos de los vectores de ubicación y compensación son n y m , respectivamente, esto significa que el límite de flujo de la línea n cambiará a su límite térmico, mientras que la reactancia de la línea n cambiará de acuerdo al nivel de compensación m introducido por el equipo FACTS. Además, se suma el costo de inversión de agregar un dispositivo de compensación en la línea en cuestión. Esto se puede ver en las ecuaciones (4.8), (4.9) y (4.10).

$$\bar{f}_n' = \bar{f}_{t\acute{e}rmico_n} \quad (4.8)$$

$$X_n' = X_n \cdot (1 - m) \quad (4.9)$$

$$C_{facts}(m) = c_{facts} \cdot X_n \cdot (1 - m) \cdot \bar{f}_n'^2 / S_{base} \quad (4.10)$$

A partir de estos cambios, el algoritmo mantiene su estructura y funcionamiento con algunas variaciones puntuales:

- La evaluación de cada individuo considera el costo de inversión por las líneas, sumado al costo de inversión de los equipos FACTS.
- Tanto la función de selección como la de recombinación y mutación son aplicadas a los tres vectores mencionados. Esta última verifica que los nuevos vectores de ubicación generados por estos mecanismos cumplan con la condición de que dentro de cada uno, no existan elementos iguales.

4.4.3 Aplicación del algoritmo propuesto en los sistemas de prueba considerando equipos FACTS

Tal como en el capítulo de validación del algoritmo propuesto, los sistemas de prueba considerados son el sistema de Garver de 6 barras y el sistema IEEE de 24 barras.

A continuación se presentan los resultados obtenidos por el algoritmo genético previamente determinados y aquellos obtenidos al considerar la utilización de equipos FACTS, para los casos con y sin pérdidas.

El costo específico de los equipos FACTS c_{facts} se fija en 100 US\$/p.u. para ajustarlo al nivel de costo de las líneas, mientras que el grado máximo de compensación $komp_{m\acute{a}x}$ es 0,4 [66]. El límite térmico de las líneas se determina como su límite nominal aumentado en un 12% [43]. Por último, el número de equipos FACTS n_{facts} es de 0,2, es decir, el número máximo de elementos que pueden ser instalados corresponde al 20% del número total de líneas del sistema (existentes y candidatas).

a) FACTS en el sistema de Garver

Los parámetros del algoritmo genético, en general, se mantienen respecto de la etapa de validación, cambiando solo el tamaño de la población para verificar si se pueden obtener mejores soluciones. Los planes de expansión determinados para el sistema de Garver, tanto en el caso sin

pérdidas, como con pérdidas, para el algoritmo propuesto con y sin FACTS se encuentran en la tabla 10.

Tabla 8: Resultados obtenidos con algoritmo genético considerando equipos FACTS para el sistema de Garver

Algoritmo		Plan de expansión óptimo (FACTS agregado)	Costo Líneas [US\$]	Costo FACTS [US\$]	Tiempo [s]
Genético	S/pérdidas	$n_{3-5} = 1 \ n_{4-6} = 3$	110	0	16,97
	C/pérdidas	$n_{2-6} = 2 \ n_{3-5} = 1 \ n_{4-6} = 2$	140	0	33,13
Genético c/FACTS	S/pérdidas	$n_{2-6} = 1 \ n_{3-5} = 1 \ n_{4-6} = 2$ ($k_{2-3} = 0,1$)	110	3	24,46
	C/pérdidas	$n_{2-6} = 1 \ n_{3-5} = 1 \ n_{4-6} = 2$ ($k_{2-3} = 0,2 \ k_{2-6} = 0,1 \ k_{4-6} = 0,1$)	110	13	48,72

La diferencia en el monto de las pérdidas obtenidas para cada caso es mínima, siendo 0,5638 p.u. las pérdidas para el algoritmo genético sin FACTS y de 0,563 p.u. al considerar equipos FACTS.

De los resultados presentados en la tabla 10 una de las diferencias que más resalta es el cambio en el costo de inversión en líneas para el caso con pérdidas, pasando de una inversión de US\$140 a US\$110 al considerar equipos FACTS (sumando el costo de estos equipos el costo de inversión se eleva a US\$123, aún menor que el caso sin FACTS). Es claro que este menor costo de inversión en líneas se debe a la intervención de los equipos FACTS, dado que al aumentar el límite de flujo por las líneas en las cuales son conectados, la capacidad nueva resulta suficiente para el flujo que se necesita transportar. Esto se puede ver en forma más clara y gráfica a partir de los datos de flujo de potencia obtenidos para los planes determinados en la tabla 10 (todos los datos de flujos de potencia para los sistemas de prueba estudiados se encuentran en el Anexo B). De la tabla B1 se observa que para el caso en que no se considera la inclusión de equipos FACTS, la línea 2-6 posee un flujo de 1,64 p.u., permitido por las dos líneas agregadas. En cambio, al agregar un equipo de compensación en esta línea, el límite de flujo aumenta a 1,2 p.u., lo que es suficiente para transportar los 1,114 p.u. de potencia que circula por la única línea agregada entre las barras 2 y 6, ayudado también por el aumento en los límites de las líneas 2-3 y 4-6, y evitando por lo tanto la instalación de una línea extra. En este sentido, la adición de equipos FACTS y el aumento que provocan en la capacidad de transmisión de la línea permite una redistribución de flujo por el sistema de manera tal que hace innecesario agregar una mayor cantidad de circuitos.

Respecto del caso sin pérdidas, se observa que no se logra determinar un plan de expansión mejor que el ya encontrado, al menos en su costo de inversión. De todas formas, la inclusión de un equipo FACTS hace factible un plan diferente de expansión que, sin la existencia de este dispositivo, no sería una solución válida para el sistema de Garver. En este sentido, los equipos FACTS permiten una mayor flexibilidad de las posibles soluciones que puede tener el problema, característica que puede resultar interesante si las condiciones bajo las cuales se está planificando cambian, aumentando así la adaptabilidad de la red.

b) FACTS en el sistema IEEE de 24 buses

Al igual que en el caso del sistema de Garver, se mantienen los parámetros utilizados para el algoritmo genético, cambiando solo el tamaño de la población. En la tabla 11 se encuentran los resultados para el sistema IEEE de 24 buses.

En este sistema se observa una diferencia en el monto de las pérdidas más significativa. Esto se debe a que el flujo total que circula, es mucho mayor que para el de Garver, y por consiguiente, proporcionalmente también lo son las pérdidas. En el caso sin FACTS el valor de las pérdidas corresponde a 3,9448 p.u., es decir, 394,48 MW, mientras que cuando se instalan equipos FACTS, las pérdidas ascienden a 3,7532 p.u., que corresponden a 375,32 MW. Esta diferencia, que ronda en el 4,8%, guarda cierta relación con la cantidad de flujo por las líneas del sistema, que presenta una diferencia de 3,9% entre el caso sin FACTS y el caso con FACTS.

Tabla 9: Resultados obtenidos con los algoritmos propuestos considerando FACTS para el sistema IEEE 24 bus

Algoritmo		Plan de expansión óptimo (FACTS agregado)	Costo Líneas [10 ⁶ US\$]	Costo FACTS [10 ⁶ US\$]	Tiempo [s]
Genético	S/pérdidas	$n_{6-10} = 1$ $n_{7-8} = 2$ $n_{10-12} = 1$ $n_{14-16} = 1$	152	0	37,15
	C/pérdidas	$n_{5-10} = 1$ $n_{6-10} = 1$ $n_{7-8} = 2$ $n_{10-12} = 1$ $n_{14-16} = 1$ $n_{16-17} = 1$	211	0	69,75
Genético c/FACTS	S/pérdidas	$n_{6-10} = 1$ $n_{7-8} = 1$ $n_{10-12} = 1$ $n_{14-16} = 1$ ($k_{1-5} = 0,1$ $k_{3-24} = 0,1$ $k_{5-10} = 0,1$ $k_{6-10} = 0,1$ $k_{7-8} = 0,1$)	136	27	90,90
	C/pérdidas	$n_{6-10} = 1$ $n_{7-8} = 2$ $n_{10-12} = 1$ $n_{14-16} = 1$ ($k_{1-2} = 0,2$ $k_{3-24} = 0,1$ $k_{7-8} = 0,1$)	152	20	178,22

Por otra parte, a diferencia de los resultados obtenidos para el sistema de Garver, tanto para plan obtenido sin pérdidas como también aquel que considera pérdidas, el costo de inversión en las líneas disminuye. De todas formas, el costo total de inversión en el caso sin pérdidas considerando FACTS sigue siendo mayor. A pesar de lo anterior, resulta interesante destacar que los planes determinados en el caso con FACTS resultan ser subconjuntos de aquellos obtenidos cuando estos dispositivos no son considerados, lo cual de una u otra forma da cuenta de que estos equipos permiten aprovechar mejor la capacidad que posee el sistema como conjunto para transportar energía desde los centros de generación a los centros de consumo, por medio de la redistribución de los flujos como consecuencia del aumento de la capacidad de transmisión de ciertas líneas.

Por otro lado, en lo que respecta al tiempo de procesamiento, se mantiene una razón cercana a 2:1 entre el tiempo para el caso con pérdidas y el caso sin pérdidas, mientras que también se ve un claro aumento del tiempo cuando se pasa de un sistema sin FACTS a otro con FACTS. Esto

último se debe a que el tamaño de la población se aumentó para el caso con FACTS, por lo tanto la cantidad de información que debe ser procesada es mayor, trayendo como consecuencia un aumento en el tiempo que requiere el algoritmo para determinar una solución óptima.

4.4.4 Conclusiones sobre la utilización de equipos FACTS en los sistemas de prueba

Primero que todo, los resultados obtenidos para el problema de TNEP por medio del algoritmo genético propuesto aplicado a los sistemas de prueba y considerando equipos FACTS, muestran la utilidad y efectividad de estos dispositivos en la disminución del valor de inversión en nuevos circuitos.

Aunque en el sistema de Garver, cuando no se consideran pérdidas de la red, el valor de inversión en líneas no resulta menor en el caso con FACTS, si se obtiene un plan distinto del mínimo global ampliamente conocido, dando cuenta de que al utilizar estos equipos no solo puede existir una ganancia en términos de la disminución de la inversión, sino que también la planificación mejora en la flexibilidad de las posibles soluciones que puede tener el problema de TNEP. Esto le brinda una mayor adaptabilidad y flexibilidad a la red, teniendo en cuenta el comportamiento dinámico de las condiciones (variación de las condiciones de mercado, problemas con servidumbres, etc.) que rodean el ejercicio de seleccionar un plan de expansión adecuado.

Distinta es la situación en todos los otros casos estudiados, es decir, en el sistema IEEE-24 cuando no se consideran pérdidas, y en los casos en que si se incluyen las pérdidas en el modelo tanto para este sistema como para el de Garver. En estos, el valor de inversión en líneas de los planes determinados, respecto de los resultados del algoritmo genético cuando los equipos FACTS no son utilizados, es menor. Para el sistema de Garver la inversión en líneas disminuye de US\$140 a US\$110, siendo incluso menor al mejor resultado determinado cuando se consideran pérdidas (aunque modeladas con una función no lineal) cuyo valor asciende a US\$130 [1]. Para el IEEE-24, en el caso sin pérdidas la inversión disminuye de MUS\$152.000 a MUS\$136.000 cuando se utilizan FACTS, y de MUS\$211.000 a MUS\$152.000 cuando el modelo incluye pérdidas. En estos tres casos, los nuevos planes corresponden a subconjuntos de las expansiones determinadas sin FACTS, mostrando que una mejor utilización de las capacidades reales de las líneas existentes y de las nuevas permite evitar incurrir en una sobreinstalación de circuitos, y por lo tanto, en una sobreinversión en elementos que en el futuro puedan ser subutilizados. En este sentido, los equipos FACTS por medio de la mejora de los límites de transmisión de las líneas en las cuales son instalados, permiten una redistribución de los flujos del sistema que evita la necesidad de nuevos circuitos y, por lo tanto, mejorando la ocupación de la red.

En consecuencia, por medio de los sistemas de prueba utilizados y los resultados determinados, se observa que al incluir los equipos FACTS en el problema de TNEP, en general, el valor de inversión en líneas disminuye (en el peor de los casos, se mantiene) respecto de los obtenidos sin considerar estos dispositivos, generando incluso, en algunos casos, costos totales de inversión

(líneas más FACTS) menores. Cabe mencionar que esto último es relativo al valor que tengan estos equipos, aunque hay que recordar que con la evolución de la electrónica de potencia (base fundamental de los FACTS), su costo tiende a disminuir a medida que se avanza en este campo. Además, hay una cantidad importante de características y mejoras que no son valorizadas en este trabajo (mejoras en la estabilidad del sistema, menor impacto ambiental por la no instalación de nuevas líneas, mayor flexibilidad, entre otras), las cuales hacen aún más atractivo el uso de FACTS.

Por último, estos resultados no solo permiten analizar el efecto que tienen los equipos FACTS sobre los planes de inversión, sino que también validan el modelo utilizado para incluir estos dispositivos al problema de TNEP. Esto se puede concluir dado que los planes de expansión que se determinan son soluciones factibles para el sistema, es decir, se cumple con la labor de satisfacer la demanda de los centros de consumo y, por lo tanto, no existe carga no suministrada, condición que define la factibilidad de una configuración en este trabajo.

4.5 Comentarios sobre el desempeño del algoritmo propuesto

A lo largo de este capítulo se ha descrito el algoritmo genético propuesto para resolver el problema de TNEP, para luego determinar su validez por medio de sistemas de prueba que poseen resultados ampliamente conocidos, y finalmente incluir los equipos FACTS como posibles elementos a conectar a la red y comparar la expansión que se realiza al considerar estos dispositivos y no en la planificación.

Los resultados obtenidos de la aplicación del algoritmo propuesto a los sistemas de prueba dejan en evidencia la efectividad que posee el algoritmo para determinar planes óptimos de expansión para sistema de pequeño y mediano tamaño. Por un lado, en el caso sin pérdidas, tanto para el sistemas de Garver como para el sistema IEEE – 24, las soluciones encontradas coinciden con los planes conocidos como óptimos, tanto en forma (ubicación y cantidad de nuevos elementos) como en valor de inversión. Cuando se incluyen las pérdidas en el modelo de la red eléctrica, los planes encontrados son levemente mayores en costo de inversión que aquellos presentados como óptimos en la literatura, lo que se debe a que la forma en la cual se incluyen las pérdidas es por medio de un modelo no lineal (implica la multiplicación de dos variables del problema).

Todos estos resultados, además de validar la efectividad del algoritmo propuesto, también dan cuenta de la confiabilidad de la modelación implementada para el sistema eléctrico, es decir, el flujo de potencia asociado y el despacho óptimo de la generación de acuerdo a sus costos permiten definir correctamente la factibilidad (si hay o no demanda sin suministrar por efecto de limitaciones de transmisión) de cada plan, permitiendo al algoritmo avanzar entre soluciones que son a la vez “útiles” y de menor costo de inversión. En este sentido, el modelo lineal de pérdidas implementado, y que forma parte del objetivo principal de este trabajo, lleva al algoritmo a encontrar resultados satisfactorios que al menos coinciden con aquellos encontrados en la literatura. Además, comparativamente con el modelo no lineal presentado en [1], la cantidad de

pérdidas es similar, o al menos, del mismo orden de magnitud, y respecto del total de potencia que demanda el sistema no presenta una variación mayor al 1,5% entre ambos casos.

Los resultados obtenidos al incluir equipos FACTS como elemento de expansión de los sistemas de prueba muestran, en general, una disminución en los costos totales de inversión y/o en la inversión en líneas. En términos simples, dado que los FACTS conectados a una línea aumentan la capacidad de transmisión de ésta a su límite térmico, la necesidad de nuevos circuitos se reduce ya que este diferencial permite cubrir el requerimiento de flujo de la línea en cuestión. A esto, también se suma un efecto por redistribución de los flujos en el sistema gracias a un cambio en el perfil de generación, asociado también a una disminución en el costo total de generación. De todas formas, la capacidad de disminuir la inversión depende de la red que se quiere expandir. Por ejemplo, en el caso del sistema de Garver, cuando no se consideran pérdidas eléctricas del sistema, no existe una disminución en la inversión en líneas, mientras que en el sistema IEEE – 24, la inversión en líneas es menor que la contraparte sin FACTS, a pesar de que la inversión total es mayor al incluir estos equipos. Ahora, cuando se incluyen las pérdidas, en ambos sistemas de prueba se observa que la inversión total al incluir FACTS es menor que al no contar con ellos. Esto muestra de una u otra forma que los equipos FACTS no son una solución para la congestión si se consideran en forma solitaria, sino que van de la mano con la inclusión de elementos tradicionales a la red, y su aporte real radica en la posibilidad que le entrega al algoritmo de encontrar otras soluciones que implican una menor inversión en líneas pero que sin FACTS no serían factibles. Ejemplo claro de esto es el plan de expansión con equipos FACTS determinado para el caso con pérdidas para el sistema IEEE – 24, que en la inversión en líneas es igual al plan determinado para el caso sin pérdidas y sin FACTS, plan que no sería factible sin estos equipos.

En conclusión, por medio de los resultados presentados, se logra validar la capacidad del algoritmo propuesto para determinar planes óptimos de expansión para sistemas de pequeño y mediano tamaño, y adicionalmente, se verifica que el modelo implementado para la red eléctrica y el problema de despacho de potencia y flujo de potencia tienen un desempeño satisfactorio y adecuado para la resolución del problema de TNEP.

Capítulo 5 Aplicación en el modelo reducido del SIC

La aplicación del algoritmo propuesto a los sistemas de prueba muestra la eficacia del método para encontrar una solución óptima para el problema de TNEP en redes pequeñas y de mediano tamaño. Con el fin de probar este algoritmo en un sistema de mayor tamaño, se utiliza un modelo del Sistema Interconectado Central de Chile.

El SIC es un sistema de más de 1000 barras de tensiones mayores a 40 kV [84], que cubre el territorio desde Tal Tal hasta Quellón, y que durante el 2011 presentó una generación bruta de 46.142 GWh para una capacidad instalada de 12.715 MW y una demanda máxima de 6.881 MW [85].

El gran número de barras del SIC provee un universo de planes de expansión posibles para resolver el problema de TNEP inmanejable (hay que recordar que el número de elementos de este universo crece exponencialmente con el tamaño del sistema) [6], razón por la que se utiliza un modelo reducido del Sistema Interconectado Central.

5.1 Modelo reducido del Sistema Interconectado Central

El modelo reducido utilizado en este trabajo se basa en el modelo presentado por M. Neicún en su trabajo de memoria [84], el cual corresponde al sistema SIC modelado en 50 barras para una proyección de la red (en generación, demanda y transporte) al año 2021.

A pesar de que los datos utilizados en [84] provienen del Informe Técnico Definitivo de Precio de Nudo de abril de 2011, no son mayores las diferencias con su símil del año 2012. En este sentido, el modelo desarrollado en el presente trabajo solo cambia en la demanda de potencia total del sistema, manteniendo los proyectos de generación y transmisión considerados en el modelo base. Por otro lado, la información faltante se obtiene de las bases de datos presentes en el ETT 2011 – 2014 [56] y en el sitio web del CDEC – SIC. Todos los datos del modelo estudiado en este trabajo se encuentran en las tablas presentadas en el anexo D.

5.1.1 Centrales generadoras

El modelo base considera todas aquellas centrales existentes de potencia instalada mayor a 25 MW, excepto aquellas ubicadas en la Región Metropolitana para las cuales el criterio baja a 20 MW. Respecto de las centrales en construcción y aquellas recomendadas por la CNE en el informe, se incluyen aquellas que tengan una potencia igual o mayor a los 50 MW y que tengan fecha de puesta en servicio entre los años 2011 – 2020. Aunque en el modelo utilizado en este trabajo el horizonte en estudio es el año 2022, para el año 2021 no se presentan proyectos nuevos (cabe hacer el alcance de que en el ITDNP de 2011 uno de los módulos hidroeléctricos de

Hidroaysén se considera que entrará en servicio el año 2020, mismo módulo que en el informe de 2012 entra en servicio el año 2021, debido al retraso en el comienzo de las obras de construcción de este proyecto).

Cada central tendrá un costo variable de generación de energía en US\$/MW, que dependerá principalmente del tipo de energético que utilice para la producción. De esta manera, serán las centrales térmicas las que tendrán un costo mayor a cero mientras que las centrales hidroeléctricas, tanto de pasada como de embalse (se omite el costo oportunidad del agua) y las centrales eólicas tendrán un costo de generación nulo.

Luego, a partir de la información del punto de conexión real de cada central, presentado por el CDEC – SIC, se utilizan dos criterios para asignar el punto de conexión dentro del modelo reducido:

1. Para aquellas centrales a las cuales se les conoce su punto de conexión real, este es reasignado a aquella barra geográficamente más cercana (determinado a partir del mapa del SIC [88]) de igual tensión o inmediatamente superior.
2. En el caso de que no se conozca el punto de conexión real (caso de las centrales futuras), estas son conectadas a la barra más cercana geográficamente.

Conocida la barra a la cual está asociada cada central, se determina el costo variable de generación en cada barra por medio de un promedio ponderado de los costos individuales de cada central conectada a dicha barra de acuerdo a la respectiva potencia nominal. De forma similar, la potencia máxima de generación en cada barra corresponderá a la suma de las potencias de las centrales conectadas a dichas barras.

Finalmente, se considera un costo de falla único para todas las barras del sistema, el cual se fija en 517,99 US\$/MWh y que corresponde al valor único representativo de costo de falla, el cual se denomina como costo de racionamiento (fijado en el ITDNP 2012 [57]).

5.1.2 Sistema de transmisión

Como se mencionó anteriormente, los elementos del sistema de transmisión del modelo base son los mismos que los utilizados en el modelo en estudio. Luego, conocidas las líneas que conectan las barras del sistema y los transformadores, a partir de la base de datos del CDEC-SIC, se obtienen la información de la capacidad, límite térmico, resistencia y reactancia de estos elementos.

Es importante mencionar que no existen grandes variaciones entre la capacidad de líneas y transformadores y su respectivo límite térmico, razón por la que en las simulaciones realizadas al incluir equipos FACTS, se aumenta la capacidad de las líneas en las cuales se conecta el equipo en un porcentaje fijo en vez de aumentarlo al límite térmico real.

En cuanto al costo de inversión de las líneas y transformadores, se obtuvo el AVI (anualidad de valor de inversión) y el COMA (costo de operación, mantenimiento y administración), elementos que permiten definir un valor de inversión de los equipos en cuestión, de un número limitado de elementos. Por esta razón, para determinar el valor de inversión del resto de los elementos se genera un valor aleatorio comprendido entre el mínimo y el máximo valor de inversión conocidos. Es evidente que los valores determinados para cada elemento no son representativos de la realidad, pero esto no influye mayormente, dado que el objetivo de este trabajo no es determinar un plan de expansión real para el SIC, sino probar la utilidad del algoritmo propuesto en un sistema real y de mayor tamaño, además de estudiar la utilidad de los equipos FACTS dentro del problema de TNEP para este tipo de redes. De todas formas, y con el objetivo de comparar, se establece un segundo vector de costo de inversión en líneas, el cual relaciona el valor de inversión con el largo del tramo, por medio de costos modulares que dependen de la tensión de la línea. Estos costos modulares se determinan en base a los valores de inversión de los proyectos presentados en el informe definitivo de precio de nudo [57].

Por último, para obtener una solución factible del sistema para la demanda proyectada al año 2022, se fija en 3 el número máximo de elementos por pasaje del sistema (número de circuitos por línea o número de transformadores por subestación de transformación), excepto para la línea Ancoa – Alto Jahuel, para la cual el máximo se fija en 4 (esto se debe a que en el ITDPN de 2012 se recomienda construir hasta el cuarto circuito de esta línea).

5.1.3 Proyección de la demanda

El modelo base considera una demanda alta y otra baja. Para poder llevar los consumos a los valores requeridos para el año 2022, se utiliza el porcentaje de aumento de la demanda estimado por la CNE para ese año, que corresponde a 4,95% [57]. Así, ponderando por este valor las demandas por barra para ambos casos, se obtienen los consumos necesarios.

5.2 Aplicación del algoritmo al modelo reducido del SIC

Como para el caso de los sistemas de validación, el algoritmo propuesto es aplicado al modelo reducido de 50 barras del SIC para 4 casos: sin equipos FACTS y sin pérdidas, sin equipos FACTS y con pérdidas, con equipos FACTS y sin pérdidas, y finalmente, con equipos FACTS y con pérdidas.

El modelo reducido proyectado a 2022 tiene una demanda total de potencia de 11.277 MW (en el caso de alta demanda, que es el único que se estudiará dado que se busca el escenario más crítico de demanda) y una potencia instalada de generación de 15.124 MW. Además, cuenta con 67 líneas con elementos existentes y/o elementos candidatos. Un esquemático de la red existente se puede observar en la Figura 11, donde se diferencian los niveles de tensión de cada línea.

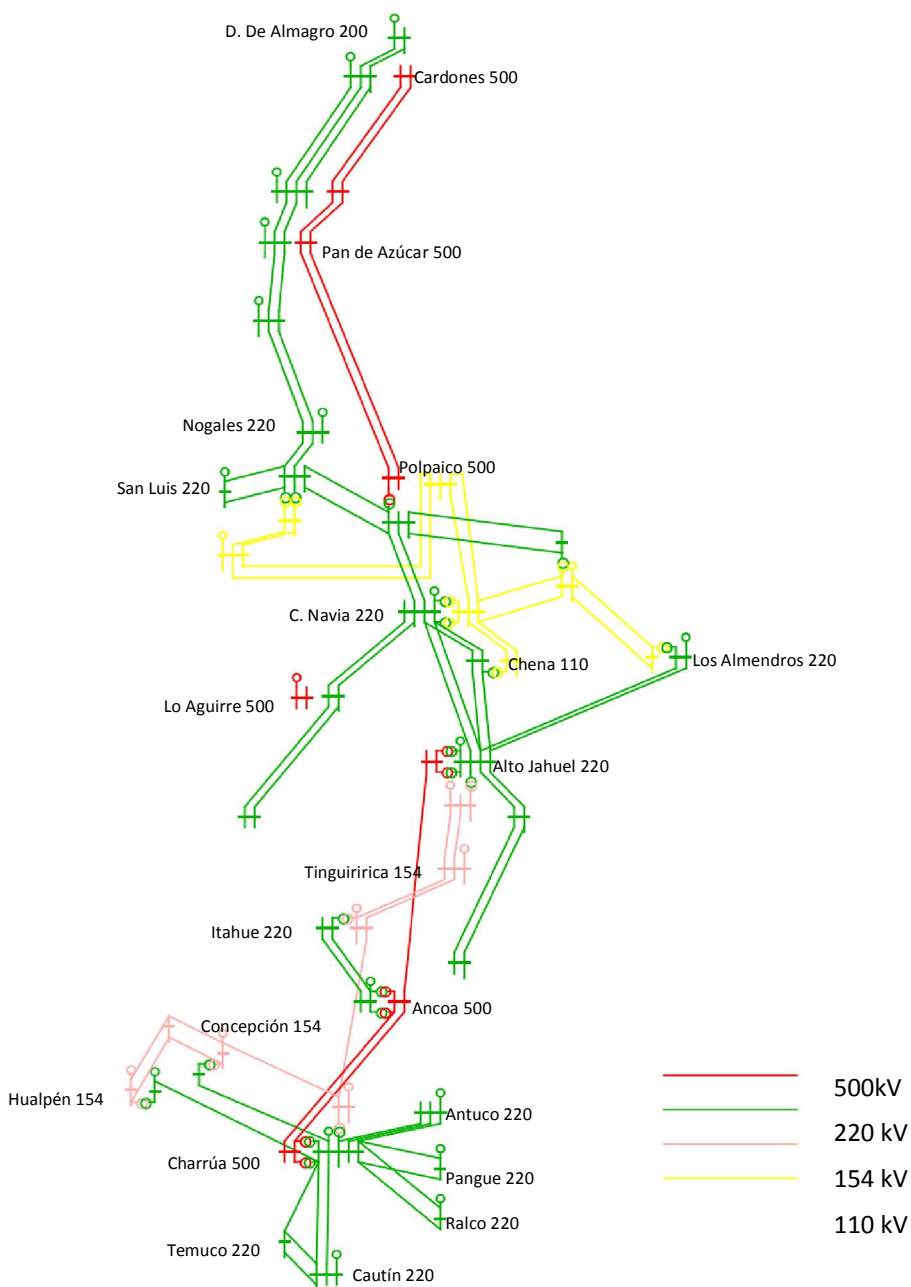


Figura 11: Diagrama unilineal sistema reducido del SIC de 50 barras

El estudio del modelo del SIC se realiza con dos enfoques: por un lado se estudia el comportamiento del algoritmo con el sistema mencionado frente a distintos cambios de los

parámetros que gobiernan los mecanismos del algoritmo genético; y por otro lado, se analizan los planes óptimos de expansión determinados para los 4 casos estudiados (con/sin FACTS y con/sin pérdidas, combinados) y las diferencias que se establecen entre los casos sin y con FACTS.

5.2.1 Análisis de sensibilidad del algoritmo

El tamaño del sistema reducido del SIC sin duda es la principal dificultad para la aplicación del algoritmo propuesto. Tal como se mencionó en capítulo 4, el universo de posibles configuraciones para un sistema es proporcional al tamaño del sistema en estudio, aumentando las configuraciones posibles en forma exponencial. Por otro lado, el algoritmo genético basa su funcionamiento en la aleatoriedad de sus mecanismos (selección, mutación y recombinación), por lo que no se puede obtener conclusiones a partir de un solo resultado en forma directa.

Por estas razones, para poder estudiar el desempeño del algoritmo se genera una gran cantidad de resultados que muestren tendencias sobre su comportamiento frente a distintos cambios de sus parámetros de operación, a partir del costo total de inversión, costo en equipos FACTS, tiempo de procesamiento, entre otros. Para cada caso estudiado se obtienen 30 planes posibles de expansión, a partir de los cuales se determinan: inversión total promedio, tiempo promedio de procesamiento del algoritmo, costo promedio de inversión en equipos FACTS y/o en líneas (según corresponda) y mínimo costo total de inversión.

Es importante recordar que, por un lado, están los datos de entrada del algoritmo genético, los cuales corresponden a toda la información correspondiente al sistema estudiado (líneas existentes, matriz de incidencia nodo-línea, costo inversión por línea, costo inversión por FACTS, etc.), mientras que por otro lado se encuentran los parámetros que manejan el funcionamiento del algoritmo, como lo son la cantidad máxima de generaciones que puede alcanzar el algoritmo (k_{max}), la cantidad máxima de generaciones en las cuales una configuración se mantiene como óptimo para que el algoritmo se detenga (k_{stop}), el tamaño de la población ($npob$) y las tasas de mutación (mr) y recombinación (cr).

Dada la naturaleza del modelo del sistema, se trabaja sobre 4 posibles escenarios de operación de la red: sin pérdidas y sin equipos FACTS (Escenario 1), con pérdidas y sin FACTS (Escenario 2), sin pérdidas y con FACTS (Escenario 3), y con pérdidas y equipos FACTS (Escenario 4).

a) Variación del tamaño de la población, número máximo de generaciones y máximo de generaciones para una configuración ($npob$, k_{max} , k_{stop})

El tamaño de la población ($npob$) corresponde a la cantidad de configuraciones (individuos) que participan en una generación para someterse a los mecanismos de selección, mutación y recombinación, de modo de poder compartir sus genes y pasarlos a generaciones futuras. En este sentido, una población más numerosa permite tener una mayor cantidad de

información disponible, es decir, más alternativas de expansión, lo que se traduce en una exploración más exhaustiva del universo de configuraciones posibles. Desde luego, al tener más individuos el tiempo de procesamiento aumenta dado que el algoritmo debe procesar un volumen mayor de datos.

De manera similar, el número máximo de generaciones (k_{max}) del algoritmo tiene un efecto directo sobre el tiempo. Aunque dependiendo del máximo de generaciones en las cuales una configuración se mantiene como solución óptima (es decir, k_{stop} , que en caso de alcanzar este número las iteraciones se detienen), el máximo de generaciones de procesamiento define el límite de descendencias que permite el algoritmo antes de detener la búsqueda. Por lo tanto, en caso de no obtener una solución que se mantenga como óptimo durante k_{stop} generaciones, el algoritmo seguirá iterando hasta llegar a la generación k_{max} y, en consecuencia, mientras mayor sea este valor mayor será el tiempo de procesamiento del algoritmo.

En la Figura 12 se muestra el tiempo de procesamiento promedio del algoritmo genético para determinar un plan óptimo de inversión, cuando varía el tamaño de la población y el número máximo de generaciones, para cada uno de los escenarios de operación de la red. De los gráficos se puede ver que tanto el aumento del tamaño de la población como del número máximo de generaciones aumentan el tiempo de procesamiento que utiliza el algoritmo genético, reafirmando lo mencionado. De igual manera, resalta el hecho de que al considerar pérdidas los tiempos son notoriamente mayores (cercanos al doble). Esto último se condice con lo determinado por medio de los sistemas de validación (tanto Garver como IEEE-24), lo cual se fundamenta en la doble utilización de la función para obtener el flujo de potencia, una vez para determinar las pérdidas y una segunda vez para obtener el flujo de potencia definitivo de la red al sumar las pérdidas a las demandas del sistema.

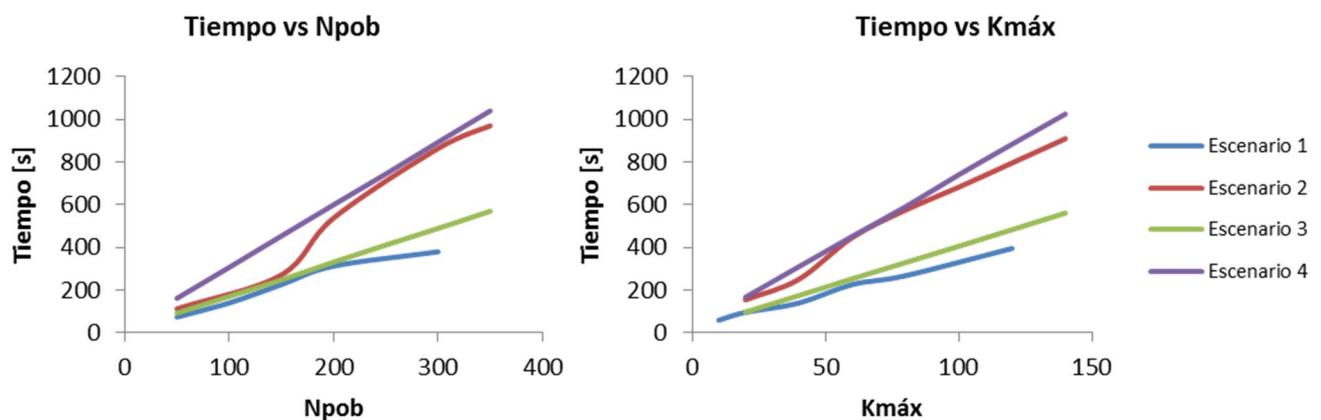


Figura 12: Tiempo versus npob y kmax por escenario

Otro aspecto destacable, es la influencia que pudiese tener o no el agregar equipos FACTS a la expansión sobre el tiempo que utiliza el algoritmo para obtener un plan óptimo. Para comprenderlo mejor, en la Figura 13 se encuentran los esquemas del algoritmo genético

propuesto tanto para el caso con FACTS (*Función Genético_FACTS*), como el caso sin FACTS (*Función Genético*).

Tal como se explicó en el capítulo 4, la estructura de ambas funciones es bastante similar, cambiando en *Genético_FACTS* respecto de *Genético* solo las funciones de evaluación, selección y recombinación/mutación, además de agregar una función para determinar la población inicial de equipos FACTS. Luego, las diferencias en tiempo provienen de aquellas funciones en las cuales interviene el modelo implementado para representar FACTS (marcadas en negrita en *Genético_FACTS*).

Función Genético	Función Genético_FACTS
Población Inicial	Población Inicial
While	Población FACTS While
➤ Evaluación	➤ Evaluación con FACTS
➤ Fitness	➤ Fitness
➤ Chequeo Factibilidad	➤ Chequeo Factibilidad
➤ Chequeo condición salida	➤ Chequeo condición Salida
➤ Selección	➤ Selección con FACTS
➤ Crossover/mutación	➤ Crossover/mutación con
End	FACTS
While	End
➤ Chequeo elementos sobrantes	Flujo plan óptimo con FACTS
End	End
Flujo plan óptimo	
End	

Figura 13: Esquema del algoritmo genético propuesto con y sin FACTS

A pesar de lo anterior y como se ve en los gráficos de la Figura 12, el hipotético aumento de tiempo que pudiesen provocar los equipos FACTS es leve y tiene más bien un efecto acumulativo a medida que aumenta el tiempo de procesamiento y más las iteraciones del algoritmo. Esto mismo se puede verificar en el gráfico de tiempo versus número de equipos FACTS de la Figura 14, en el cual se aprecia que teniendo un 10% de equipos FACTS o un 90%, el tiempo de convergencia del algoritmo no presenta variaciones importantes.

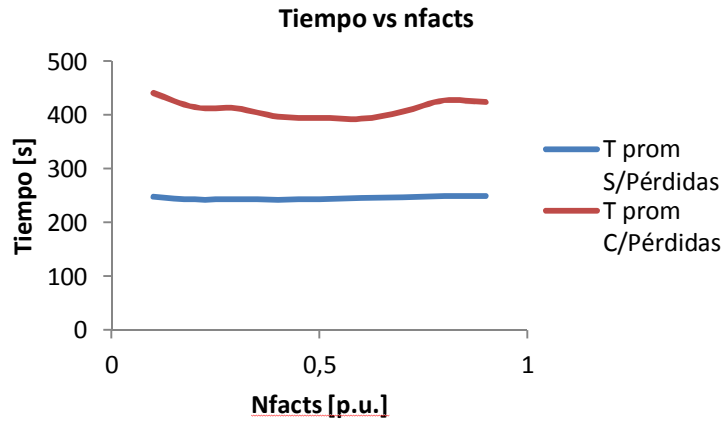


Figura 14: Tiempo versus número de equipos FACTS

La razón principal del irrelevante efecto de los equipos FACTS en el tiempo de convergencia se debe a que la gran carga de tiempo se encuentra en la función *evaluación* en la cual se determina el flujo de potencia y se utiliza la función de MATLAB® *linprog*. A modo de ejemplo, en la tabla 12 se muestran los tiempos transcurridos desde que comienza a correr el programa fijando la población inicial, pasando por la evaluación de la primera generación y la aplicación de los mecanismos del algoritmo genético, hasta la evaluación de la segunda generación, con y sin FACTS.

Tabla 10: Tiempos por función del algoritmo propuesto

	Sin FACTS (s)	Con FACTS (s)
Población Inicial	14,6017	15,3817
Evaluación 1° Gen	18,7201	19,8589
Resto funciones	18,7201	19,9057
Evaluación 2° Gen	22,6513	24,6646

De la tabla 12 queda claro que en cada iteración el tiempo utilizado para los mecanismos del algoritmo genético es prácticamente inexistente (0,0468 segundos por iteración para el caso con FACTS y 0 para el caso sin FACTS), además de que es la evaluación la que carga con la mayor parte del trabajo de procesamiento. Por ejemplo, en el caso de que el número de iteraciones sea 100 (correspondiente al máximo de generaciones), el tiempo total utilizado por el “resto de funciones” cuando se consideran equipos FACTS sería aproximadamente 5 segundos.

Respecto de la influencia en la convergencia por parte de n_{pob} y k_{max} , es necesario comprender la relación que existe entre estos parámetros y como afectan en el tiempo utilizado por el

programa propuesto. Volviendo a citar el esquema de la Figura 13, de las distintas funciones que forman parte del algoritmo genético, con y sin FACTS, todas dependen directamente del tamaño de la población, es decir, el tiempo de procesamiento de cada una de ellas es proporcional al número de individuos que componen cada generación. En consecuencia, un aumento de n_{pop} significará un aumento individual del tiempo por función y al final, un aumento en el tiempo total del algoritmo.

Por otro lado, el máximo de generaciones actúa como umbral de salida para la rutina WHILE que contiene la mayor parte de las funciones implementadas (evaluación, selección, mutación/recombinación, etc.), por lo tanto, condicionará el tiempo de procesamiento desde el punto de vista de cuantas iteraciones se realizan. En este sentido, el parámetro $kstop$ permite acortar el tiempo determinado por $kmax$, ya que funciona como condición de salida anticipada. Para el sistema reducido del SIC, el valor de $kstop$ y la utilidad que puede tener este parámetro para acotar el tiempo de procesamiento del algoritmo genético (recordar que el objetivo de $kstop$ es detener el proceso iterativo del algoritmo en el caso de que no se produzcan mejoras en el óptimo encontrado por un número determinado de generaciones) guarda relación con la velocidad de convergencia del algoritmo, y en consecuencia, con el tamaño del sistema y sus condiciones.

Tabla 11: Generación promedio de detención por escenario considerando población ($n_{pop}=150$, $kstop=0,1*Kmax$)³

Escenario 1		Escenario 2		Escenario 3		Escenario 4	
kmax	Generación Promedio detención	kmax	Generación Promedio detención	kmax	Generación Promedio detención	kmax	Generación Promedio detención
10	9	20	20	20	20	20	20
20	19	40	34	40	40	40	40
40	32	60	59	60	60	60	60
60	54	80	78	80	80	80	80
80	68	100	91	100	100	100	100
120	100	120	109	120	120	120	120

De la tabla 13 se puede ver que existe una relación importante entre el escenario y la generación promedio en la cual se detuvo el algoritmo. Lo primero que resalta es el hecho de que los escenarios que consideran equipos FACTS alcanzan siempre el máximo de generaciones, mientras que en el caso contrario, el algoritmo para antes de alcanzar ese valor. Así mismo, se observa que la detención se produce antes en el caso sin pérdidas (cuando se analizan las diferencias entre el escenario 1 y 2, comparando el mismo valor máximo de generaciones). De lo anterior se puede deducir que cuando se están considerando equipos FACTS, dado que se está llegando al máximo de generaciones, el valor óptimo determinado es susceptible a seguir mejorando por lo que la influencia del parámetro $kstop$, en este caso, pierde relevancia⁴. Por otra

³Kstop corresponde a un 10 % de $kmax$ excepto para el caso en que el máximo de generaciones corresponde a 10 o 20, en cuyos casos se asigna con un valor 4, para evitar una convergencia prematura.

⁴ Considerando que la única opción que podría afectar el proceso es la disminución de su valor, esto no tiene sentido ya que solo llevaría al algoritmo a entregar un valor subóptimo respecto del que se obtendría en caso de llegar hasta el máximo de generaciones.

parte, en el caso sin FACTS, la condición de salida sí se cumple en ciertas ocasiones, por lo que sí toma relevancia su valor. En este sentido, se verifica que el valor de *kstop* puede provocar una convergencia temprana, provocando que el algoritmo determine una solución subóptima, y dando cuenta de que su valor debe ser fijado de acuerdo a la velocidad de convergencia del algoritmo, y por lo tanto, del tamaño del sistema (por lo que la determinación de este parámetro es atingente a cada problema en particular).

En conclusión, el tiempo por iteración (T_I) dependerá del tamaño de la población, mientras que el tiempo que utiliza el programa en encontrar un óptimo será como máximo:

$$T_{op} = kmax * T_I(npob) + T_{pobini}(npob)$$

Donde

T_{pobini} : Tiempo para obtener la población inicial (también dependiente de *npob*)

El tiempo de convergencia dependerá siempre de ambos parámetros, por lo que no resulta directo el determinar sus influencias individuales, en términos de los valores que estos pueden tomar, sobre la convergencia. Por esta razón, para poder comparar el comportamiento del algoritmo ante cambios en el tamaño de la población y el máximo de generaciones, se realiza un análisis en base a la convergencia de los costos de inversión promedio y mínimo obtenidos para variaciones de ambos parámetros versus el tiempo promedio utilizado para obtener estos valores, los cuales se pueden observar en la Figura 15, separados para cada uno de los escenarios planteados.

Con la finalidad de estudiar la influencia del tamaño de la población, se toma un valor máximo de generaciones igual a 60, mientras que en el caso contrario, *npob* toma un valor de 150. De la Figura 15 se ve que con el aumento del tiempo de procesamiento del algoritmo (como consecuencia del aumento del tamaño de la población o el máximo de generaciones), tanto el costo promedio de inversión como el valor mínimo de inversión van disminuyendo para ambos casos, con diferencias leves, para todos los escenarios estudiados. En los gráficos de los escenarios 1 y 2, que tienen como elemento común el no considerar FACTS, se ve que el proceso de convergencia de la inversión promedio va disminuyendo su pendiente a medida que aumenta el tiempo. Esto guarda relación con el hecho de que en gran parte del tramo de tiempo observado, un mismo valor mínimo de inversión (MUS\$5.715 para el caso sin pérdidas, MUS\$7.900 aproximadamente en el caso con pérdidas) es encontrado, lo que implica que se está convergiendo asintóticamente a este resultado, dando cuenta de la dificultad que representa para el algoritmo el acercarse a un valor mínimo óptimo mientras se aleja de mínimos locales. Esto se condice con los datos de la tabla 13 sobre el promedio de generación de detención. Para estos dos escenarios, no siempre se alcanza el máximo de generaciones, dado que el valor promedio de inversión está cada vez más cerca de un mínimo importante (no se puede decir global, dado que este tipo de algoritmos no asegura la determinación de mínimos globales [53]), lo que se traduce en que los planes de expansión obtenidos se encuentran menos susceptibles a mejoras y se

mantienen por mayor cantidad de generaciones, activando el mecanismo de salida del algoritmo (*kstop*) y, por lo tanto, entregando valores subóptimos de inversión que van estancando la disminución del promedio de inversión, haciendo más lenta su convergencia al valor mínimo.

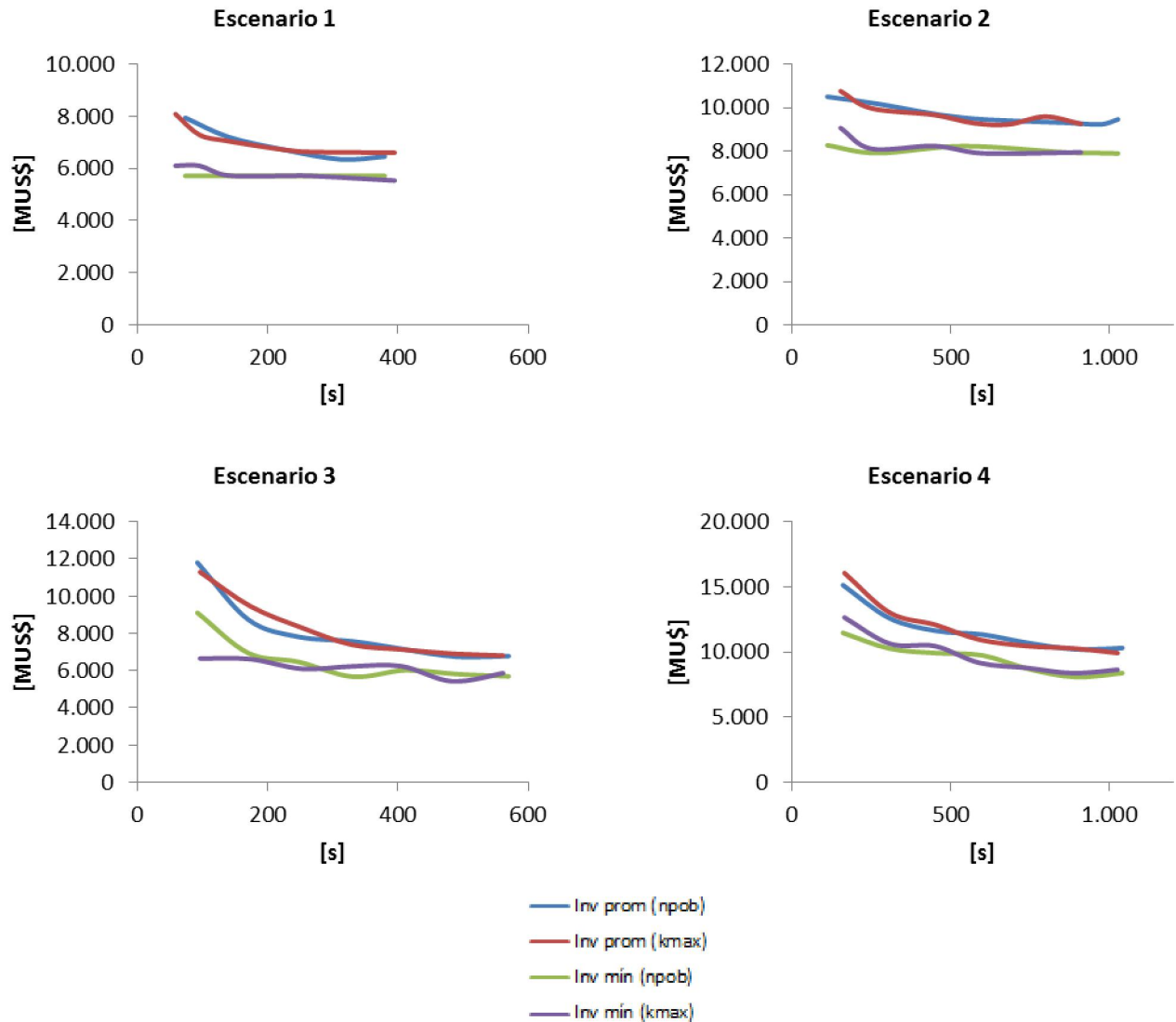


Figura 15: Valor de inversión promedio y mínimo versus tiempo para variaciones del tamaño de la población (npob) y el máximo de generaciones (kmax)

El caso contrario se observa en los gráficos de los escenarios 3 y 4, que sí consideran equipos FACTS. Hasta aproximadamente antes de los 500 segundos de tiempo de procesamiento para el caso con pérdidas y los 250 segundos en el caso sin pérdidas, el algoritmo presenta una convergencia rápida, y el valor promedio de inversión va disminuyendo aceleradamente (a una tasa de disminución entre 10 - 20%). Esto coincide con la curva de valor mínimo de inversión, que también va bajando su valor de manera notoria en este mismo periodo de tiempo. Posteriormente, aunque no con la claridad de los casos sin FACTS (que tienen una menor

pendiente que el caso de los escenarios 3 y 4), el mínimo de inversión encontrado se va acercando a un valor constante (cerca a los MUS\$5.800 s/pérdidas y a MUS\$8.300 c/pérdidas), provocando una desaceleración de la convergencia en la curva de inversión promedio (la tasa de disminución baja a valores entre el 5% hasta un 3% o menos), presentando nuevamente la característica asintótica de convergencia del algoritmo propuesto.

Con todos estos resultados en consideración, no se observan diferencias sustanciales entre el aporte o influencia independiente del tamaño de población y el máximo de generaciones, corroborando la estrecha relación que existe entre ambos parámetros en el funcionamiento del algoritmo y en la convergencia del mismo. En consecuencia, su selección dependerá principalmente del objetivo que se quiera alcanzar (tiempo determinado de procesamiento, valor de inversión, etc.) y guardará relación con el tamaño del sistema estudiado. Para el sistema SIC reducido, se determina que para el escenario 1 y 3, la convergencia toma una característica asintótica a partir de los 200 segundos aproximados, mientras que para los escenarios 2 y 4, esta situación se observa cercana a los 500 segundos (más cerca de los 625 segundos en el caso del escenario 4), pudiendo alcanzarse este tiempo con diferentes combinaciones de tamaño de población y máximo de generaciones, combinaciones que resultan equivalente en pos del objetivo de determinar un plan óptimo de expansión.

Es importante tener en cuenta que a medida que aumenta el tiempo de procesamiento del algoritmo, es más probable alcanzar un mejor valor óptimo, dado que el algoritmo podrá iterar un mayor número de veces, aplicando los distintos mecanismos, realizando así una búsqueda más exhaustiva del universo de configuraciones, acorde a la diversidad de genes que posea. En consecuencia, por medio del máximo de generaciones y el tamaño de la población se podrá tener un control directo sobre la cantidad de información que es procesada y sobre el tiempo durante el cual el algoritmo actuará, y por lo tanto, sobre la calidad del plan óptimo que se logre obtener.

b) Variación de la tasa de recombinación (cr) y la tasa de mutación (mr)

Las tasas de recombinación y de mutación determinan con que probabilidad los individuos de cada generación se ven sometidos a estos mecanismos, y cuyo objetivo es diversificar e intensificar la búsqueda dentro del universo de configuraciones posibles.

La diversificación permite eludir mínimos locales, ya que al combinar los genes de dos individuos, se obtienen dos individuos nuevos con una alta probabilidad de no encontrarse en la vecindad de los iniciales, llevando así la búsqueda a otro sector del universo de configuraciones posibles. En este sentido es de esperar que a medida que aumenta el valor de la tasa de recombinación, la probabilidad de encontrar mejores planes de expansión (de menor costo de inversión) aumente.

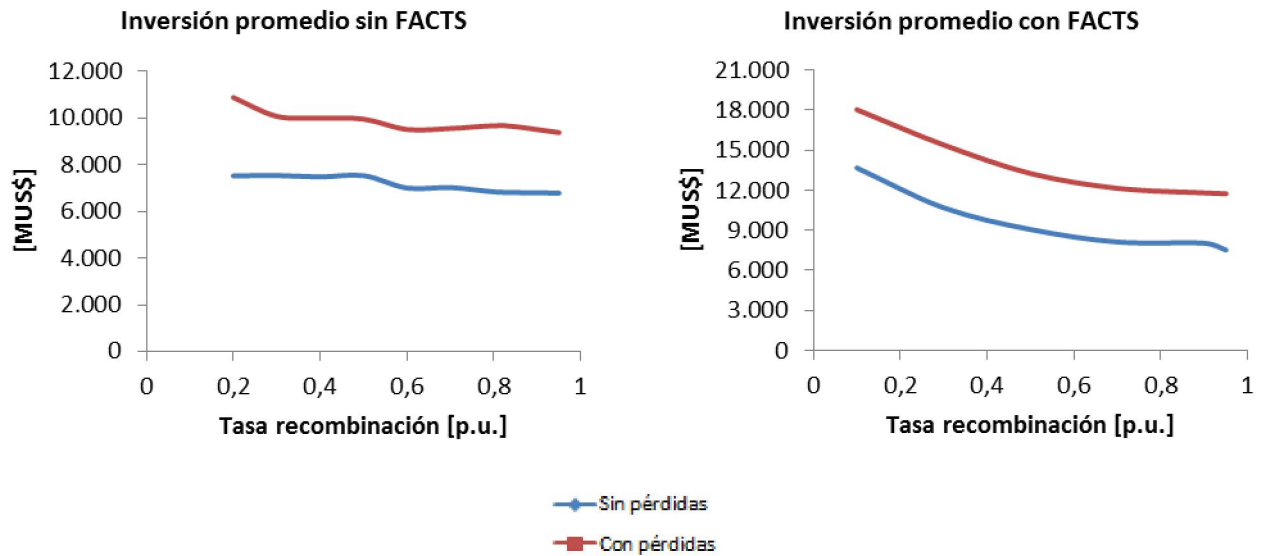


Figura 16: Valor promedio de inversión versus tasa de recombinación para los casos sin y con FACTS

Al analizar el comportamiento en el sistema reducido del SIC y la convergencia del algoritmo genético sobre este sistema respecto de la tasa de recombinación, se puede ver de la Figura 16 que al aumentar esta tasa el valor promedio de inversión disminuye, tanto en el caso sin FACTS, como con FACTS. En este último escenario, la disminución resulta más notoria, bajando, para el caso con pérdidas de un promedio de inversión de MUS\$18.000 para una tasa de recombinación de 20%, hasta MUS\$12.000 en el caso en que la tasa es de 95% (en valores aproximados). Estos resultados avalan lo antes mencionado, ya que al obtener mejores planes de expansión (de menor costo de inversión) gracias al aumento de la tasa de recombinación (y por lo tanto, realizando una búsqueda más exhaustiva), el valor promedio de inversión irá disminuyendo tal como se observa en los gráficos presentados.

En el caso del valor mínimo de inversión, cuyos resultados se encuentran en los gráficos de la Figura 17, se observan dos situaciones particulares. Por un lado, para el caso en que se utilizan equipos FACTS, el comportamiento resulta similar a lo presentado en la Figura 16, es decir, ante un aumento de la tasa de recombinación, el valor mínimo de inversión disminuye. Por otro lado, en el caso en que no se consideran FACTS, se observa una oscilación alrededor de un plan de expansión de MUS\$8.000 cuando hay pérdidas, y un valor prácticamente constante de MUS\$5.715 cuando no las hay. En ambas situaciones, tal como se presentara en el análisis de la influencia del tamaño de la población y el máximo de generaciones, los resultados guardan relación con el “momento” en el que se encuentra la convergencia.

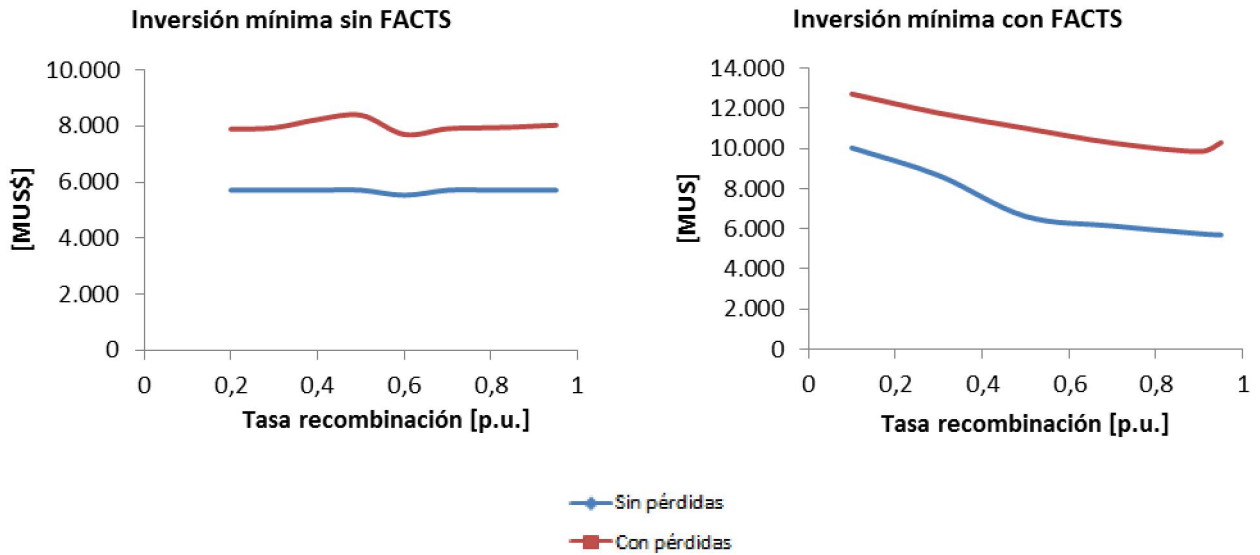


Figura 17: Valor mínimo de inversión versus tasa de recombinación para los casos sin y con FACTS

En el caso sin FACTS, prácticamente para cualquier valor de tasa de recombinación, se alcanza un mismo valor mínimo (o cercano en el caso con pérdidas), lo que se condice con la baja pendiente que presenta el promedio de inversión de la Figura 16, dando cuenta de que el algoritmo, en este caso, ya está convergiendo asintóticamente hacia el mínimo. Por el contrario, en el caso con FACTS la Figura 17 muestra que la inversión mínima va disminuyendo, mientras que la inversión promedio presenta una pendiente mayor (respecto del caso de inversión promedio sin FACTS), lo cual tiene relación con una convergencia, aún, agresiva. Lo anterior resulta más claro en el caso con pérdidas, ya que en el sin pérdidas se observa una suerte de transición entre la convergencia agresiva y la asintótica.

Luego de que la diversificación lleva al algoritmo a explorar distintos espacios del universo de búsqueda controlada por la tasa de recombinación, el mecanismo de mutación, controlado por la tasa de mutación, introduce la característica de intensificación generando una búsqueda más exhaustiva dentro de la vecindad de una configuración, abriéndose la posibilidad de encontrar individuos con mejor *fitness*. Otra característica del mecanismo de mutación es la capacidad que le da al algoritmo de poder recuperar información desechada por el avance de las generaciones o traer información que no había sido explorada, por medio del cambio aleatorio de un gen de cualquier individuo de la población.

La implementación de la tasa de mutación se hace de manera tal que su valor aumenta en un 50% cuando se alcanza un tercio del máximo de generaciones, y luego un 50% más cuando alcanza los dos tercios. Lo inconveniente de esto radica en que un exceso de nueva información puede llevar a que el algoritmo diversifique aún más su búsqueda, sin realizar una buena exploración de la vecindad de una configuración promisorio (con buen valor de *fitness*) y agotando sus esfuerzos saltando de una zona a otra del universo de soluciones de manera descontrolada. De todas formas resulta importante recordar que esta implementación, pensada para valores pequeños de la tasa de

mutación, permite que el algoritmo no se estanque en mínimos locales cuando el proceso se encuentra avanzado y la población se torna más homogénea (el mecanismo de mutación en este punto permite diversificar la búsqueda, en forma controlada) [25].

En la Figura 18 se encuentra el promedio de inversión de los 4 escenarios para distintos valores de tasa de mutación. Lo primero destacable es la leve variación del costo promedio de inversión para todos los casos con la tasa de mutación. Dado que el mecanismo de mutación cambia como máximo un gen de cada individuo (si cumple con el umbral impuesto por la tasa), el impacto sobre el costo de inversión de la configuración resultante no tan relevante como para el caso del mecanismo de recombinación, por lo que un cambio notorio en el valor de esta tasa no llevará al algoritmo a encontrar una solución radicalmente distinta y de mucho menor valor de inversión con el paso de las generaciones. En este sentido, para el caso sin FACTS, cuando la tasa de mutación supera el valor de 0,15, el valor promedio de inversión se mantiene prácticamente constante. Complementado esto con lo presentado en la Figura 19, que muestra el valor mínimo de inversión versus la tasa de mutación, se observa que en gran parte de los casos se alcanza un mismo valor mínimo de inversión. Esto último da cuenta de que a pesar de alcanzar siempre el “mejor” mínimo, la convergencia del algoritmo no mejora en forma radical con el aumento de la tasa de mutación, dado que no disminuye mayormente el promedio de inversión sin FACTS.

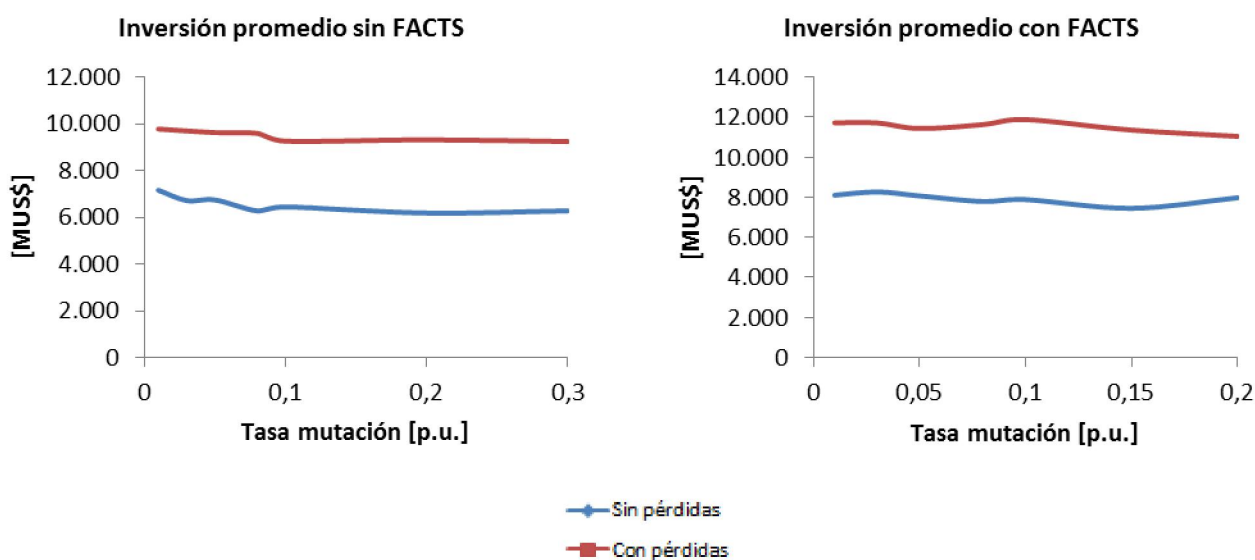


Figura 18: Valor promedio de inversión versus tasa de mutación para los casos sin y con FACTS

Para el caso con FACTS, la situación es similar. En general, no se observan grandes cambios en los valores obtenidos, aunque no se aprecia una clara convergencia como en la situación sin FACTS. Apoyándose nuevamente en la Figura 19, el valor de inversión mínima tanto para el caso sin pérdidas como con pérdidas no llega a un monto estable, haciendo eco de la inversión promedio. En este sentido, esta correlación gráfica entre inversiones promedio e inversiones mínimas para los 4 escenarios es similar a la que se observa en las figuras 16 y 17, en donde los casos con FACTS muestran una mayor tendencia a disminuir el valor de inversión a medida que aumenta el valor de la tasa correspondiente que en el caso sin FACTS, que presenta mayor

estabilidad cerca de un valor fijo. Con esto en consideración, la comparación entre los resultados obtenidos para la tasa de recombinación versus aquellos determinados para distintos valores de tasa de mutación, corroboran el hecho de que la mejora que permite esta última en la convergencia no es tan radical respecto de la primera dada la naturaleza de la modificación de genes individuales que integra la mutación, y que las diferencias entre los gráficos sin FACTS y con FACTS se deben simplemente a la dificultad que ofrece al algoritmo la inclusión de estos equipos en el problema (dado que el universo de soluciones factibles aumenta), y los mecanismos solo resaltan en mayor (en el caso de la tasa de recombinación) o menor (en el caso de la tasa de mutación) medida esta dificultada, por medio de los resultados.

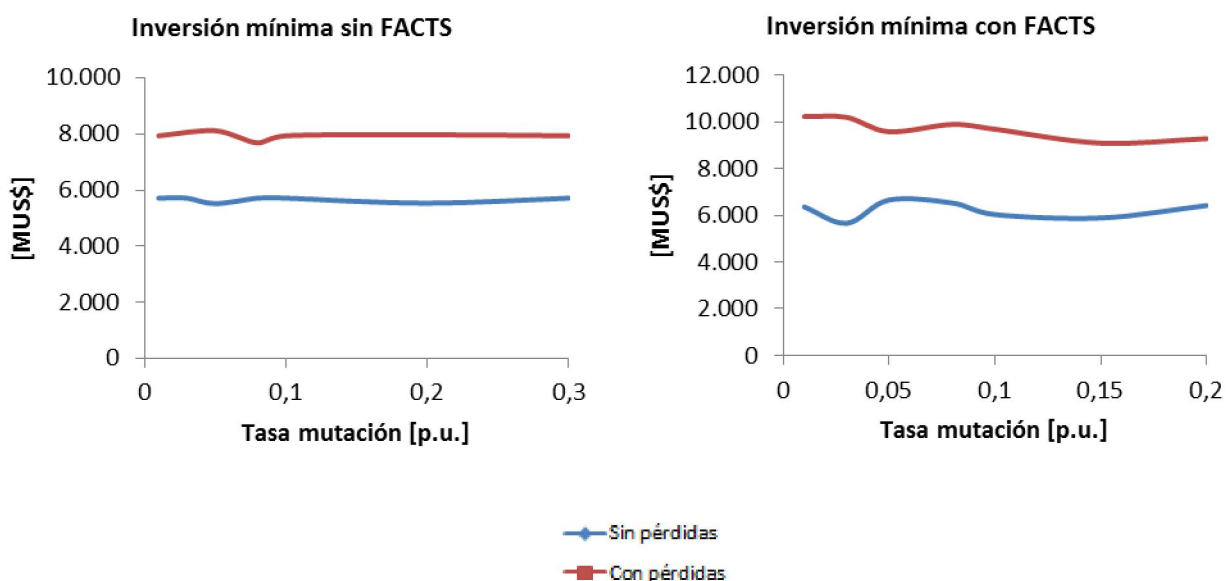


Figura 19: Valor mínimo de inversión versus tasa de mutación para los casos sin y con FACTS

De todas formas, es importante recordar que es la combinación de los mecanismos de selección, recombinación y mutación lo que hace funcionar el algoritmo genético, por lo que cada uno de los aportes individuales de estos, lleva a la búsqueda a un resultado exitoso.

c) Variación del número de FACTS

El número de equipos FACTS (n_{facts}) fija la cantidad máxima de estos dispositivos que pueden ser utilizados en el sistema, ubicado cada uno en diferentes líneas de la red (es decir, no se pueden ubicar dos equipos en una misma línea) y tomando un valor de compensación entre 0% y 40%. El objetivo de utilizar FACTS en el problema de planificación es aumentar el límite de las líneas a su límite térmico para mejorar la capacidad de transporte de energía, evitando así un exceso de instalación de circuitos por líneas que presentan un flujo levemente superior a su capacidad nominal y logrando disminuir el costo de inversión en líneas y el costo total de inversión (considerando líneas y equipos FACTS).

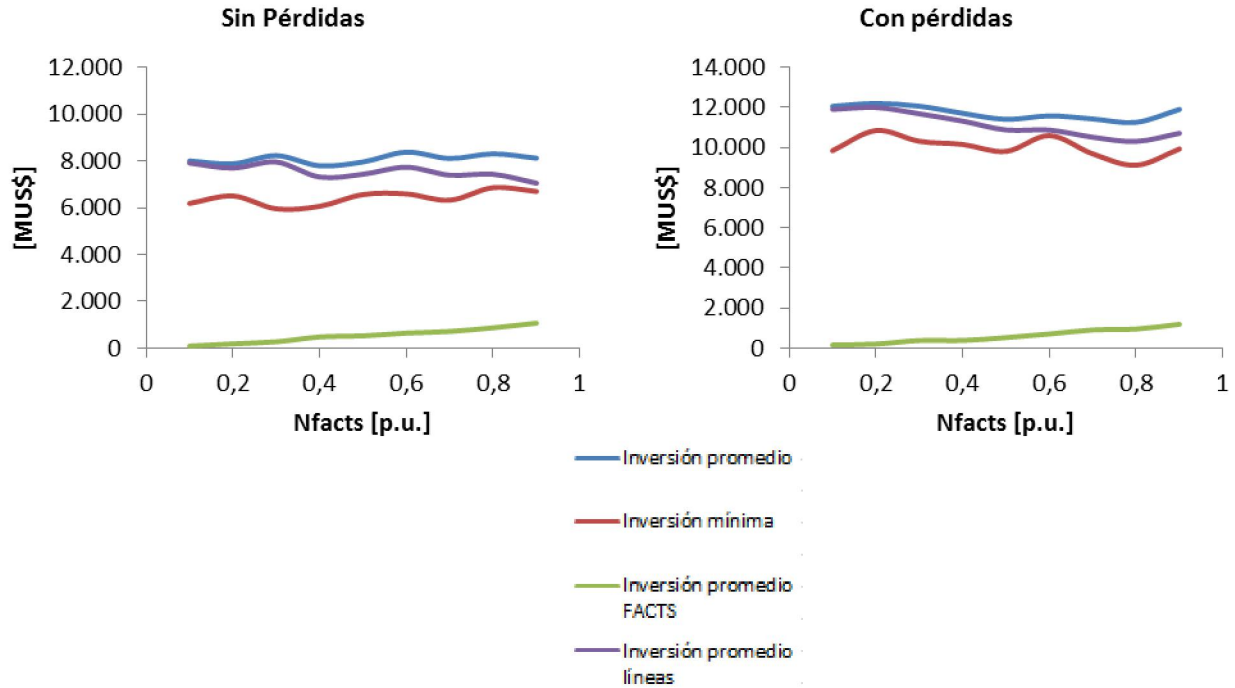


Figura 20: Inversión promedio total, en FACTS, líneas y mínima versus número de equipos FACTS

Determinar un número adecuado de equipos FACTS es relativo de cada sistema y del modelo que se implemente. En el caso del sistema reducido del SIC, en la Figura 20 se muestra el comportamiento de algoritmo frente a cambios en el número de FACTS.

Se observa que el promedio de inversión en equipos FACTS es independiente de si se consideran pérdidas o no. Se podría pensar que, como para la inversión en líneas, la inversión en FACTS podría ser mayor. La diferencia radica, justamente, en la cantidad. En el caso de la inversión en líneas, la cantidad de nuevos circuitos dependerá directamente del flujo que circula por las líneas del sistema y, por lo tanto, de la demanda. En el caso con pérdidas, los flujos son mayores debido a que se suman a las demandas por barras, las pérdidas de las líneas. A mayor flujo se requiere una mayor cantidad de circuitos para poder transportar la energía a una potencia determinada, y en consecuencia, la inversión en líneas deberá ser mayor que en el caso sin pérdidas (que tendrá menores flujos que transportar). En cambios, en el caso de los equipos FACTS, su número es fijo y el promedio de inversión en FACTS no guarda relación con los flujos, por lo que tampoco lo hará con las pérdidas, pudiendo observarse incluso una gran dispersión de los costos de inversión en FACTS para cada plan óptimo obtenido. Esto se ve más claramente en la Figura 21 que muestra el costo de inversión en FACTS para los 30 planes de expansión determinados en el caso en que se considera un 20% de estos equipos respecto del total de líneas de la red.

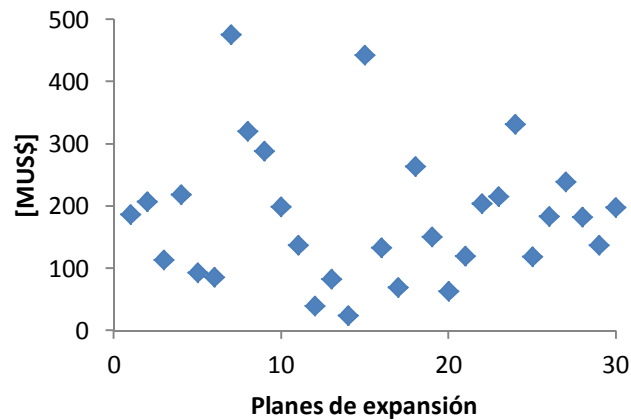


Figura 21: Dispersión de valor de inversión en equipos FACTS ($n_{facts}=0.2$)

A medida que aumenta el número de equipos FACTS, el valor promedio de inversión en líneas disminuye, tanto para el caso con pérdidas como sin pérdidas. Esto confirma el planteamiento de que la inversión en equipos FACTS dentro del problema de TNEP permite disminuir en forma efectiva la inversión en elementos tradicionales (líneas y transformadores), cumpliendo con las restricciones del flujo de potencia correspondiente.

A pesar de lo anterior, en el caso sin pérdidas se observa que la inversión total aumenta con el número de equipos FACTS, es decir, la disminución que se da en la inversión en líneas no compensa el aumento dado por la inversión en una mayor cantidad de equipos FACTS. Si a lo anterior se suma que el valor promedio de inversión total aumenta aproximadamente desde el punto en que el valor mínimo de inversión comienza a crecer con el número de equipos FACTS, se puede deducir que un óptimo de inversión en líneas se ha alcanzado, y aunque el promedio de inversión en líneas sigue disminuyendo, esto se debe a que una mayor cantidad de posibles ubicaciones para FACTS (entregado por el aumento de n_{facts}), permiten determinar con mayor probabilidad las ubicaciones de estos dispositivos que dan lugar a configuraciones cercanas al punto de inflexión antes mencionado (configuración con un mínimo de inversión en líneas). En la Figura 22, se observa que la inversión en líneas oscila cercana a los MUS\$6.000, sin presentar mejoras notorias más allá de $n_{facts}=0,4$. En consecuencia, de los 30 planes que se determinan por valor de número de FACTS, una mayor cantidad de estos llega a un valor menor de inversión en líneas a medida que aumenta n_{facts} , pero aumentando de todas formas el total de inversión.

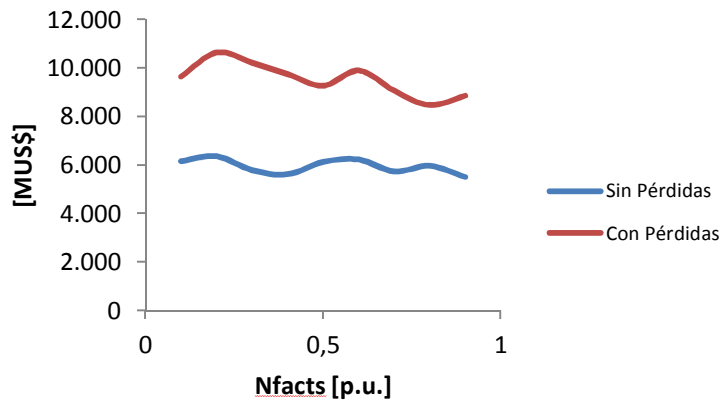


Figura 22: Inversión en líneas de la inversión total mínima vs número de equipos FACTS

Para el caso con pérdidas, la inversión promedio disminuye hasta $nfacts=0,5$, para luego oscilar en un valor cercano a MUS\$11.400, y la inversión mínima disminuye con el aumento de equipos FACTS, aunque en forma más notoria que en el caso sin pérdidas. Esto último se apoya en el gráfico de la Figura 22, en donde se puede apreciar que la inversión en líneas para la inversión mínima va disminuyendo a medida que aumenta el número de equipos FACTS, elemento que contrasta con el caso sin pérdidas. Tal como se ha explicado anteriormente, esto se debe a la mayor dificultad que reviste para el algoritmo propuesto el trabajar sobre el problema con pérdidas y, por lo tanto, dentro de los parámetros en los cuales se plantea en este caso (valores de tamaño de población, número máximo de generaciones, etc.) y el correspondiente tiempo de procesamiento, los resultados obtenidos se encuentran más susceptibles a mejorar en forma más notoria. En consecuencia, una mayor número de configuraciones tendrán una menor inversión en líneas a medida que aumenta el número de FACTS (como se explicó para el caso sin pérdidas), razón por la que el promedio de inversión en líneas también va disminuyendo. De todas formas, la pendiente de esta curva va disminuyendo, estabilizándose en un valor cercano a MUS\$10.500, lo que sumado al aumento del costo promedio de inversión en equipos FACTS, hace que el promedio de inversión total termine oscilando en torno a un valor fijo (como se mencionó, de MUS\$11.400 aproximadamente).

5.2.2 Planes de expansión para sistema reducido del SIC

La segunda parte del análisis realizado sobre el sistema reducido del SIC de 50 barras corresponde a la aplicación del algoritmo genético propuesto para los 4 escenarios planteados con el objetivo de determinar un plan óptimo de expansión para cada uno de éstos.

Como base para este análisis, se hace necesario estudiar el comportamiento del sistema en el caso en que no se hace ninguna expansión, respecto de la energía no suministrada, los flujos por las líneas y los posibles “cuellos de botella” que se puedan generar en la red. Para determinar el flujo de potencia del modelo sin expansión se utiliza la función *flujodc* sobre el sistema base, implementado en MATLAB. En el anexo D.3, tabla D 4 se encuentran los flujos de potencia para la red no expandida para los casos con y sin pérdidas, junto con los flujos de la red expandida para los 4 escenarios estudiados. Cabe mencionar que en el anexo D.2 se encuentra una versión

ampliada del sistema reducido del SIC donde se pueden observar los nombres de cada una de las barras del sistema.

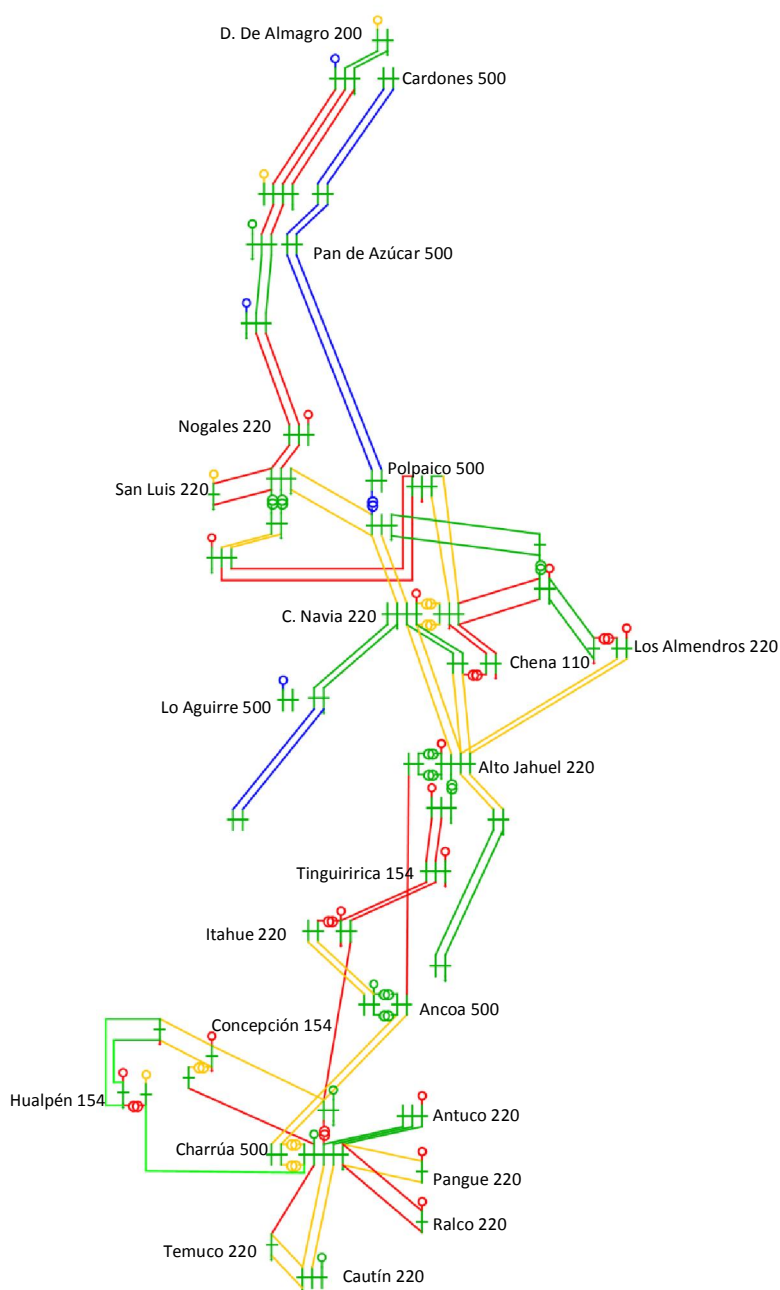


Figura 23: Flujo de potencia modelo reducido del SIC sin expansión y sin pérdidas

En la Figura 23, se muestran los flujos en el modelo reducido del SIC para el caso sin expansión y sin pérdidas. Para representar el nivel de utilización de las líneas, se establece una simbolización por colores, por medio de los siguientes criterios (también aplicado a transformadores y generación):

- Si el flujo por la línea es menor a 40% de su capacidad máxima, las líneas será de color verde.
- Entre un 40% y un 85%, las líneas se representan de color amarillo.
- Líneas con más de un 85% de utilización, serán de color rojo.
- Aquellas líneas que no son utilizadas (no transportan energía), se representan de color azul.

El sistema reducido del SIC, a modo de análisis, puede ser dividido en tres zonas: zona norte, desde la barra Diego de Almagro 220 hasta Nogales 220; zona centro, entre Nogales 220 y Alto Jahuel 220; y zona sur, entre Alto Jahuel 220 y Cautín 220. Estas divisiones se hacen en base a dos sectores del sistema que presentan un nivel importante e influyente de saturación. Por un lado, entre el área norte y centro, la línea Nogales 220 – Quillota 220 presenta un flujo al máximo de su capacidad y en sentido contrario al flujo de la línea Los Vilos 220 – Quillota 220 (este último en sentido sur, contrario al primero que va en sentido norte), generando un sistema “aislado” en el área norte, dado que la línea que une Quillota y Nogales es la única que une el sistema con las barras que se encuentran al norte de Nogales 220 (esto a pesar de que existe el pasillo de 500 kV entre Cardones y Polpaico).

Por otro lado, la división entre el zona centro y sur se debe a la saturación de las líneas Tinguiririca 154 – Itahue 154 y Ancoa 500 – Itahue 500 (esta última al 90% de su capacidad), que son los únicos pasajes que unen ambas zonas.

- **Zona Norte:** La zona norte del modelo reducido del SIC se presenta como un área autosuficiente, dado que por medio de la generación presente entre las barras Nogales 220 y Diego de Almagro 220 basta para abastecer la demanda de este sector. Cabe mencionar que el pasillo en 500 kV existente entre Cardones y Polpaico no posee centro de consumo ni de generación, además de no estar conectado en ningún punto con las barras homónimas en 220, razón principal por la cual no circula ningún flujo por éste.
- **Zona Centro:** El área centro del sistema estudiado presenta tres características particularmente importantes: la generación de prácticamente la totalidad de los centros de generación ubicados dentro de la zona se encuentra al máximo de capacidad (exceptuando por San Luis 220, por limitación de la línea que evacúa la energía generada en esta barra); existe una cantidad importante de demanda no satisfecha (9,71 p.u.) repartida entre las barras Las Vegas 110, Cerro Navia 110, Chena 110 y Los Almendros 110; y la barra Lo Aguirre 500, que posee un centro de generación importante, no se encuentra unida al sistema.
- **Zona Sur:** La zona sur, como la zona centro, posee puntos de demanda no abastecida por un total de 5,44 p.u. repartidos en las barras Tinguiririca 154, Itahue 154, San Vicente 154 y Concepción 154. Además, algunos generadores entregan potencia menor a su máximo pesar de tener bajo costo de generación (como Ancoa 220, Hualpén 220, Charrúa 220), debido a limitaciones en los flujos de las líneas que evacúan su energía.

El flujo de potencia para el caso con pérdidas no varía mayormente respecto del caso anteriormente descrito, salvo en los valores de carga no suministrada. En este sentido, y en grandes números, el modelo reducido del SIC sin expansión proyectado al año 2022 presenta un total de carga no suministrada 1.515 MW en el caso sin pérdidas, que implica un costo de falla de US\$784.522 y un total de costos de generación más falla de US\$1.394.788, mientras que en el caso con pérdidas la demanda no suministrada asciende a 1.703 MW, que corresponde a US\$881.940 por costo de falla, y un total de costo de US\$1.520.407. Hay que recordar que el costo de falla unitario, como se indicó anteriormente, es de 517,99 US\$/MWh y que corresponde al valor único representativo, representando el costo por kWh en el que incurrirían los usuarios por no disponer de energía.

Conocida las características generales del modelo estudiado del SIC, para determinar los planes óptimos de expansión para los escenarios considerados, los parámetros del algoritmo genético (máximo de generaciones, tamaño de población y generaciones de detención) se fijan de manera tal que la búsqueda sea exhaustiva dentro del universo de soluciones, en desmedro del tiempo de procesamiento que esto signifique, y así poder verificar la efectividad del algoritmo cuando se consideran equipos FACTS en comparación al caso en que estos dispositivos no son considerados. Esto último se hace dado que en la mayor parte de los resultados obtenidos en 5.2.1 cuando se utilizan FACTS, la convergencia del algoritmo no alcanza una estabilidad notoria en el valor mínimo de inversión, para los parámetros utilizados. Con lo anterior en consideración, se fijan los siguientes valores para los parámetros del algoritmo genético: $k_{\max}=200$, $k_{\text{stop}}=20$, $npob=300$, $mr=0,08$, $cr=0,9$. Además, se selecciona un número de FACTS de 0,4.

En las figuras 24 y 25 se presentan los planes de expansión para el caso sin pérdidas y con pérdidas, respectivamente, sobre el diagrama del sistema reducido del SIC. En éstas, los elementos en rojo representan nuevos circuitos y transformadores determinados por el plan de expansión pertinente, mientras que las líneas en violeta corresponden a aquellas en las cuales se considera la instalación de un equipo FACTS. Por último, las líneas en azul representan nuevos circuitos en lugares donde también se considera la ubicación de un dispositivo FACTS.

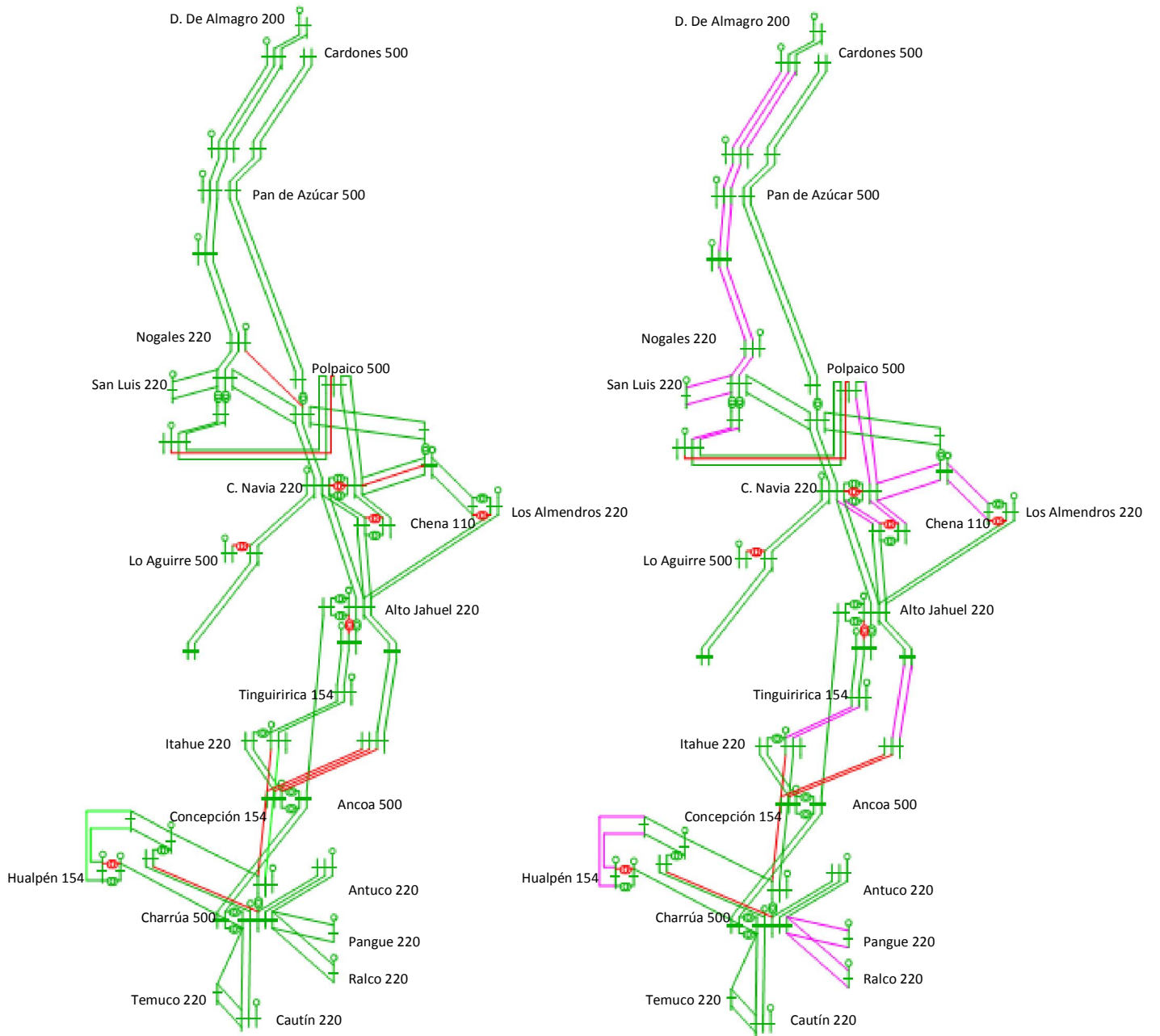


Figura 24: Diagramas unilineales de los planes óptimos de expansión sin (izquierda) y con (derecha) FACTS para el sistema reducido del SIC modelado sin pérdidas

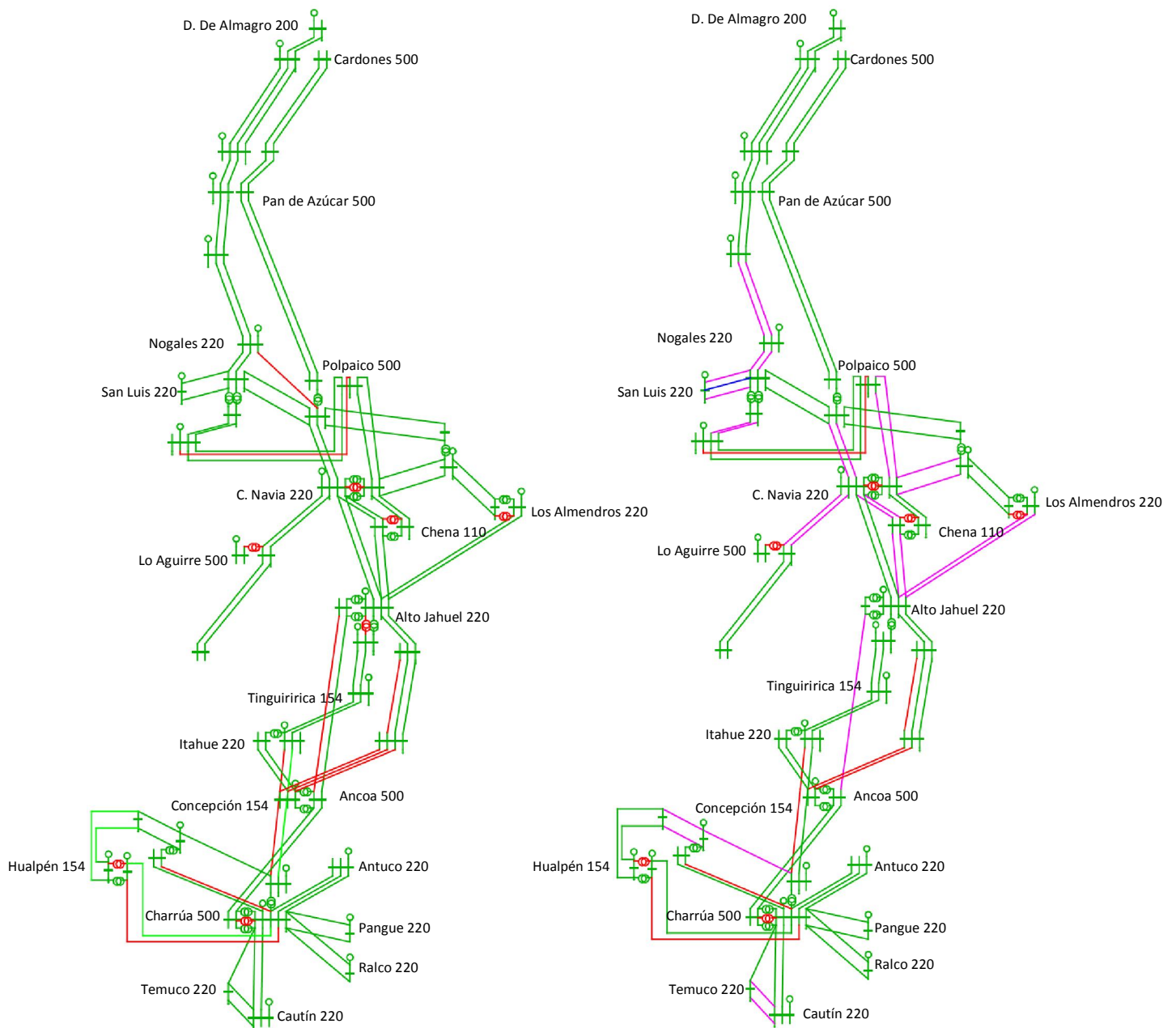


Figura 25: Diagramas unilineales de los planes óptimos de expansión sin (izquierda) y con (derecha) FACTS para el sistema reducido del SIC modelado con pérdidas

En el anexo D.3, en la tabla D3 se encuentran los planes óptimos graficados en las figuras mencionadas, separados por nuevos circuitos y/o transformadores y por grado de compensación introducido por los equipos FACTS en las líneas donde se considera su instalación. Cabe destacar que en comparación con los sistemas de prueba (Garver e IEEE-24), el sistema reducido del SIC

tiene la particularidad de considerar transformadores como posibles elementos de inversión. Por lo tanto, y dado que los equipos FACTS modelados en este trabajo son de tipo serie, solo se debe tener como alternativa de ubicación para estos, aquellas líneas que representen circuitos y no transformadores, es decir, se cuenta con 49 posibles ubicaciones y no 67, que corresponde al total de “pasillos” dentro de la red reducida del SIC.

Además, en la tabla 14 se encuentran los costos de inversión de los planes de expansión obtenidos con el algoritmo genético propuesto para los 4 escenarios estudiados, especificando la inversión en líneas y FACTS, junto al tiempo de procesamiento y al monto de pérdidas.

Tabla 12: Costos de inversión, tiempo y pérdidas de planes de expansión obtenidos para el modelo reducido del SIC

		Costo total Inversión [MUS\$]	Costo inversión FACTS [MUS\$]	Costo inversión líneas [MUS\$]	Tiempo [s]	Pérdidas [p.u.]
Genético	S/pérdidas	5.521		5.521	1.317	
	C/pérdidas	7.555		7.555	2.445	8,196
Genético c/FACTS	S/pérdidas	4.895	395	4.500	1.547	
	C/pérdidas	7.164	184	6.980	2.961	7,999

Lo primero destacable de los resultados es que, tanto para el caso sin pérdidas como con pérdidas, el costo total de inversión cuando se considera la utilización de equipos FACTS es menor que cuando estos no son incluidos como posibles elementos de expansión, lo cual reafirma lo obtenido para los sistemas de prueba. Y de aún más relevancia es que el costo de inversión en líneas sigue la misma tendencia que el total de inversión, lo que quiere decir que, más allá del costo que puede significar la inversión en equipos FACTS (tomando en cuenta que con el tiempo y el avance en electrónica de potencia estos dispositivos van reduciendo sus costos), la inclusión de estos equipos y su efecto sobre las líneas existentes en cuanto a la mejora en su capacidad de transmisión de potencia, permiten disminuir la inversión en elementos tradicionales (circuitos y transformadores), evitando problemas de servidumbres requeridas cuando se desea instalar nuevas líneas en la red y mejorando la flexibilidad del sistema dado que los equipos FACTS pueden ser trasladados de un punto a otro de la red, característica que no se da con los nuevos circuitos. Desde el punto de vista de la búsqueda, los equipos FACTS, con todas sus mejoras al sistema, transforman en factibles ciertos planes de expansión con menor inversión en líneas y transformadores, que sin su existencia no lo serían, aumentando así el conjunto de soluciones para el TNEP, y disminuyendo el mínimo de inversión.

Respecto de los tiempos de procesamiento, tal como se esperaba, fueron altos dado el número máximo de generaciones y el tamaño de la población que se fijaron. Esto permitió obtener planes de expansión óptimos mejores que los mínimos determinados en el análisis de desempeño del algoritmo genético, observándose mayores mejoras en el costo de inversión para los casos con FACTS (respectivamente por escenario del 1 al 4 se obtuvieron planes mínimos de inversión con los siguientes costos totales de inversión: MUS\$5.521, MUS\$7.687, MUS\$5.423, MUS\$8.077). Además, se cumple la diferencia entre los tiempos sin y con pérdidas observada tanto en los

sistemas de prueba como en el análisis de desempeño del algoritmo sobre el modelo reducido del SIC, es decir, el caso con pérdidas toma cerca del doble de tiempo que el caso sin pérdidas, cuando se consideran los mismos parámetros para el algoritmo genético.

En el análisis más específico, al traslapar el diagrama de flujo en el caso en que el sistema no tiene elementos nuevo y los diagramas de las expansiones determinadas por el algoritmo genético propuesto, resalta inmediatamente el hecho de que las nuevas líneas y transformadores que son integrados al sistema son ubicados, en su mayoría, en pasillos de la red que colindan con barras en las cuales existen demandas no abastecidas. Así, por ejemplo, para el caso sin FACTS y sin pérdidas, en la zona centro, el nuevo circuito en la línea San Pedro – Las Vegas 110 llega a la segunda barra en la cual existe demanda sin suplir; el nuevo circuito en El Salto – Cerro Navia 110 y el transformador agregado en la subestación Cerro Navia (C. Navia 220 – C. Navia 110) aparecen para solucionar el problema de energía no abastecida en C. Navia 110; los transformadores en Chena y en Los Almendros también ayudan a abastecer las demandas no suplidas en sus correspondientes barras de 110 kV. Caso distinto es el del nuevo transformador de la subestación Lo Aguirre, ya que no hay carga asociada no entregada a alguna de sus barras (Lo Aguirre 500 y Lo Aguirre 220), sino que este elemento permite la inclusión en el sistema de la generación hidráulica inyectada en Lo Aguirre 500 y que aporta energía de bajo costo al sistema (de tal importancia para la operación del sistema que en los cuatro escenarios estudiados su genera a máxima capacidad). Por otro lado, el transformador en Alto Jahuel entre las barras de 220 kV y 154 kV, y la nueva línea entre Polpaico 220 y Nogales 220, cumplen una función más de descongestión en las áreas que, en el análisis previos de las tres zonas del sistema, se observase saturación que impide el paso de energía de un sector a otro. De todas formas, es importante destacar que de una u otra manera los elementos agregados en el último contexto descrito producen una reconfiguración de los flujos en la red que permiten cumplir con el abastecimiento de demandas no suplidas en alguna de las barras del sistema (esto se observa de manera clara en el caso sin pérdidas de la línea Polpaico 220 – Nogales 220, que transporta un flujo de 3,12 p.u. y que provoca que el flujo entre San Pedro 110 y Quillota 110 disminuya lo suficiente para que el nuevo circuito entre San Pedro 110 y Las Vegas 110 transporte los 0,9 p.u. no abastecidos en esta última barra cuando no hay expansión en la red).

Dentro del mismo caso, pero en la zona sur, los nuevos elementos de la red cumplen con las situaciones descritas anteriormente (excepto el caso de conexión de una nueva barra al sistema). El nuevo circuito en la línea Concepción 220 – Charrúa 220 y el transformador agregado en la subestación Hualpén permiten modificar los flujos de forma tal de suplir la demanda faltante de las barras Concepción 154 y San Vicente 154. Así, la línea San Vicente 154 – Hualpén 154 que en el caso base solo transporta energía al 7% de su capacidad, pasa a llevar 2,93 p.u., correspondiente a cerca del 90% de la capacidad máxima de la línea, supliendo la demanda faltante de San Vicente (0,76 p.u.) y parte de lo requerido por Concepción 154, además de provocar una disminución en la generación conectada a esta última barra que es de mayor costo que la energía ofrecida por Hualpén 220. Por último, el nuevo circuito en Charrúa 154 – Itahue 154 junto con los tres circuitos de la nueva línea que conecta Colbún 220 y Ancoa 220, permiten descongestionar el sector entre Alto Jahuel y Ancoa, además de evacuar el importante aumento de la generación de bajo costo de Ancoa 220 (que pasa de 2,49 a 7,6 p.u., es decir, a máxima capacidad).

Comparativamente respecto del caso anterior, cuando se consideran pérdidas, se suman 4 nuevos elementos a la red y se quita el circuito agregado entre C. Navia 110 y El Salto 110. En cuanto a los flujos, no existen cambios en los sentidos de estos, pero si en sus módulos. Esto resulta lógico si se considera que las pérdidas, dada su implementación en el modelo, se suman a las demandas de las barras. En este sentido, se observa que el grueso de los nuevos elementos de la red respecto del caso sin pérdidas se ubican en el tramo entre Charrúa y Alto Jahuel, sumando circuitos en Ancoa 500 – Alto Jahuel 500 y Candelaria 220 – Colbún 220, además de un nuevo transformador entre las barras de 500 kV y 220 kV de la subestación Charrúa. Esto se justifica por el fuerte aumento en el flujo que circula por este sector, debido a que la potencia evacuada desde la zona más austral del sistema aumenta en 4,5 p.u. (las líneas Charrúa 154 – Itahue 154 y Charrúa 500 – Ancoa 500 pasan de transportar 7,67 p.u. a 12,24 p.u.), aportados principalmente por el aumento de la generación en Charrúa 220. Toda esta nueva energía generada y transportada hacia el norte del sistema se debe a que entre Charrúa y Nogales se contabiliza cerca del 70% de la demanda del sistema, y no existe mayor capacidad de generación dentro de esa misma zona, haciendo necesaria el aumento de generación en el sur.

En cuanto a la influencia de los equipos FACTS en la expansión y operación del sistema, son dos los efectos claros: primero, hay una disminución en los costos de inversión totales y en líneas; y segundo, el costo de operación del sistema es menor.

Más allá de la disminución en los costos totales, es de mayor interés la disminución del valor de inversión en líneas. Se observa que tanto para el caso sin pérdidas como con pérdidas, los planes de expansión obtenidos cuando se consideran equipos FACTS corresponden a los mismos planes determinados para el caso sin FACTS pero con algunos elementos menos.

Así, en el caso sin pérdidas, de la inversión del plan sin FACTS de MUS\$5.521 se baja a un valor de inversión en líneas de MUS\$4.500, quitando la línea Nogales 220 – Polpaico 220, el circuito agregado entre las barras C. Navia 110 y El Salto 110, y sumando solo dos y no tres circuitos en el tramo Ancoa 220 – Colbún 220. Analizando el flujo de potencia del plan de expansión de líneas determinado para el escenario 3 (con FACTS, sin pérdidas) pero sin agregar los equipos FACTS propuestos, se observan que dos centros de demanda pasan a no ser completamente abastecidos: C. Navia 110, con 0,3941 p.u. y Tinguiririca 154, con 0,8113 p.u. de demanda no satisfecha. Esto da cuenta de la real utilidad de los equipos FACTS dentro de la operación, que al aumentar la capacidad de ciertas líneas, genera una redistribución de los flujos junto con un cambio en el perfil de generación del sistema, disminuyendo el costo global de operación y la inversión en líneas, y cumpliendo a la vez con la demanda completa del sistema. En el caso sin pérdidas, se logra una disminución del costo de generación de US\$9.345 y de inversión en líneas de MUS\$1.021, eliminando el traslado de energía de la zona norte a la zona centro (aparte de la generada en la barra Nogales 220) y llevando más energía de sur a centro. Esto último muestra la efectividad de los FACTS, ya que a pesar del aumento de energía llevada hacia el centro del sistema (aumenta el flujo transportado de 7,67 p.u. a 10 p.u.), la inclusión de estos equipos en las líneas Tinguiririca 154 – Itahue 154 y Candelaria 220 – Colbún 220 basta para suplir el circuito menos en Colbún 220 – Ancoa 220.

Para el caso con pérdidas, del plan presentado sin FACTS se omiten la nueva línea Nogales 220 – Polpaico 220, el circuito nuevo de Ancoa 500 – Alto Jahuel 500, uno de los circuitos de la línea Ancoa 220 – Colbún 220 y el transformador sumado en la subestación Alto Jahuel entre las barras 220 y 154. Además, se suma un circuito en la línea San Luis 220 – Quillota 220. Tal como en el caso anterior, se analiza el flujo de potencia del plan de expansión del escenario 4 pero sin los equipos FACTS, que da como resultado una demanda no abastecida en la barra Tinguiririca 154 de 0,4377 p.u., dando cuenta también en este caso de la utilidad de los equipos FACTS agregados. El plan de expansión con FACTS tiene un ahorro en costo de operación de US\$11.063 y de MUS\$575 en líneas. A diferencia de la situación anterior, más que una mayor generación proveniente del sur para cubrir las pérdidas (que son menos que las del escenario 2) la zona centro se abastece a partir de la generación extra de San Luis 220, permitido por el nuevo circuito de la línea San Luis 220 – Quillota 220 sumado al equipo FACTS instalado en la misma. Es importante recordar que la optimización realizada busca el menor valor total de inversión bajo la condición de que no exista desprendimiento de carga. En este sentido, para cada plan que se va determinando, se obtiene un nuevo flujo de potencia que muestra si la solución es factible o no (el modelo de la red considera re-despacho de generación). En consecuencia, se puede aprovechar la generación de ciertos puntos que en otras configuraciones no se hace, como en este caso, en que al agregar un nuevo circuito en San Luis 220 – Quillota 220, se obtiene un mayor despacho del generador en San Luis permitiendo la factibilidad del este plan de expansión.

Como se mencionó en el apartado 5.1.2, a modo de comparación con los resultados obtenidos, se determinan nuevos planes de expansión para los cuatro escenarios estudiados pero con un nuevo vector de costos de inversión, que se encuentra junto al resto de los datos del modelo reducido del SIC en el anexo D.2. Además, en la tabla D 5 se muestran los planes de expansión determinados para este nuevo vector de costos. En las figuras 26 y 27 se observan los diagramas unilineales para todos los casos.

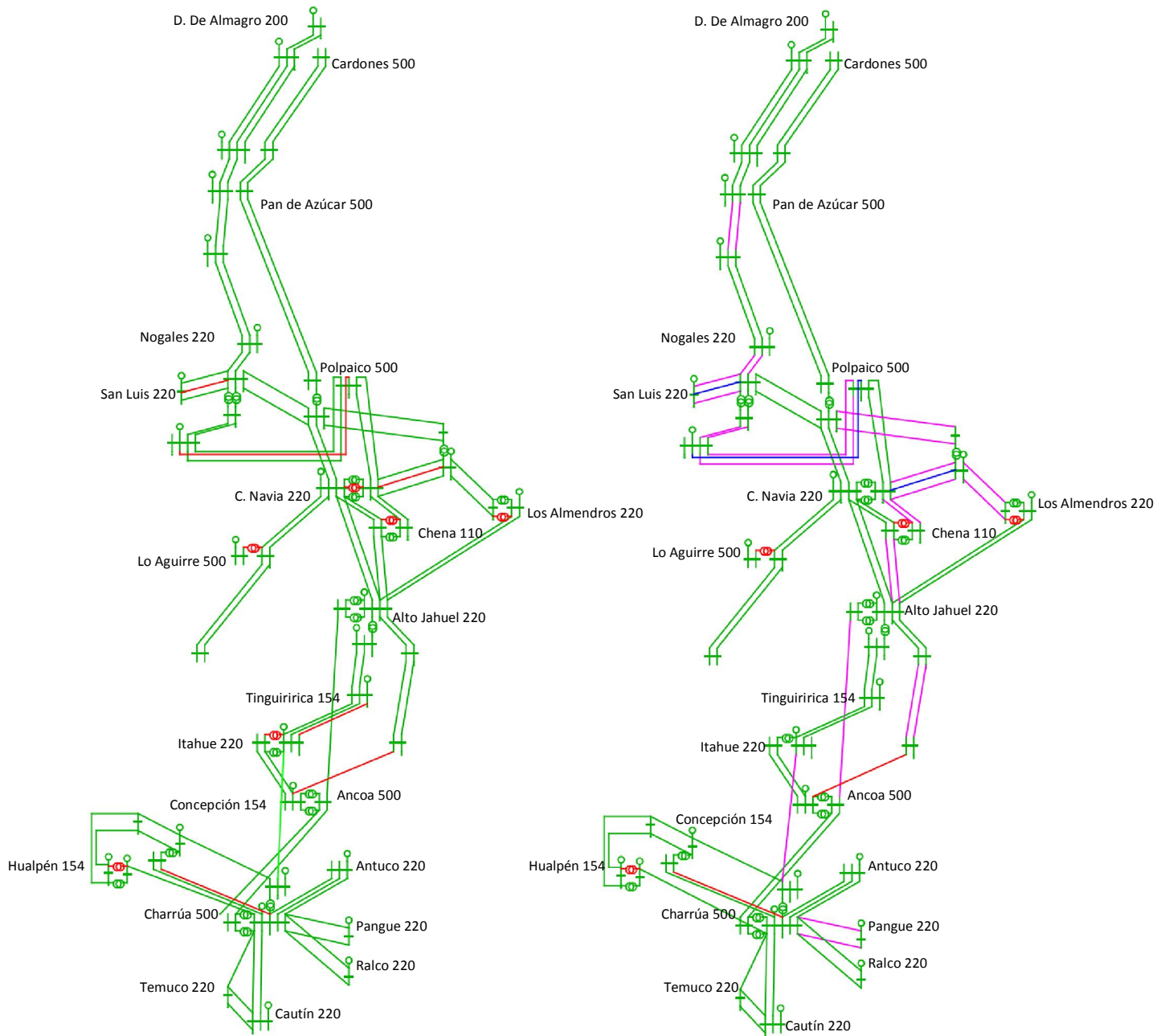


Figura 26: Diagramas unilineales de los planes óptimos de expansión sin (izquierda) y con (derecha) FACTS, sin pérdidas, para el vector de costos de inversión B

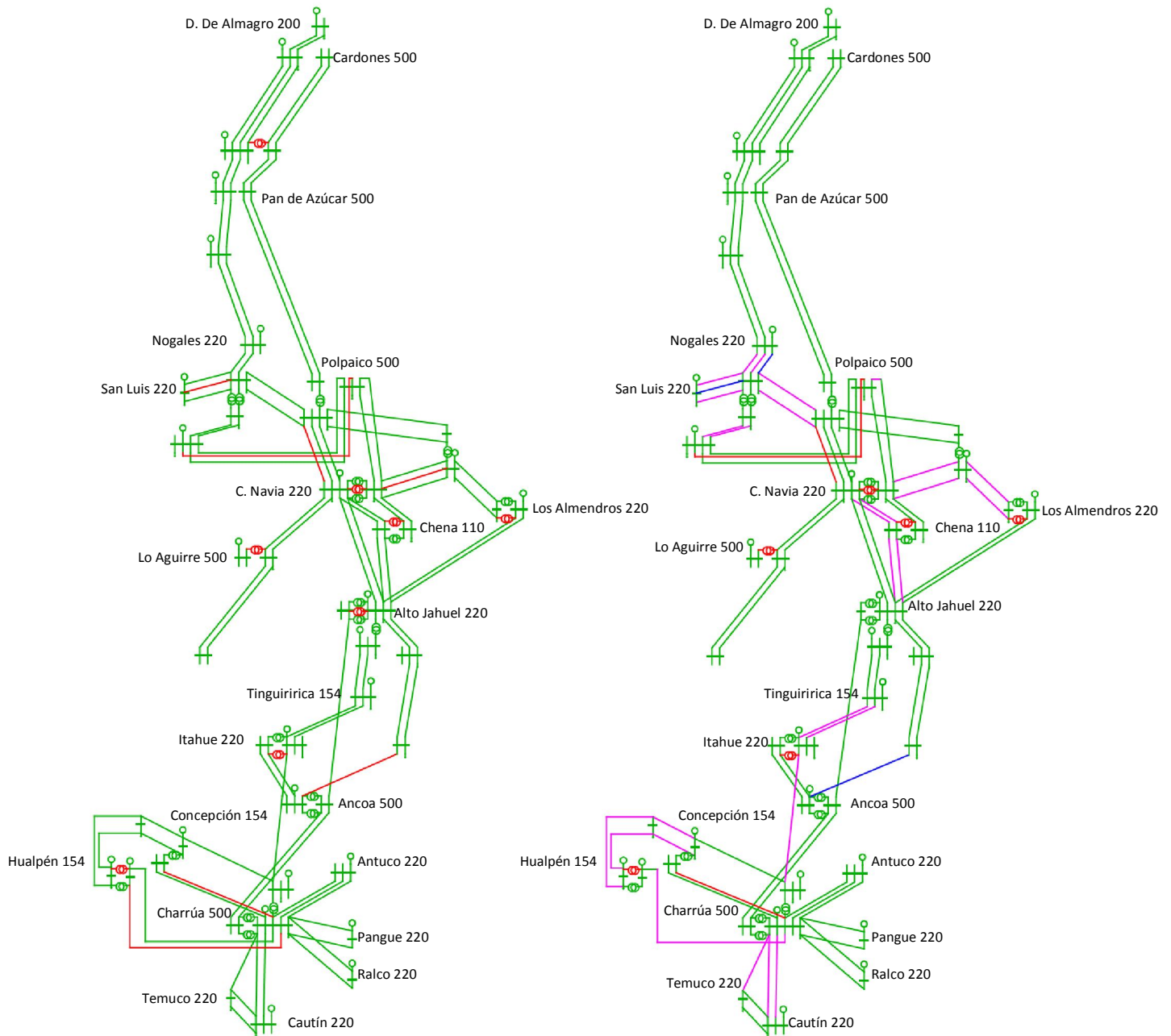


Figura 27: Diagramas unilineales de los planes óptimos de expansion sin (izquierda) y con (derecha) FACTS, con pérdidas, para el vector de costos de inversión B

Es importante comprender la diferencia entre los vectores de costos. Por un lado, el vector de costos A se generó en forma aleatoria con valores entre un valor mínimo y un máximo determinado a partir de las inversiones encontradas en el estudio de transmisión troncal para algunos proyectos considerados en este trabajo [56]. Por otra parte, y para comparar el efecto de los costos de inversión en la planificación y acercar más a la realidad el modelo realizado, el vector de costos B se genera en base a valores modulares de costo por kilómetro de línea de acuerdo al nivel de tensión de ésta. Estos valores modulares referenciales se determinan a partir de los distintos valores de inversión presentados en el informe técnico definitivo de precio de nudo [57], dividiéndolos por los kilómetros de línea de cada proyecto. Algo similar se realiza con

el valor de inversión para los transformadores, donde el costo de inversión se asigna de acuerdo a las tensiones de transformación. En la tabla 15 se encuentra los valores modulares utilizados para determinar el vector de costos B. Además, se agrega un valor fijo de US\$100.000 por kilometro al costo de inversión para aquellas líneas que son nuevas, es decir, que no solo significa agregar un circuito sino que también implica el levantamiento de torres, conexión a subestaciones, etc. (obtenido también del informe de precio de nudo).

Tabla 13: Valores modulares de línea y transformadores

Equipo	Tensión [kV]	Valor anual de inversión [MUS\$]
Transformador	220/110	1000
Transformador	220/154	1200
Transformador	500/220	2400
Circuito	110	10
Circuito	154	14
Circuito	220	20
Circuito	500	40

Al comparar los planes determinados con el vector B respecto de los del A, resalta inmediatamente que la mayor parte de los refuerzos propuestos en este último caso dentro del área que queda entre las barras Charrúa y Alto Jahuel, ya no son incluidos. Por ejemplo, los dos o tres circuitos agregados a la nueva línea Colbún – Ancóa, se reducen a solo 1, y los largos circuitos entre Ancoa y Alto Jahuel 500 kV, o Charrúa e Itahue 154 kV, no son considerados. El efecto de relacionar el costo de inversión con el largo en kilómetros de línea es evidente, sobre todo si se considera que para el vector de costos B el promedio de kilómetros de nuevos circuitos para todos los escenarios es de 220 km, mientras que en el caso del vector de costos A es de 670 km. Esto se debe a que los refuerzos son más localizados y la inversión se concentra en el sector centro, entre las barras Nogales y Chena, sumados a dos o tres elementos nuevos en el área que une el sector centro con el sur, zona en donde se suman dos o tres elementos más.

Por otro lado, se observa que para todos los nuevos planes óptimos la adición de un circuito entre San Luis 220 y Quillota 220 es un elemento común de expansión, que guarda relación con el aumento en la generación de la barra San Luis (aportando una diferencia de 270 MW, en promedio, más), compensando la disminución de la generación en la zona sur (bajando en promedio 300 MW) y del transporte hacia el centro del sistema (desde Charrúa salen 200 MW apróx. menos hacia la zona centro). Este cambio en el perfil de generación se traduce en una disminución en el costo de operación del sistema de entre US\$5.000 para el escenario 3 hasta los US\$24.000 para el escenario 1.

Cotejando plan a plan, se observa que la inversión en elementos tradicionales no difiere tanto de un caso a otro. Si se analizan los esquemas de expansión para el escenario 1, en la zona centro las inversiones son idénticas salvo la nueva línea Polpaico 220 – Nogales 220 para el vector A, que no existe en el plan del vector B y que en reemplazo incluye el nuevo circuito en San Luis 220 – Quillota 220. La gran diferencia, tal como se mencionó anteriormente, está entre Alto Jahuel y

Charrúa, ya que incluso la inversión en el sector sur es la misma. En esta zona, de acuerdo al diagrama de la Figura 24, se incluyen tres nuevos circuitos entre Colbún y Ancóa, uno entre Charrúa 154 e Itahue 154, y un nuevo transformador en Alto Jahuel (220/154). En el nuevo plan encontrado, la inversión se reduce a un circuito entre Colbún y Ancóa, otro entre Itahue y Tinguiririca, y un nuevo transformador en la subestación Itahue.

Como se puede ver, solo hay tres elementos nuevos, desde el punto de vista de la ubicación, mientras que el resto son lugares coincidentes respecto de lo encontrado para el vector A. Esto confirma algo obvio, y es que el valor de inversión es uno de los conductores de la planificación, aunque además muestra la existencia de ciertos elementos que son “obligatorios” dentro de la expansión, como núcleo de cualquier plan que se proponga. Revisando los planes determinados para ambos casos (vectores A y B) y el conjunto de otros planes subóptimos, se encuentra que la columna vertebral de cada expansión es la siguiente:

- 1 Circuito en Charrúa 220 – Concepción 220
- 1 Circuito en San Pedro 110 – Las Vegas 110
- 1 Circuito en Ancóa 220 – Colbún 220
- 1 Transformador 220/110 S.E. Chena
- 1 Transformador 220/110 S.E. Hualpén
- 1 Transformador 220/110 S.E. Los Almendros
- 1 Transformador 500/220 S.E. Lo Aguirre

A partir de esta base, se engendran las diferenciaciones de un escenario a otro, con un vector u otro, acercándose los planes de expansión óptimos a uno que requiera la menor cantidad de elementos extras aparte de los pertenecientes a este núcleo. En el caso del plan determinado para el escenario 3 con el vector de costos de inversión B, esta situación es casi la que podría llamarse óptima, dado que a la base de los 8 elementos solo se agrega un circuito más entre las barras C. Navia 110 y el Salto 110, pero con una fuerte inversión en equipos FACTS. Los otros planes agregan ya 3 o más elementos a esta base, siendo menos en el caso sin pérdidas, y a su vez, menos cuando se utilizan FACTS. En este sentido, los resultados determinados para este nuevo vector de costos reafirman la capacidad de estos dispositivos para disminuir la inversión en elementos tradicionales, permitiendo la factibilidad de planes que sin estos equipos, no lo serían. Tal es el caso del plan determinado para el escenario 3, que si no utiliza FACTS, el sistema queda con 0,89 p.u., es decir, 89 MW no suministrados.

Por último, al valorizar los planes propuestos en esta nueva condición de costos, a los valores de inversión del vector A, se observa que prácticamente todos llevan a una inversión en líneas mayor que los óptimos presentados en la tabla 14. Solo en el caso del escenario 3 se llega a un plan de menor costo en elementos tradicionales, pero con una inversión en FACTS mucho mayor (de US\$103.000 aumenta a US\$627.000), compensando este saldo a favor. En términos prácticos, ninguno de estos nuevos planes de expansión sería óptimo en el caso primero.

5.3 Comentarios sobre la aplicación al modelo reducido del SIC

A lo largo del capítulo 5 se ha revisado el desempeño del algoritmo genético propuesto al ser aplicado en un sistema de gran tamaño como el modelo propuesto del SIC de 50 barras, y además se ha determinado un plan de expansión óptimo para cada uno de los 4 escenarios para dos condiciones de costos de inversión.

Dada la naturaleza aleatoria de los mecanismos del algoritmo genético, para analizar su comportamiento se generan 30 planes de expansión para cada condición que se impone, tanto para los parámetros que controlan el algoritmo como cuando se quiere determinar una expansión óptima.

De esta manera, al estudiar el desempeño del algoritmo desde el punto de vista del tiempo de procesamiento frente al aumento del tamaño de la población o del número máximo de generaciones se observa una relación lineal entre estos, aumentando el tiempo a medida que crece cualquiera de estos dos parámetros. Además, cuando se incluyen pérdidas en el modelo de la red, como se vio en los sistemas de validación, el tiempo promedio aumenta al doble del caso sin pérdidas, recordando que esto se debe al doble uso que se hace de la función *linprog* para determinar la factibilidad de una configuración por medio del flujo de potencia (un flujo para obtener las pérdidas, y otro para obtener el flujo final con pérdidas incluidas en las demandas del sistema). Por esta misma razón, es la función de evaluación de factibilidad la que genera la mayor carga de procesamiento de toda la programación, acaparando prácticamente el 99% del tiempo por iteración, e incluso absorbiendo cualquier efecto que pudiese tener la inclusión de equipos FACTS al problema, observándose un efecto más atendible cuando el tiempo total supera los 200 segundos. En el análisis más específico, el tiempo de cada iteración se encuentra relacionado al tamaño de la población, que define la cantidad de información que tiene que procesar cada uno de los mecanismos del algoritmo genético, mientras que el máximo de generaciones fija la cantidad máxima de veces que podrá aplicarse el ciclo de selección – recombinación – mutación. La combinación de ambos parámetros definirá la calidad del plan óptimo de expansión, dado que aunque se mantenga iterando por un tiempo prolongado el algoritmo, si la cantidad de información inicial es pobre, la búsqueda por el universo de soluciones también lo será. De igual manera, por mucha variedad de información que se tenga en un comienzo, si no se da el tiempo suficiente para que actúen los mecanismos del algoritmo, la solución determinada será deficiente. En este ámbito también interviene la condición de salida prematura que se fija (*kstop* o generaciones de detención), que de ser muy baja, llevará a la entrega de un plan subóptimo. De todas formas, dada la amplitud del universo de soluciones y la velocidad de convergencia del problema, a excepción de que el valor de *kstop* se encuentre entre 1 y 4, el algoritmo no presentará convergencia prematura para el sistema reducido del SIC.

Ya se vio que los parámetros de tamaño de población, máximo de generaciones y generaciones de detención condicionan el tiempo total de procesamiento del algoritmo. Por otro lado, las tasas de recombinación y mutación guardan una estrecha relación con la convergencia del algoritmo

genético hacia un valor óptimo de inversión, controlando el nivel de interacción entre los individuos de la población y los cambios asociados a cada uno de estos y las futuras generaciones. Es así como para la tasa de recombinación se observa que la diferencia en promedio de inversión, cuando la tasa es de 0,2 a cuando es de 0,95, puede llegar hasta a los MUS\$6.000, como se ve para el caso del escenario 4. Por lo tanto, a mayor recombinación, mayor es la diversificación de la búsqueda, y la exploración del universo aumenta su amplitud de barrido. De todas formas, el alcance que puede tener este mecanismo estará condicionado por la información genética disponible en la población inicial. Es en este inconveniente en que interviene la mutación, ya que por medio del cambio de los genes de los individuos, el algoritmo puede intensificar su la búsqueda en la vecindad de cada uno de estos, además de entregar la posibilidad de ingresar nueva información a la población cuando esta se ha perdido con el avance de las generaciones o simplemente, nunca había existido. A pesar de la mejora que introduce el mecanismo de mutación, los resultados muestran que por mucho que aumente su tasa de acción, la mejor en la convergencia no es tan agresiva como para el caso de la recombinación, por lo que su efecto es importante cuando va de la mano de esta última.

En cuanto al comportamiento de los equipos FACTS, los resultados muestran que el promedio de inversión en estos dispositivos está manejado directamente por el parámetro que fija su número, es decir, *nfacts* y no por el flujo que circula por el sistema, que resulta determinante a la hora de definir la cantidad de circuitos y/o transformadores que puede requerir la red y, por lo tanto, el monto de inversión en el cual se incurre para incluirlos. Por esta misma razón es que no se observan mayores diferencias en el promedio de inversión en FACTS entre el caso sin pérdidas, y el caso que si las incluye en el modelo de la red. Lo que sí cabe destacar es que un mayor valor de *nfacts* no significa necesariamente una mayor inversión en estos elementos, sino que se pueden cotejar una mayor cantidad de ubicaciones para estos equipos en el sistema, lo que eventualmente se puede traducir en un mayor costo en el que se incurre. Esto queda claramente demostrado en el gráfico de la Figura 21, que muestra la gran dispersión de los valores de inversión en FACTS para los 30 planes determinados para el caso en que *nfacts* se fijó en 0,2.

Respecto a la influencia de los FACTS en la convergencia del algoritmo, su efecto principal es claro, y los resultados determinados en este capítulo solo reafirman lo determinado en los sistemas de validación, y es que al incluirlos como posibles elementos dentro de la expansión, la inversión promedio en elementos tradicionales disminuye. Esto se hace extensivo a la inversión total promedio dependiendo del caso. Así, cuando no se consideran pérdidas, este valor alcanza un mínimo que coincide con el valor más bajo de la inversión mínima encontrada para el mismo número de FACTS. Esto da cuenta de que, aunque pueda aumentar el número de FACTS, existe un punto dentro de la curva de inversión en líneas que no puede ser mejorado, por lo que alcanzada esta base, al incluir más FACTS simplemente se abultará más el valor total de la inversión. Adelantándose un poco en los resultados, esto se observa al comparar los resultados obtenidos para el vector de costos de inversión A con aquellos obtenidos para el vector B, donde se observa que independiente de esta diferencia, existe una “columna vertebral” de inversión, que es común para estos planes encontrados para los diferentes escenarios en los que se estudia el modelo reducido del SIC, y que está conformada por 8 elementos.

Los equipos FACTS, entendidos como elementos accesorio de la red (no pueden ser instalados en un línea sin circuitos), a nivel del problema de TNEP, tiene la gran característica de que, por medio de las mejoras que ofrecen a la capacidad de transmisión, transforman planes de expansión que sin la inclusión de estos elementos no serían factibles y, por lo tanto, hacen crecer el universo de posibles soluciones. Es por esta razón que comparativamente en los resultados obtenidos considerando equipos FACTS, la convergencia resulta más lenta que en el caso sin éstos.

Por último, sobre la expansión misma del sistema reducido del SIC, para ambos vectores de costos de inversión propuestos se determinó una base de expansión común para los más de 100 planes encontrados en la búsqueda del óptimo (recordar que también en este caso se obtienen 30 planes por condición de parámetros del algoritmo y del sistema) y cuyo foco principal es el refuerzo de la zona centro, en donde se suman 5 de los 8 elementos propuestos por este núcleo de expansión (el resto de los elementos se ubican en la zona sur). En lo singular, para el caso del vector de costos de inversión A, existe una fuerte adición de nuevos elementos entre Charrúa y Alto Jahuel, para llevar energía de la zona sur, en donde crece en forma importante la generación, al centro del sistema y suplir la demanda allí requerida. Es aquí donde se encuentra la principal diferencia entre los planes de los costos A y los de B, dado que en este último caso, la inversión entre las barras mencionadas disminuye notoriamente (en términos de la cantidad de nuevos elementos en el primer caso se llegan incluso a instalar 7, mientras que en el segundo, como máximo se agregan 3). A cambio de esto, se incluye obligatoriamente para todos los planes del vector B, un nuevo circuito en la línea San Luis 220 – Quillota 220, para poder aumentar la generación del nodo San Luis y así alimentar la zona centro del sistema, disminuyendo así la producción de energía en la zona sur, y de paso, justificando la menor inversión en la zona de conexión entre centro y sur.

La diferencia en los valores de inversión (para los resultados obtenidos con el vector de costos de inversión A) generada por la utilización de equipos FACTS en la expansión es más notoria para el caso sin pérdidas, presentando una disminución de un 11% en el total de inversión correspondiente a un 18% cuando se habla de la inversión en líneas. Estos porcentajes disminuyen a 5% y 8%, respectivamente, cuando el modelo de la red considera pérdidas. Resulta destacable, como se dijo anteriormente, que los planes de inversión cuando consideran FACTS, son prácticamente los mismos planes que sus símiles sin FACTS (con y sin pérdidas), salvo que ciertos elementos no son incluidos. Esta situación también se observa en los sistemas de validación, dando cuenta que de cierta forma, los equipos FACTS no son elementos que sostengan en forma independiente la expansión del sistema, sino que su utilidad radica en la característica que tienen para aumentar la utilización de las líneas existentes, evitando así la adición de nuevos circuitos por culpa del aumento de los flujos por sobre el límite de estabilidad de éstas.

Capítulo 6 Conclusiones

En este trabajo se utilizó un modelo DC de la red considerando pérdidas eléctricas, con el cual se obtuvo soluciones óptimas para distintos sistemas de prueba, dentro de tiempos razonables de procesamiento. Además, gracias a la simplicidad del modelo, se incluyó la utilización de equipos FACTS, permitiendo estudiar el comportamiento del problema de TNEP cuando estos dispositivos son considerados.

6.1 Conclusiones sobre el trabajo de tesis

Considerando todas las características que ofrecen cada uno de los equipos FACTS y tomando en cuenta el modelo de la red utilizado en este trabajo, la compensación en serie permite de manera efectiva y simple el control de flujo sobre las líneas, además de mejorar el límite de transmisión, razones por las cuales este tipo de compensación es utilizada en parte amplia de la literatura sobre el problema de planificación en transmisión, al igual que en este trabajo.

En lo que respecta al algoritmo genético propuesto, por medio de los sistemas de validación utilizados se pudo comprobar la efectividad de éste para resolver el problema de TNEP. Esto se concluye dado que los resultados obtenidos son equivalentes o cercanos a los de la literatura, presentando algunas diferencias solo por efecto del modelo de pérdidas que se utilizó para la modelación de la red eléctrica. Cabe recordar que el TNEP es un problema de gran complejidad, de programación entera mixta, combinatorial y no lineal. Todas estas características hacen que la obtención de una solución óptima no sea trivial.

Respecto a las pérdidas, con el modelo lineal son mayores aunque, comparativamente, no representan una diferencia determinante en el modelo, razón por la que se pueden obtener planes de expansión sumamente cercanos a aquellos determinados bajo un esquema no lineal de pérdidas.

Por otro lado, el algoritmo constructivo da cuenta de la efectividad del algoritmo genético en la búsqueda de una solución óptima para el problema de TNEP, que considera un universo amplio de posibles configuraciones. Aunque en el caso del sistema de Garver (que solo cuenta con 6 barras y 15 líneas de expansión) ambos algoritmos generan planes de expansión con costos similares (una diferencia de 18% en el caso sin pérdidas, y 0% con pérdidas), en el caso del sistema IEEE-24 (24 barras y 32 líneas de expansión) se observa a cabalidad la conveniencia y eficacia del genético por sobre el constructivo, llegando a una diferencia promedio del 86% en el costo de inversión. La contraparte de utilizar la metaheurística planteada radica en el tiempo de procesamiento, que es mucho mayor.

A pesar de que este algoritmo requiere más tiempo de procesamiento para obtener un resultado satisfactorio, se ha demostrado que su aplicación a sistemas pequeños y de mediano tamaño permite obtener planes de expansión óptimos. De todas formas, en el caso de que se trate de sistemas pequeños, un algoritmo constructivo puede bastar para llegar a una buena solución en mucho menos tiempo.

Por medio de los resultados obtenidos al aplicar el algoritmo genético a los sistemas de validación considerando la utilización de equipos FACTS, se logró determinar que estos dispositivos permiten disminuir el costo de inversión en líneas, aunque no necesariamente el costo total de inversión de la expansión del sistema (líneas más FACTS). Desde luego, aunque este valor puede ser mayor, la inversión en líneas es menor, lo que se traduce en otros beneficios que, al menos en este trabajo, no son valorizados, como un aumento en la flexibilidad del sistema, la mejora de la estabilidad, entre otros ya mencionados en capítulos anteriores.

Respecto de las pérdidas, el efecto de los equipos FACTS es directo sobre la reactancia de la línea, y no intervienen en la resistencia de ésta, por lo que no tendrán algún tipo de influencia en cómo se determina (con el modelo utilizado). Por lo tanto, la relación de los FACTS con las pérdidas es indirecta dado que afectan el flujo por las líneas en las cuales se conectan, además de generar una redistribución del flujo por el resto de las líneas del sistema, elemento que finalmente definirá las pérdidas de la red.

Para la aplicación del algoritmo propuesto en sistemas de mayor tamaño, a partir del modelo reducido del SIC presentado por M. Neicún en su memoria de título [84], se generó un modelo actualizado del SIC para el año 2022. Dado que el modelo utilizado es “nuevo”, la única referencia comparativa son los resultados mismos obtenidos. Teniendo esto en consideración, se pudo verificar la utilidad de los equipos FACTS en sistemas de mayor tamaño, ya que, tanto para el caso con pérdidas, como sin pérdidas, los planes de expansión determinados presentaron un costo total de inversión menor cuando se consideró la utilización de estos dispositivos.

En el análisis de sensibilidad del algoritmo propuesto aplicado sobre el modelo reducido del SIC, se encuentra una clara correlación del tamaño de la población y el número máximo de generación con la calidad de los planes de inversión obtenidos. Así, a medida que aumenta alguno de estos parámetros (o ambos a la vez), el promedio de inversión total va disminuyendo asintóticamente mientras el algoritmo se acerca a un valor óptimo. De manera similar se establece una relación entre estos parámetros y el tiempo de procesamiento en la que se observa que este último crece linealmente con los primeros, y que el caso con pérdidas toma el doble de tiempo que el caso sin pérdidas, como consecuencia del doble cálculo del flujo de potencia en el primer caso. En este mismo tema, se determina que la intervención de los equipos FACTS es prácticamente despreciable, y que solo tiene un efecto considerable cuando el número de generaciones es alto (aun así resulta ser leve).

La influencia de las tasas de mutación y recombinación es similar a lo que ocurre con los parámetros de tamaño de población y máximo de generaciones, es decir, a medida que aumentan

su valor, el costo de inversión total promedio disminuye. Este efecto es mucho más notorio en el mecanismo de recombinación, dado que al aumentar el valor de su tasa aumenta la variedad de individuos, llevando al algoritmo a diversificar la exploración en el universo de soluciones, aumentando así la probabilidad de encontrar mejores planes de expansión. En el caso de la tasa de mutación, con el aumento de su valor se observa una leve mejora del valor de inversión promedio, aunque no tan notoria como la del mecanismo de recombinación, dado el efecto local que tiene su aplicación (solo cambia un gen dentro del individuo) que no le permite alejarse mayormente de la vecindad de cada configuración

Por último, en lo que a desempeño del algoritmo se refiere, la cantidad de equipos FACTS como alternativas plausibles de ser instalados depende solo del valor del parámetro n_{facts} , mostrando independencia respecto del flujo total que transporta el sistema. Lo que si depende del flujo es su efectividad en cuanto a costo de inversión total y de líneas, y la utilidad a la hora de determinar un mínimo de inversión. En este sentido, para el caso sin pérdidas, un número mayor al 40% de equipos FACTS dentro del sistema resulta contraproducente, a pesar de que en promedio la inversión en líneas disminuye a medida que aumenta su cantidad, lo contrario sucede con el mínimo de inversión y el costo total, que aumentan frente a un número mayor del 40%. En el caso con pérdidas, la situación es similar, y aunque se observa una disminución del mínimo con el aumento de FACTS, este es inestable y el promedio de la inversión total se mantiene relativamente constante a partir del 50% de equipos FACTS, incluso aumentando cuando se llega a valores mayores al 80%. Esto también guarda relación con el mínimo de inversión que tiene el sistema, como se mencionó anteriormente. Dada la clasificación que se podría dar a los equipos FACTS de elementos “accesorios” del sistema, ya que actúan sobre otro equipos de la red (en este caso, circuitos), su sola instalación no será suficiente para cumplir con la necesidad de cumplir con el transporte de energía de sus lugares de generación a los de consumo. Es por esto que estos dispositivos cumplen con el rol de ser “habilitadores” de planes de expansión, en el sentido de que transforman en factibles configuraciones del sistema que sin la existencia de FACTS no lo serían, y por lo mismo, dan cuenta de un mínimo requerido de instalaciones tradicionales nuevas. En consecuencia, por muchos equipos FACTS que sean instalados, la inversión tendrá un piso fijado por este “núcleo” de circuitos y/o transformadores, y por lo tanto, si aumenta la inversión en FACTS, el valor total (una vez alcanzado el mínimo en líneas) irá aumentando.

La disminución de la inversión en líneas al utilizar equipos FACTS se debe a dos aspectos principalmente: la redistribución de flujos y los cambios en el perfil de generación. Cuando cambian las capacidades de transporte en la red y las reactancias de las líneas, los flujos se acomodan a las nuevas condiciones del sistema, así como también la generación. Por lo tanto, estos dispositivos encuentran su utilidad en la característica que tienen para aumentar la utilización de las líneas existentes, evitando así la adición de nuevos circuitos por culpa del aumento de los flujos por sobre el límite de estabilidad de éstas. Desde el punto de vista de la instalación de elementos tradicionales en la red, son dos los motores que discriminan donde y cuanto instalar: la energía no suministrada y los valores de inversión de cada individuo dentro de la población. A partir de la población inicial, el algoritmo va avanzando por medio de los mecanismos de selección, recombinación y mutación, y los individuos con mejor función de *fitness* son los que tienen mayor probabilidad de pasar sus genes a las generaciones futuras. Esto en términos del problema de TNEP implica que aquellas configuraciones que tengan menor costo

de inversión y que cumplan con ser soluciones factibles, es decir, que no presentan energía no suministrada, serán las que tengan mayor probabilidad de entregar elementos útiles a la siguiente iteración. Por lo tanto, lo que determina la conexión o no de un elemento dentro del plan óptimo de expansión es su capacidad de aportar en términos de la factibilidad del abastecimiento de energía, en conjunto con otros elementos, y que implique un bajo costo de inversión.

La inclusión de equipos FACTS dentro del problema de planificación de la expansión de los sistemas de transmisión permite disminuir la inversión en líneas y/o transformadores, es decir, elementos tradicionales de la red (tanto cuando se consideran pérdidas como cuando no), lo que trae consigo una serie de beneficios, no valorizados aquí, en términos de servidumbres (evitar incluir una nueva línea o circuito en la red hace innecesaria la ocupación de nuevos terrenos, que en caso de ser de propietarios particulares puede tornarse en una tarea engorrosa y que encarece el proyecto), menor impacto ambiental (impacto visual de torres y líneas, además de la ocupación de fajas importantes de terrenos, muchas veces, poseedores de reservas importantes de flora y fauna silvestre), mayor flexibilidad de la inversión (los equipos FACTS pueden ser reubicados, no así las líneas) y posibles mejoras dinámicas a nivel de operación del sistema (mejoras de estabilidad, amortiguación de oscilaciones, entre otras características brindadas por las capacidades subyacentes de estos equipos).

El principal aporte de este trabajo de tesis es la propuesta de un algoritmo genético para la resolución del problema de planificación de la expansión del sistema de transmisión eléctrico, para un modelo lineal en corriente continua de la red, con y sin pérdidas, y que considera en forma simultánea como posibles nuevos elementos: circuitos, transformadores y equipos FACTS. Entre los otros aportes de este trabajo, se encuentra:

- Se realiza una revisión bibliográfica de las distintas metaheurísticas propuestas para resolver el TNEP, describiendo las características de cada una de estas, y las modificaciones o mejoras que han introducido distintos autores.
- Se analizan las distintas características que pueden ser consideradas para modelar el sistema de transmisión eléctrico, y los focos bajo los cuales puede ser analizado el problema de TNEP.
- Se entrega un estudio resumido de los distintos equipos FACTS, sus características y los beneficios de su utilización en los sistemas de potencia.
- Se desarrolla un algoritmo genético en lenguaje MATLAB® para resolver el problema de TNEP, para un modelo DC con y sin pérdidas de la red, y considerando o no equipos FACTS como elementos de expansión, que puede ser aplicado sobre cualquier sistema.

6.2 Trabajos futuros

Aunque los resultados obtenidos son satisfactorios respecto del alcance y los objetivos de este trabajo, siempre se pueden realizar mejoras y mayores aportes al tema estudiado. En este sentido, se proponen los siguientes temas como trabajos futuros para darle continuidad al estudio realizado en esta tesis:

- Mejorar el algoritmo genético propuesto: este tipo de metaheurística ha sido ampliamente utilizada por lo que existen distintas variantes que pueden mejorar su desempeño. En lo particular de este trabajo se propone mejorar el sistema de selección, reteniendo los mejores progenitores para que pasen a las siguientes generaciones, pero además, mantener ciertas configuraciones de menor *fitness* de modo de tener mayor cantidad de información, logrando así diversificar la búsqueda del algoritmo. Esto permitirá que el algoritmo pueda recorrer en forma más exhaustiva diferentes regiones del universo de soluciones sin perder los mejores genes encontrados en cada generación.
- Mejorar la función que genera la población inicial: determinar la población inicial con equipos FACTS y elementos tradicionales en forma conjunta, y no separadamente (primero determinar planes de expansión tradicional y luego donde se ubicarían los equipos FACTS). Esto entregará una mejor calidad de la población inicial, lo que podría acelerar la búsqueda hacia las soluciones aquí presentadas, e incluso a poder encontrar mejores soluciones.
- Incluir en la implementación del algoritmo genético con FACTS una función de “limpieza” que elimine tanto elementos tradicionales como equipos FACTS sobrantes dentro de los planes determinados, de manera de chequear si pueden mejorar los resultados obtenidos sin compromiso del suministro de energía a las demandas del sistema, pudiendo disminuir el costo de inversión de la solución óptima.
- Ampliar el modelo de la red: en este sentido son muchas las cosas que se pueden incluir, por ejemplo estudiar por medio de distintos escenarios de generación y demanda el comportamiento de la red, de manera tal de determinar un plan de expansión acorde a las necesidades reales del sistema y no a la máxima demanda que no ocurre en el 100% de las ocasiones. Por otra parte, se propone realizar un modelo dinámico del problema de TNEP, y así determinar cuándo invertir en nuevas instalaciones.
- Por último, incluir dentro del algoritmo la movilidad de los equipos FACTS, en caso de que se considere un modelo dinámico de la red. Esto quiere decir, poder determinar la expansión año a año, considerando que los equipos FACTS previamente instalados tienen la capacidad de ser trasladados de un punto a otro (con el costo que esto implique), dando cuenta de la flexibilidad que poseen estos equipos y que le entregan a la red.

Anexo A Datos de los sistemas de validación

A continuación se presenta toda la información requerida de las líneas, la generación y la demanda de los sistemas de prueba utilizados para validar el algoritmo propuesto.

A.1 Sistema de 6 barras de Garver

El sistema presentado por Garver [24] ha sido ampliamente utilizado para la validación de algoritmos, gracias a que su óptimo global es conocido. Aquí se presentan los datos utilizados en este trabajo, que consideran una potencia base de 100 MVA y un máximo de 4 circuitos por línea, tanto para las existentes como para las nuevas.

Tabla A 1: Datos de líneas del sistema de Garver

De	Hacia	N° Circuitos	X [p.u.]	R [p.u.]	Flujo máx. [MW]	C. Inversión [US\$]
1	2	1	0,4	0,1	100	40
1	3	0	0,38	0,09	100	38
1	4	1	0,6	0,15	80	60
1	5	1	0,2	0,05	100	20
1	6	0	0,68	0,17	70	68
2	3	1	0,2	0,05	100	20
2	4	1	0,4	0,1	100	40
2	5	0	0,31	0,08	100	31
2	6	0	0,3	0,08	100	30
3	4	0	0,59	0,15	82	59
3	5	1	0,2	0,05	100	20
3	6	0	0,48	0,12	100	48
4	5	0	0,63	0,16	75	63
4	6	0	0,3	0,08	100	30
5	6	0	0,61	0,15	78	61

Tabla A 2: Datos de generación y demanda del sistema de Garver

BUS	P máx. [MW]	C. Gen. [US\$/MW]	Carga [MW]	C. de falla [US\$/MW]
1	150	10	80	355
2	0	0	240	355
3	360	20	40	355
4	0	0	160	355
5	0	0	240	355
6	600	30	0	355

A.2 Sistema IEEE 24 Bus

El sistema de 24 barras del IEEE corresponde a una de las áreas del sistema IEEE RTS 1996 presentado en [81]. Para este sistema también se considera una potencia base de 100 MVA, pero con un límite de circuitos por línea de 3. Existen dos aristas de este sistema: uno que considera las 34 líneas existentes para poder realizar la expansión; y otro que además de estas 34, utiliza 7 nuevas líneas. En el caso de este trabajo se considera el primer caso, por lo que la información entregada corresponde al sistema de 34 líneas.

Tabla A 3: Datos de línea sistema IEEE 24 Bus

De	Hacia	N° Circuitos	R [p.u.]	X [p.u.]	Flujo máx. [MW]	C. Inversión [10 ⁶ US\$]
1	2	1	0,0026	0,0139	175	3
1	3	1	0,0546	0,2112	175	55
1	5	1	0,0218	0,0845	175	22
2	4	1	0,0328	0,1267	175	33
2	6	1	0,0497	0,192	175	50
3	9	1	0,0308	0,119	175	31
3	24	1	0,0023	0,0839	400	50
4	9	1	0,0268	0,1037	175	27
5	10	1	0,0228	0,0883	175	23
6	10	1	0,0139	0,0605	175	16
7	8	1	0,0159	0,0614	175	16
8	9	1	0,0427	0,1651	175	43
8	10	1	0,0427	0,1651	175	43
9	11	1	0,0023	0,0839	400	50
9	12	1	0,0023	0,0839	400	50
10	11	1	0,0023	0,0839	400	50
10	12	1	0,0023	0,0839	400	50
11	13	1	0,0061	0,0476	500	66
11	14	1	0,0054	0,0418	500	58
12	13	1	0,0061	0,0476	500	66
12	23	1	0,0124	0,0966	500	134
13	23	1	0,0111	0,0865	500	120
14	16	1	0,005	0,0389	500	54
15	16	1	0,0022	0,0173	500	24
15	21	2	0,0063	0,049	500	68
15	24	1	0,0067	0,0519	500	72
16	17	1	0,0033	0,0259	500	36
16	19	1	0,003	0,0231	500	32
17	18	1	0,0018	0,0144	500	20
17	22	1	0,0135	0,1053	500	146

18	21	2	0,0033	0,0259	500	36
19	20	2	0,0051	0,0396	500	55
20	23	2	0,0028	0,0216	500	30
21	22	1	0,0087	0,0678	500	94

Tabla A 4: Datos de generación y demanda del sistema IEEE 24 Bus

Bus	P máx. [MW]	C. Gen. [US\$/MW]	Carga [MW]	C. de falla [US\$/MW]
1	576	169,78	324	800
2	576	169,78	291	800
3	0	0	540	800
4	0	0	222	800
5	0	0	213	800
6	0	0	408	800
7	900	93,717	375	800
8	0	0	513	800
9	0	0	525	800
10	0	0	585	800
11	0	0	0	800
12	0	0	0	800
13	1773	90,987	795	800
14	0	0	582	800
15	645	205,322	951	800
16	465	16,172	300	800
17	0	0	0	800
18	1200	8,19	999	800
19	0	0	543	800
20	0	0	384	800
21	1200	8,19	0	800
22	900	0	0	800
23	1980	48,074	0	800
24	0	0	0	800

Anexo B Datos de flujo de potencia de los planes de expansión óptimos para los sistemas de validación

A continuación se presentan los datos de los flujos de potencia determinados para cada uno de los planes óptimos, además de la referencia de flujo de los sistemas sin expandir.

Tabla B 1: Flujo de potencia de planes de expansión óptimos para el sistema de Garver

		Sin pérdidas			Con pérdidas		
		Sin Expansión	Genético	Genético FACTS	Sin Expansión	Genético	Genético FACTS
Generación	1	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500
	2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	3	2,400	3,121	3,506	2,450	3,251	3,577
	4	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	6	0,000	2,979	2,594	0,000	3,413	3,086
Flujos	1-2	-0,263	-0,409	-0,214	-0,265	-0,117	-0,170
	1-3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	1-4	-0,329	0,388	-0,072	-0,325	-0,072	-0,023
	1-5	-0,526	-0,679	-0,414	-0,530	-0,504	-0,500
	1-6	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	2-3	1,000	1,000	1,120	1,000	0,730	1,051
	2-4	-0,230	0,991	0,106	-0,222	0,008	0,136
	2-5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	2-6	0,000	0,000	0,959	0,000	1,640	1,114
	3-4	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	3-5	-1,000	-1,721	-1,986	-1,000	-2,000	-2,000
	3-6	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	4-5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	4-6	0,000	2,979	1,635	0,000	1,619	1,824
5-6	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
Ángulos	1,000	-0,063	0,087	0,018	-0,062	0,018	0,025
	2,000	0,043	0,250	0,104	0,044	0,065	0,094
	3,000	-0,157	0,050	-0,098	-0,156	-0,081	-0,075
	4,000	0,135	-0,146	0,061	0,132	0,062	0,039
	5,000	0,043	0,223	0,101	0,044	0,119	0,125
	6,000	-1,571	-0,444	-0,184	-1,571	-0,181	-0,207

Tabla B 2: Flujo de potencia de planes de expansión óptimos para el sistema IEEE-24

		Sin pérdidas			Con pérdidas		
		Sin Expansión	Genético	Genético FACTS	Sin Expansión	Genético	Genético FACTS
Generación	1	5,760	5,727	5,760	5,760	5,760	5,597
	2	5,760	5,760	5,760	5,760	5,737	5,760
	3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	4	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	6	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	7	5,500	9,000	7,670	5,524	9,000	9,000
	8	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	9	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	11	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	12	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	13	13,497	15,595	15,245	13,819	15,162	15,323
	14	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	15	1,112	3,247	4,387	2,021	1,786	6,106
	16	4,650	4,650	4,650	4,650	4,650	4,650
	17	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	18	6,520	3,770	3,535	6,290	12,000	4,018
	19	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	21	9,544	12,000	12,000	10,552	8,245	12,000
	22	8,925	9,000	9,000	9,000	9,000	9,000
	23	17,453	16,750	17,493	17,807	18,105	17,800
	24	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Flujos	1-2	0,113	0,206	0,176	0,018	0,093	0,181
	1-3	-0,883	-0,943	-0,815	-0,963	-0,903	-0,733
	1-5	-1,750	-1,750	-1,881	-1,656	-1,677	-1,750
	2-4	-1,539	-1,562	-1,593	-1,611	-1,573	-1,523
	2-6	-1,199	-1,083	-1,080	-1,281	-1,116	-1,077
	3-9	0,536	0,608	0,317	0,373	0,536	0,344
	3-24	3,982	3,849	4,267	4,000	4,000	4,367
	4-9	0,681	0,658	0,627	0,433	0,685	0,743
	5-10	0,285	0,380	0,249	-0,215	0,479	0,415
	6-10	1,750	2,997	3,000	1,434	3,054	3,094
	7-8	-1,750	-5,250	-3,920	-1,750	-5,031	-5,031
	8-9	1,142	-0,098	0,571	1,362	0,140	0,151
	8-10	1,142	-0,022	0,639	1,362	0,178	0,167
9-11	3,180	3,188	3,398	3,261	3,380	3,301	

	9-12	4,000	3,231	3,368	4,000	3,277	3,220
	10-11	3,180	3,040	3,265	3,261	3,304	3,269
	10-12	4,000	6,165	6,472	4,000	6,403	6,376
	11-13	5,000	5,000	4,948	5,000	4,819	4,856
	11-14	1,360	1,229	1,715	1,626	1,974	1,817
	12-13	3,555	4,926	5,000	3,697	5,000	5,000
	12-23	4,445	4,470	4,840	4,501	4,971	4,847
	13-23	3,008	2,281	2,653	2,993	2,800	2,662
	14-16	5,000	7,049	7,535	5,000	7,951	7,764
	15-16	2,380	0,331	-0,155	1,935	2,174	-0,883
	15-21	10,000	9,780	9,545	10,000	10,000	9,081
	15-24	-3,982	-3,849	-4,267	-4,071	-4,072	-4,439
	16-17	5,000	5,000	5,000	5,000	8,348	5,000
	16-19	0,730	0,730	0,730	0,396	0,396	0,396
	17-18	1,075	0,872	0,857	1,231	4,571	1,092
	17-22	3,925	4,128	4,143	3,916	4,014	4,065
	18-21	4,544	7,091	7,312	4,966	2,584	7,147
	19-20	6,160	6,160	6,160	5,923	5,923	5,923
	20-23	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000
	21-22	5,000	4,872	4,857	4,872	4,769	4,717
Ángulo	1	0,193	0,185	0,194	0,169	0,204	0,213
	2	0,192	0,182	0,192	0,169	0,203	0,211
	3	0,380	0,384	0,366	0,372	0,395	0,368
	4	0,386	0,380	0,394	0,373	0,402	0,404
	5	0,341	0,333	0,337	0,309	0,346	0,361
	6	0,422	0,390	0,399	0,415	0,417	0,418
	7	0,397	0,188	0,315	0,446	0,252	0,259
	8	0,504	0,296	0,423	0,553	0,354	0,352
	9	0,316	0,312	0,329	0,328	0,331	0,327
	10	0,316	0,299	0,318	0,328	0,325	0,324
	11	0,049	0,044	0,044	0,055	0,048	0,050
	12	-0,020	0,041	0,046	-0,008	0,056	0,057
	13	-0,189	-0,194	-0,192	-0,183	-0,182	-0,181
	14	-0,008	-0,007	-0,028	-0,013	-0,035	-0,026
	15	-0,161	-0,139	-0,177	-0,174	-0,152	-0,192
	16	-0,202	-0,144	-0,175	-0,208	-0,189	-0,177
	17	-0,332	-0,274	-0,304	-0,337	-0,297	-0,307
	18	-0,347	-0,286	-0,316	-0,355	-0,363	-0,322
	19	-0,219	-0,161	-0,191	-0,217	-0,198	-0,186
	20	-0,341	-0,283	-0,313	-0,334	-0,316	-0,303
	21	-0,406	-0,378	-0,411	-0,419	-0,397	-0,415
	22	-0,745	-0,708	-0,740	-0,750	-0,720	-0,735
	23	-0,449	-0,391	-0,421	-0,442	-0,424	-0,411

	24	0,045	0,061	0,044	0,037	0,060	0,038
--	----	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Anexo C Diagramas unilineales de las expansiones de los sistemas de prueba

A continuación se presentan los diagramas unilineales de los planes de expansión determinados por el algoritmo genético propuesto para los sistemas de prueba estudiados.

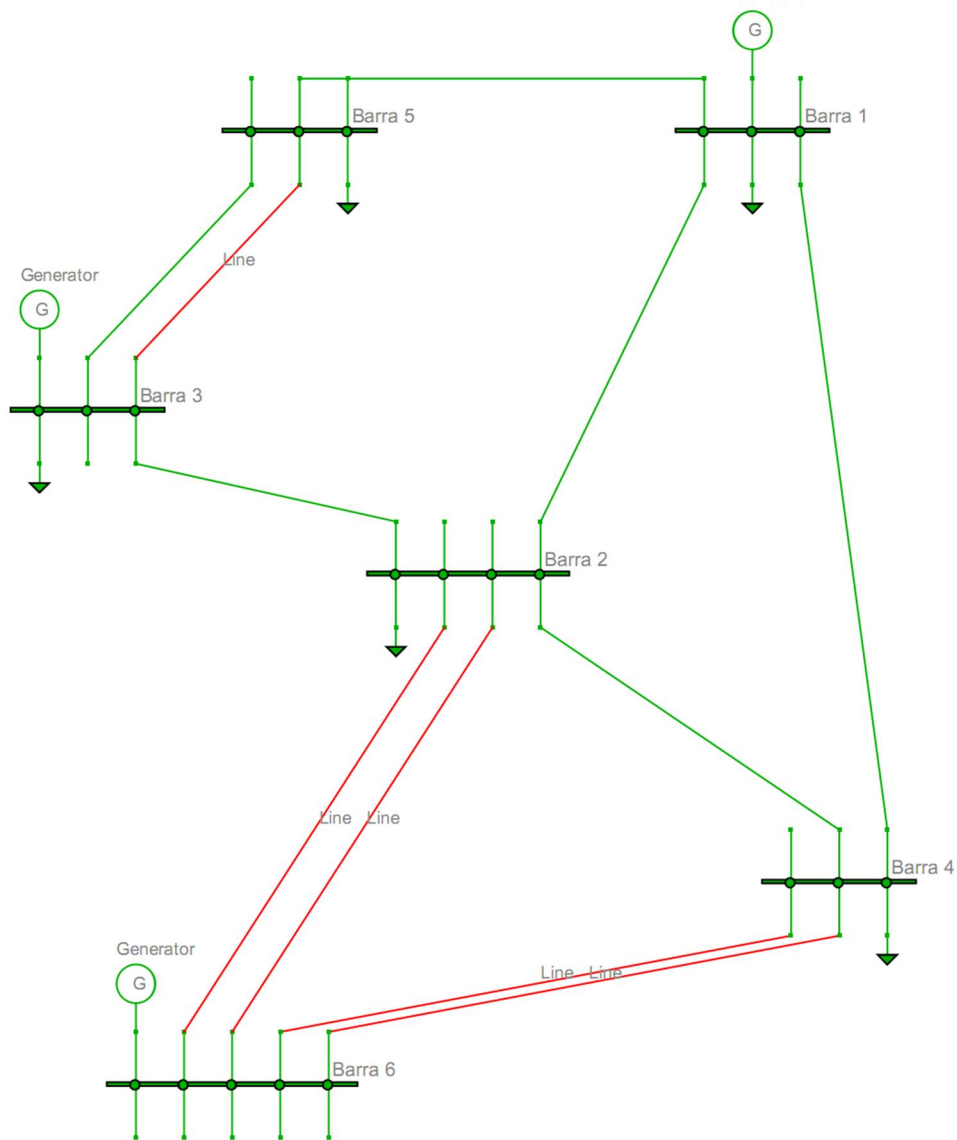


Figura C 1: Diagrama unilineal de expansión del sistema de Garver con pérdidas

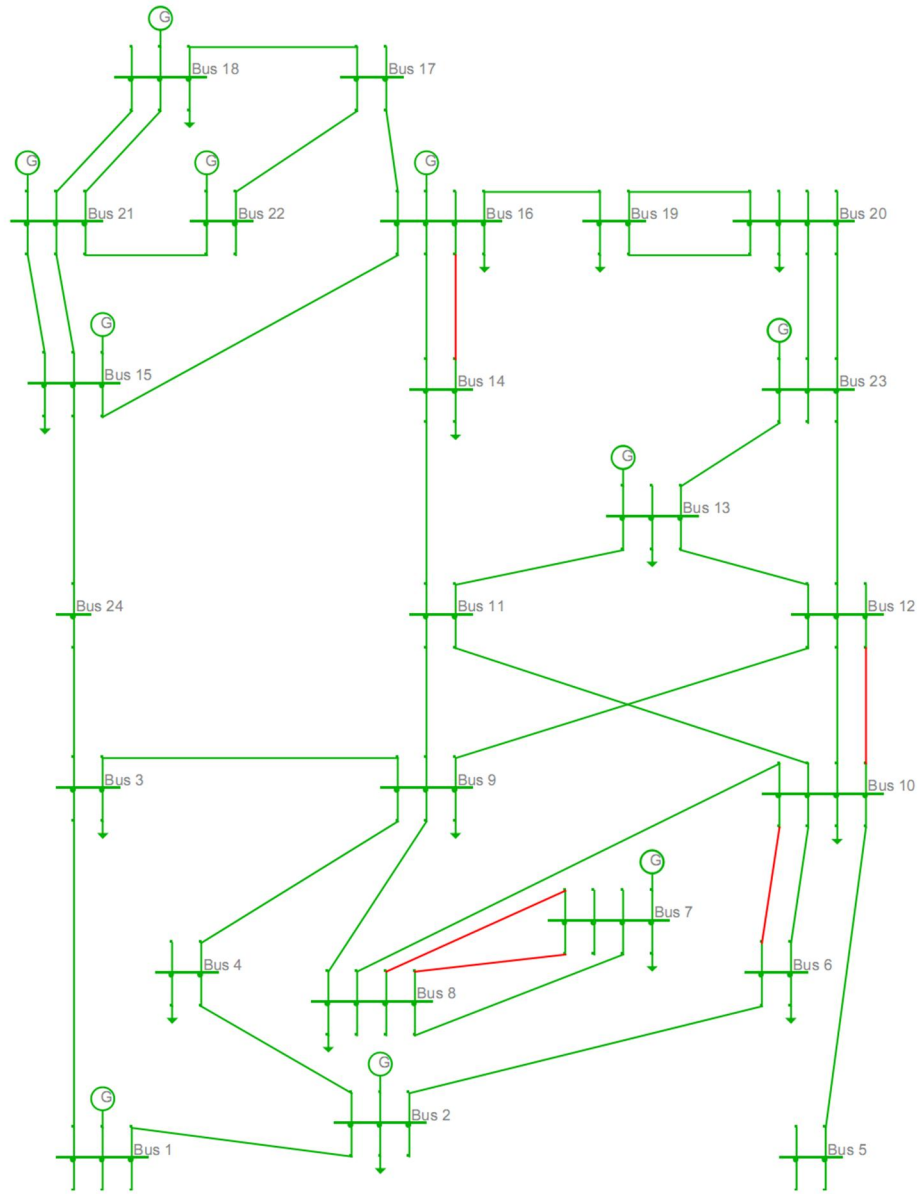


Figura C 2: Diagrama unilineal de expansión del sistema IEEE 24 Bus sin pérdidas

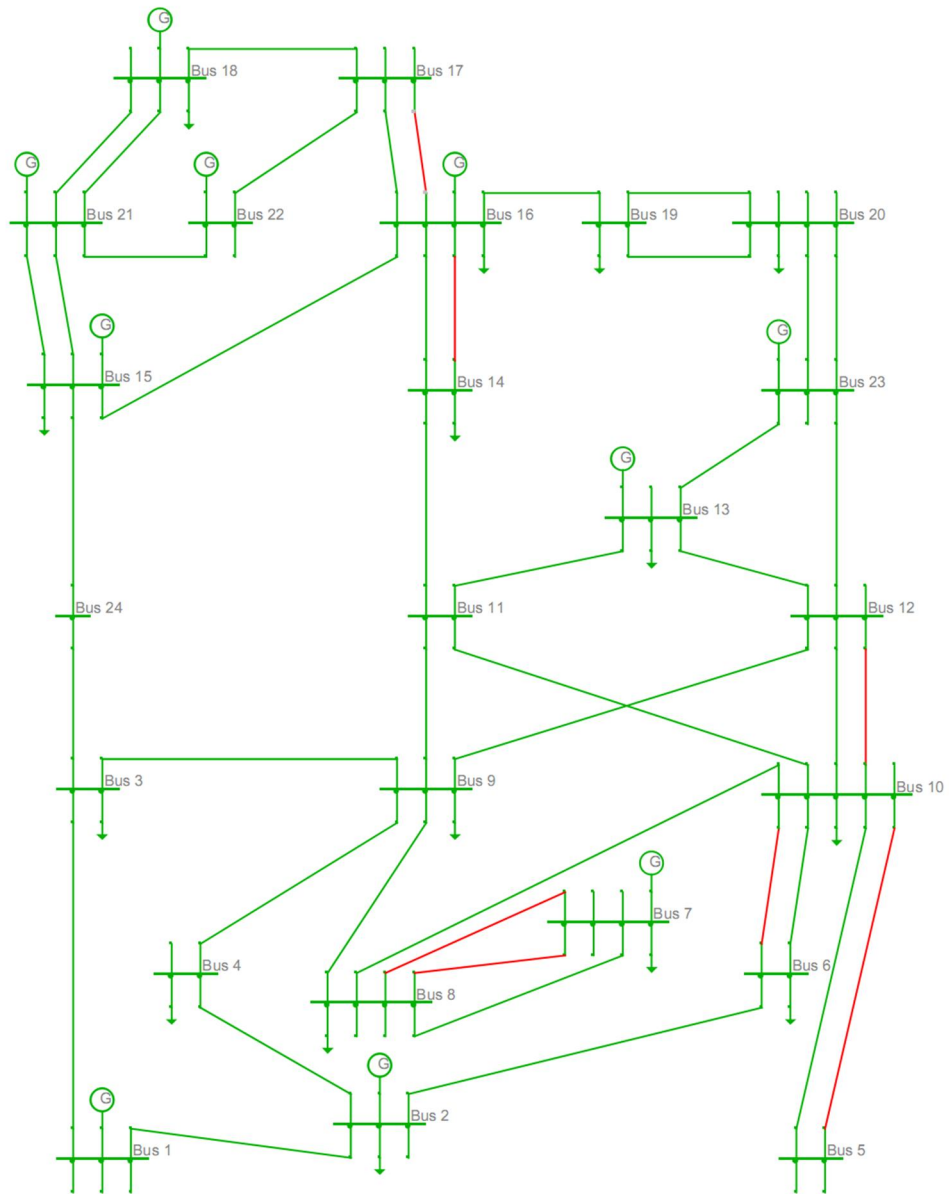


Figura C 3: Diagrama unilineal de expansión del sistema IEEE 24 Bus con pérdidas

Anexo D Datos, diagramas unilineales y resultados obtenidos para el modelo reducido SIC

En los siguientes anexos se presentan los datos y el diagrama unilineal base del sistema reducido de 50 barras del SIC proyectado al año 2022. Además, se presentan los resultados obtenidos por medio del algoritmo genético propuesto al ser aplicado sobre este sistema.

D.1 Datos del modelo reducido de 50 barras del SIC

En las tablas D 1 y D 2 se pueden observar los datos, para el sistema real de 50 barras, de generación y demanda para cada barra junto a su costo de generación y falla, y la información del sistema de transmisión, en donde se especifica cual es la red existente y el número máximo de elementos a instalar en una línea, respectivamente.

Tabla D 1: Datos de generación y demanda del sistema reducido de 50 barras del SIC

Nº	Barra	P máx. [MW]	C. Gen. [US\$/MW]	Demanda Alta [MW]	Demanda Baja [MW]	C. de falla [US\$/MW]
1	Alto Jahuel 154	181	0,00	268	178	517,99
2	Alto Jahuel 220	842	129,54	968	644	517,99
3	Alto Jahuel 500	0	0,00	0	0	517,99
4	Ancoa 220	760	0,00	0	0	517,99
5	Ancoa 500	0	0,00	0	0	517,99
6	Antuco 220	324	0,00	0	0	517,99
7	C. Navia 110	0	0,00	1.369	911	517,99
8	C. Navia 220	380	0,00	165	110	517,99
9	Candelaria 220	0	0,00	401	267	517,99
10	Cardones 220	262	400,97	403	268	517,99
11	Cardones 500	0	0,00	0	0	517,99
12	Cautín 220	588	69,83	348	232	517,99
13	Charrúa 154	162	406,27	407	271	517,99
14	Charrúa 220	2.166	51,99	246	164	517,99
15	Charrúa 500	0	0,00	0	0	517,99
16	Chena 110	0	0,00	519	345	517,99
17	Chena 220	0	0,00	0	0	517,99
18	Colbún 220	0	0,00	120	80	517,99
19	Concepción 154	46	353,67	300	200	517,99
20	Concepción 220	0	0,00	0	0	517,99
21	D. Almagro 220	344	210,83	206	137	517,99
22	El Salto 110	591	131,07	430	286	517,99

23	El Salto 220	0	0,00	0	0	517,99
24	Hualpén 154	122	128,58	402	268	517,99
25	Hualpén 220	461	56,90	0	0	517,99
26	Itahue 154	409	0,00	575	383	517,99
27	Itahue 220	0	0,00	0	0	517,99
28	Las Vegas 110	0	0,00	217	144	517,99
29	Lo Aguirre 220	0	0,00	190	126	517,99
30	Lo Aguirre 500	607	0,00	0	0	517,99
31	Los Almendros 110	0	0,00	542	360	517,99
32	Los Almendros 220	709	0,00	0	0	517,99
33	Los Vilos 220	688	151,72	130	86	517,99
34	Maitencillo 220	996	96,60	196	130	517,99
35	Maitencillo 500	0	0,00	0	0	517,99
36	Nogales 220	484	60,23	0	0	517,99
37	Pan de Azúcar 220	223	114,46	372	248	517,99
38	Pan de Azúcar 500	0	0,00	0	0	517,99
39	Pangue 220	454	0,00	0	0	517,99
40	Polpaico 220	0	0,00	503	335	517,99
41	Polpaico 500	0	0,00	0	0	517,99
42	Quillota 110	0	0,00	43	29	517,99
43	Quillota 220	0	0,00	217	145	517,99
44	Ralco 220	756	0,00	0	0	517,99
45	Rapel 220	0	0,00	0	0	517,99
46	San Luis 220	1.618	90,85	564	375	517,99
47	San Pedro 110	797	84,07	364	242	517,99
48	San Vicente 154	0	0,00	214	142	517,99
49	Temuco 220	0	0,00	257	171	517,99
50	Tinguiririca 154	154	0,00	341	227	517,99

Tabla D 2: Datos de líneas y transformadores del sistema reducido de 50 barras del SIC

N°	De	Hacia	Red existente	R [p.u.]	X [p.u.]	Capacidad [MVA]	Costo inversión A [US\$]	Costo inversión B [US\$]	Límite circuitos
1	Alto Jahuel 220	Candelaria 220	2	0,0035	0,0299	369	178	936	3
2	Alto Jahuel 220	C. Navia 220	2	0,0073	0,0306	187	741	784	3
3	Alto Jahuel 220	Chena 220	2	0,0042	0,0287	224	1202	664	3
4	Alto Jahuel 220	Los Almendros 220	2	0,0050	0,0349	224	1287	814	3
5	Alto Jahuel 154	Tinguiririca 154	2	0,0399	0,1883	88	453	1526	3
6	Ancoa 220	Itahue 220	2	0,0066	0,0512	272	1305	1290	3
7	Antuco 220	Charrúa 220	3	0,0058	0,0533	299	962	1350	3
8	Cardones 220	Maitencillo 220	3	0,0273	0,1090	114	654	2654	3
9	C. Navia 110	Chena 110	2	0,0068	0,0309	69	1165	121	3

10	C. Navia 220	Chena 220	2	0,0024	0,0102	224	769	242	3
11	C. Navia 110	El Salto 110	2	0,0166	0,0700	90	492	338	3
12	C. Navia 110	Las Vegas 110	2	0,0575	0,2401	121	1054	769	3
13	C. Navia 220	Polpaico 220	2	0,0063	0,0249	179	1153	596	3
14	Charrúa 220	Cautín 220	2	0,0190	0,1222	269	658	4080	3
15	Charrúa 154	Concepción 154	1	0,0399	0,1249	97	1126	1008	3
16	Charrúa 220	Concepción 220	1	0,0148	0,0574	150	280	1436	3
17	Charrúa 220	Hualpén 220	1	0,0134	0,0688	131	489	1673	3
18	Charrúa 154	Itahue 154	1	0,1356	0,4238	62	154	3411	3
19	Charrúa 220	Temuco 220	1	0,0312	0,1599	152	1067	3914	3
20	Colbún 220	Candelaria 220	2	0,0161	0,1370	353	793	4288	3
21	Concepción 154	San Vicente 154	2	0,0073	0,0197	86	482	153	3
22	El Salto 110	Los Almendros 110	2	0,0062	0,0368	139	314	176	3
23	Hualpén 154	San Vicente 154	2	0,0024	0,0089	124	445	73	3
24	Itahue 154	Tinguiririca 154	2	0,0224	0,1186	105	1055	1028	3
25	Los Vilos 220	Nogales 220	2	0,0199	0,0790	129	521	1942	3
26	Nogales 220	Quillota 220	2	0,0055	0,0220	129	904	540	3
27	Pan de Azúcar 220	Los Vilos 220	2	0,0429	0,1917	189	458	4573	3
28	Pan de Azúcar 220	Maitencillo 220	2	0,0400	0,1594	114	213	3944	3
29	Pangue 220	Charrúa 220	2	0,0113	0,1054	295	836	910	3
30	Polpaico 220	El Salto 220	2	0,0572	0,5364	448	789	1006	3
31	Polpaico 220	Quillota 220	2	0,0020	0,0243	634	695	992	3
32	Ralco 220	Charrúa 220	2	0,0087	0,0816	392	216	2820	3
33	San Luis 220	Quillota 220	2	0,0003	0,0046	260	872	159	3
34	San Pedro 110	Las Vegas 110	2	0,0139	0,0906	123	364	300	3
35	San Pedro 110	Quillota 110	2	0,0017	0,0075	160	951	200	3
36	Temuco 220	Cautín 220	2	0,0004	0,0016	111	54	400	3
37	Alto Jahuel 500	Lo Aguirre 500	0	0,00021	0,00245	759	430	3667	3
38	Alto Jahuel 500	Polpaico 500	0	0,0006	0,0068	1.041	786	5290	3
39	Ancoa 500	Alto Jahuel 500	1	0,0023	0,0263	1.041	857	9650	4
40	Ancoa 220	Colbún 220	0	0,0014	0,0056	525	46	1600	3
41	Cardones 500	Maitencillo 500	2	0,0013	0,0145	759	523	5308	3
42	Charrúa 500	Ancoa 500	2	0,0020	0,0260	1.031	1318	7300	3
43	D. Almagro 220	Cardones 220	2	0,0313	0,1224	290	261	2949	3
44	Lo Aguirre 220	C. Navia 220	2	0,0005	0,0060	462	47	1068	3
45	Maitencillo 500	Pan de Azúcar 500	2	0,0020	0,0229	759	867	7889	3
46	Nogales 220	Polpaico 220	0	0,0019	0,0291	865	483	3920	3
47	Pan de Azúcar 500	Polpaico 500	2	0,0039	0,0440	759	772	16072	3
48	Polpaico 500	Lo Aguirre 500	0	0,0003	0,0033	759	430	2229	3
49	Rapel 220	Lo Aguirre 220	2	0,0216	0,0846	290	1053	2100	3
50	Alto Jahuel 220	Alto Jahuel 154	1	0,0064	0,0322	300	61	1200	3
51	Alto Jahuel 500	Alto Jahuel 220	2	0,0118	0,0589	1.500	809	2400	3
52	C. Navia 220	C. Navia 110	2	0,0056	0,0282	400	1104	1000	3

53	Charrúa 220	Charrúa 154	1	0,0161	0,0805	390	1243	1200	3
54	Chena 220	Chena 110	1	0,0053	0,0265	400	1273	1000	3
55	Concepción 220	Concepción 154	1	0,0174	0,0870	261	856	1200	3
56	El Salto 220	El Salto 110	1	0,0059	0,0297	400	846	1000	3
57	Hualpén 220	Hualpén 154	1	0,0192	0,0960	300	213	1200	3
58	Itahue 220	Itahue 154	1	0,0064	0,0322	300	647	1200	3
59	Los Almendros 220	Los Almendros 110	1	0,0052	0,0262	400	529	1000	3
60	Quillota 220	Quillota 110	2	0,0186	0,0932	300	746	1000	3
61	Ancoa 500	Ancoa 220	2	0,0118	0,0590	750	272	2400	3
62	Cardones 500	Cardones 220	0	0,0118	0,0590	750	190	2400	3
63	Charrúa 500	Charrúa 220	2	0,0109	0,0547	750	387	2400	3
64	Lo Aguirre 500	Lo Aguirre 220	0	0,0118	0,0590	1.500	430	2400	3
65	Maitencillo 500	Maitencillo 220	0	0,0118	0,0590	750	574	2400	3
66	Pan de Azúcar 500	Pan de Azúcar 220	0	0,0118	0,0590	1.500	337	2400	3
67	Polpaico 500	Polpaico 220	1	0,0118	0,0590	750	318	2400	3

D.2 Datos del modelo reducido de 50 barras del SIC

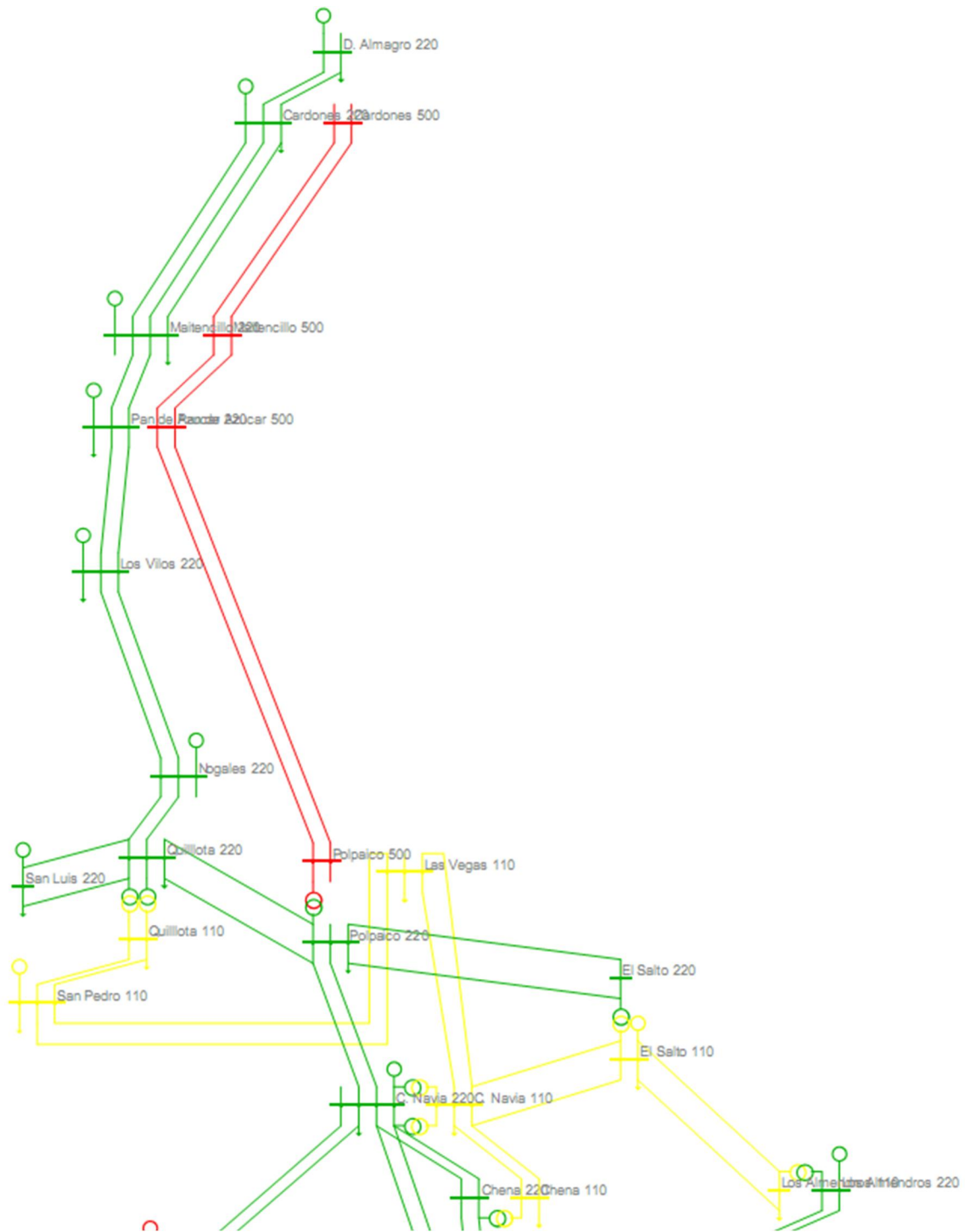


Figura D 1: Diagrama unilineal ampliado del modelo reducido de 50 barras del SIC (sector norte-centro)

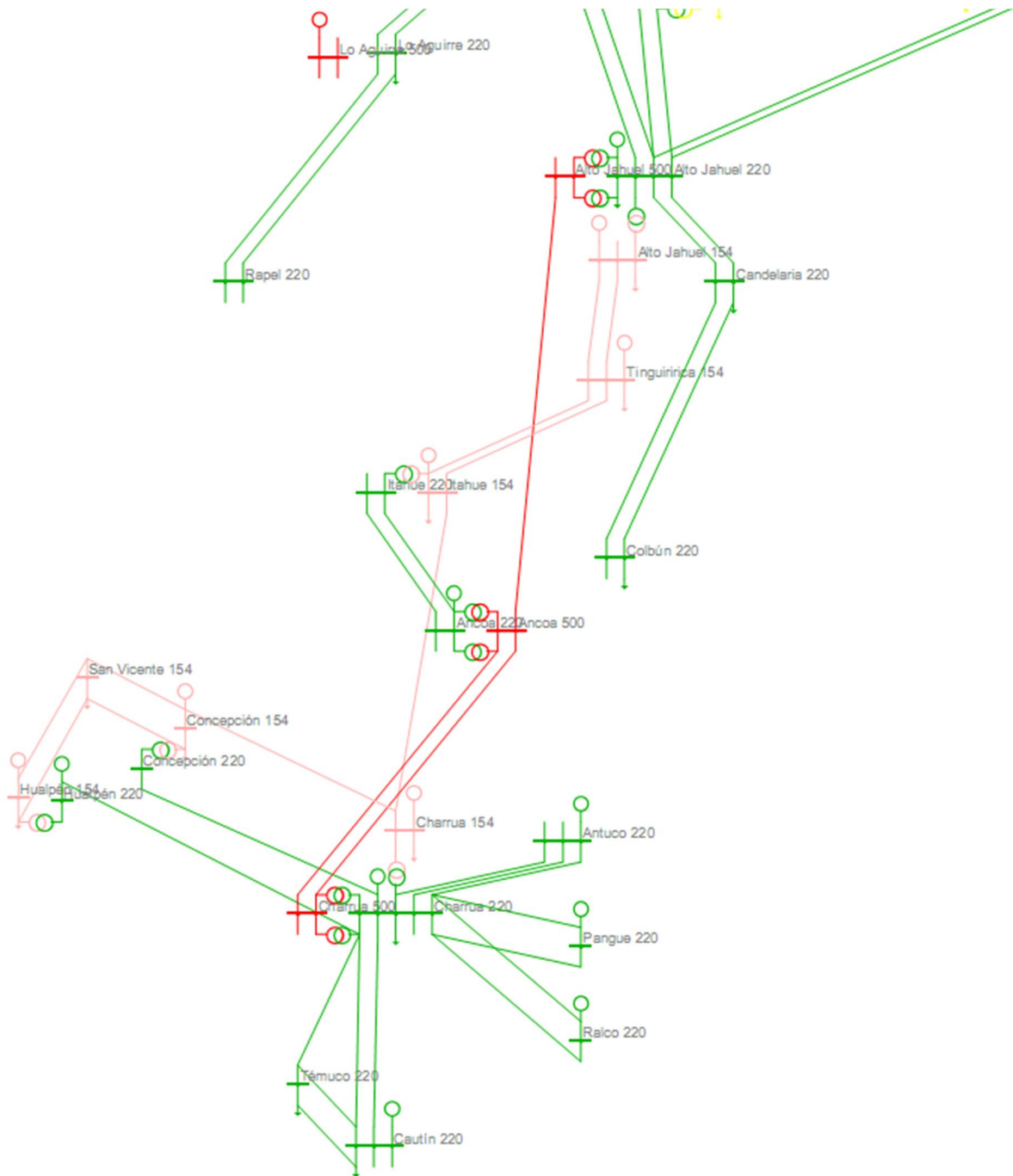


Figura D 2: Diagrama unilínea ampliado del modelo reducido de 50 barras del SIC (sector centro-sur)

D.3 Resultados para el modelo reducido de 50 barras del SIC

En la tabla D 3 se observan los planes de expansión óptimos determinados por medio del algoritmo genético propuesto cuando son o no considerados equipos FACTS, mientras que en la tabla D 4 se encuentran los flujos de potencia para los 4 escenarios estudiados más el flujo del sistema sin expansión, sin y con pérdidas, ambas para el vector de costos de inversión A. Además, en la tabla D 5 se encuentran los planes de expansión determinados para el vector de costos B.

Tabla D 3: Planes óptimos de expansión modelo SIC – 50 barras, para vector de costos A

Tipo Inversión	Nuevos Circuitos				Inversión en FACTS			
	Sin pérdidas		Con pérdidas		Sin pérdidas		Con pérdidas	
	Genético	Genético FACTS	Genético	Genético FACTS	Genético	Genético FACTS	Genético	Genético FACTS
1	0	0	0	0	-	-	-	-
2	0	0	0	0	-	-	-	-
3	0	0	0	0	-	0	-	0,3
4	0	0	0	0	-	-	-	0,3
5	0	0	0	0	-	-	-	-
6	0	0	0	0	-	-	-	-
7	0	0	0	0	-	-	-	-
8	0	0	0	0	-	0,1	-	-
9	0	0	0	0	-	0,2	-	0
10	0	0	0	0	-	0,3	-	0,3
11	1	0	0	0	-	0,1	-	0,2
12	0	0	0	0	-	0,1	-	0,2
13	0	0	0	0	-	-	-	0,4
14	0	0	0	0	-	-	-	-
15	0	0	0	0	-	-	-	0,3
16	1	1	1	1	-	-	-	-
17	0	0	1	1	-	-	-	-
18	1	1	1	1	-	-	-	-
19	0	0	0	0	-	0	-	-
20	0	0	1	1	-	0,4	-	-
21	0	0	0	0	-	-	-	0,4
22	0	0	0	0	-	0,1	-	-
23	0	0	0	0	-	0,2	-	0
24	0	0	0	0	-	0,2	-	-
25	0	0	0	0	-	0,4	-	0,2
26	0	0	0	0	-	0,2	-	0,1
27	0	0	0	0	-	0,1	-	0
28	0	0	0	0	-	0,2	-	-

29	0	0	0	0	-	0,1	-	-
30	0	0	0	0	-	-	-	-
31	0	0	0	0	-	-	-	-
32	0	0	0	0	-	0,4	-	-
33	0	0	0	1	-	0,3	-	0,3
34	1	1	1	1	-	-	-	-
35	0	0	0	0	-	0,3	-	0,1
36	0	0	0	0	-	-	-	0,3
37	0	0	0	0	-	-	-	0
38	0	0	0	0	-	-	-	-
39	0	0	1	0	-	-	-	0,3
40	3	2	3	2	-	-	-	-
41	0	0	0	0	-	-	-	-
42	0	0	0	0	-	0	-	-
43	0	0	0	0	-	-	-	-
44	0	0	0	0	-	-	-	0,1
45	0	0	0	0	-	-	-	-
46	1	0	1	0	-	-	-	-
47	0	0	0	0	-	-	-	-
48	0	0	0	0	-	-	-	0
49	0	0	0	0	-	-	-	-
50	1	1	1	0	-	-	-	-
51	0	0	0	0	-	-	-	-
52	1	1	1	1	-	-	-	-
53	0	0	0	0	-	-	-	-
54	1	1	1	1	-	-	-	-
55	0	0	0	0	-	-	-	-
56	0	0	0	0	-	-	-	-
57	1	1	1	1	-	-	-	-
58	0	0	0	0	-	-	-	-
59	1	1	1	1	-	-	-	-
60	0	0	0	0	-	-	-	-
61	0	0	0	0	-	-	-	-
62	0	0	0	0	-	-	-	-
63	0	0	1	1	-	-	-	-
64	1	1	1	1	-	-	-	-
65	0	0	0	0	-	-	-	-
66	0	0	0	0	-	-	-	-
67	0	0	0	0	-	-	-	-

Tabla D 4: Flujo de potencia de planes de expansión óptimos para el sistema SIC-50

		Sin Expansión	Sin Expansión c/Pérdidas	Genético	Genético c/ Pérdidas	Genético FACTS	Genético FACTS c/Pérdidas
Generación	1	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81
	2	8,42	8,42	8,42	8,42	8,42	8,20
	3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	4	2,49	3,20	7,60	7,60	7,60	7,60
	5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	6	3,24	3,24	3,24	3,24	3,24	3,24
	7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	8	3,80	3,80	3,80	3,80	3,80	3,80
	9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	12	0,57	0,75	0,57	0,75	0,57	0,75
	13	0,01	0,14	0,84	1,53	1,31	1,34
	14	6,75	8,93	6,59	13,66	8,48	12,29
	15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	19	0,46	0,46	0,24	0,39	0,23	0,42
	20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	21	2,67	2,84	2,67	2,84	2,26	2,84
	22	5,91	5,91	5,91	5,07	5,20	5,66
	23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	24	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22
	25	3,88	4,03	4,61	4,61	4,61	4,61
	26	4,09	4,09	4,09	4,09	4,09	4,09
	27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	30	0,00	0,00	6,07	6,07	6,07	6,07
	31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	32	6,89	7,09	7,09	7,09	7,09	7,09
	33	0,00	0,00	0,82	1,32	0,00	0,00
	34	7,66	7,92	7,66	7,92	8,34	7,92
	35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	36	4,84	4,84	4,84	4,84	4,84	4,84
	37	0,48	0,74	2,23	2,23	0,52	1,04
	38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	39	4,54	4,54	4,54	4,54	4,54	4,54

	40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	44	7,56	7,56	7,56	7,56	7,56	7,56
	45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	46	10,84	10,85	10,84	10,85	11,47	14,39
	47	7,97	7,97	7,97	7,97	7,97	7,90
	48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	50	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54
Generación ficticia	1	0,00	0,85	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	7	6,98	7,40	0,00	0,00	0,00	0,00
	8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	16	0,33	0,45	0,00	0,00	0,00	0,00
	17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	19	3,00	3,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	26	0,14	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00
	27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	28	0,90	0,90	0,00	0,00	0,00	0,00
	29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	31	1,50	1,58	0,00	0,00	0,00	0,00
	32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

	33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	48	0,76	0,95	0,00	0,00	0,00	0,00
	49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	50	1,53	1,64	0,00	0,00	0,00	0,00
Flujos	1	-5,21	-5,28	0,29	1,28	1,96	1,14
	2	-3,08	-3,15	-2,27	-3,33	-3,43	-2,40
	3	-3,34	-3,38	-3,24	-4,21	-4,10	-4,28
	4	2,89	3,03	1,11	0,62	0,79	0,96
	5	1,76	1,76	0,23	0,18	0,41	0,18
	6	-3,00	-3,06	-2,99	-2,72	-2,70	-2,85
	7	-3,24	-3,21	-3,24	-3,21	-3,24	-3,21
	8	3,42	3,42	3,42	3,42	3,83	3,42
	9	-1,38	-1,38	0,38	0,66	0,68	0,63
	10	-0,15	-0,07	-2,33	-1,88	-1,77	-1,78
	11	1,80	1,80	2,44	1,80	1,96	2,02
	12	1,20	1,11	1,13	1,11	1,19	1,36
	13	1,91	1,70	3,48	3,56	1,87	3,98
	14	-3,96	-3,96	-3,96	-3,96	-3,96	-3,97
	15	0,78	0,80	0,10	0,07	0,10	0,10
	16	-1,50	-1,50	-2,61	-2,72	-2,61	-2,72
	17	0,88	0,94	-0,58	-1,05	-0,60	-1,05
	18	-0,62	-0,62	-0,77	-1,24	-1,24	-1,09
	19	-1,52	-1,52	-1,52	-1,52	-1,52	-1,52
	20	1,20	1,21	-4,30	-5,54	-5,97	-5,39
	21	-1,18	-1,08	0,25	0,13	0,26	0,14
	22	0,08	0,13	0,56	0,78	0,88	0,44
	23	-0,20	-0,11	-2,39	-2,28	-2,40	-2,28
	24	-2,10	-2,10	-2,10	-2,10	-2,28	-2,10
	25	2,26	2,19	-0,31	-0,67	1,95	1,88

	26	-2,58	-2,58	-2,02	-2,27	-2,89	-2,89
	27	0,96	0,82	-0,79	-0,67	0,65	0,52
	28	2,28	2,28	2,28	2,28	2,55	2,28
	29	-4,54	-4,42	-4,54	-4,42	-4,54	-4,42
	30	-0,11	-0,09	-0,26	-0,27	-0,18	-0,23
	31	7,05	6,89	5,65	5,69	7,09	9,38
	32	-7,56	-7,31	-7,56	-7,31	-7,56	-7,31
	33	-5,20	-5,20	-5,20	-5,20	-5,82	-8,74
	34	-2,46	-2,46	-3,30	-3,39	-3,36	-3,69
	35	-1,87	-1,83	-1,03	-0,87	-0,98	-0,48
	36	1,05	1,09	1,05	1,09	1,05	1,09
	37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	39	-9,10	-9,56	-6,01	-8,57	-6,49	-7,49
	40	0,00	0,00	-5,49	-7,03	-7,17	-6,86
	41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	42	-9,62	-9,64	-6,90	-11,00	-8,76	-9,85
	43	-0,61	-0,77	-0,61	-0,77	-0,20	-0,77
	44	1,90	1,90	-4,17	-3,73	-4,17	-3,73
	45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	46	0,00	0,00	-3,12	-3,23	0,00	0,00
	47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	50	0,89	1,68	-0,64	-0,69	-0,46	-0,69
	51	-9,10	-8,98	-6,01	-8,09	-6,49	-7,12
	52	-5,09	-4,90	-9,74	-10,49	-9,85	-10,07
	53	-3,90	-3,90	-3,90	-3,90	-3,90	-3,90
	54	-3,48	-3,40	-5,57	-5,95	-5,87	-5,93
	55	-1,50	-1,46	-2,61	-2,61	-2,61	-2,61
	56	-0,11	-0,09	-0,26	-0,26	-0,18	-0,22
	57	-3,00	-3,00	-5,19	-5,37	-5,21	-5,37
	58	-3,00	-3,00	-2,99	-2,67	-2,70	-2,80
	59	-4,00	-4,00	-5,98	-6,34	-6,30	-6,00
	60	1,44	1,37	0,60	0,44	0,55	0,05
	61	-0,51	0,11	-0,89	-2,22	-2,27	-2,20
	62	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	63	9,62	10,23	6,90	11,67	8,76	10,39
	64	0,00	0,00	-6,07	-5,85	-6,07	-5,85
	65	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	66	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ángulos	1	0,25	0,23	0,21	0,23	0,20	0,22

2	0,27	0,28	0,20	0,22	0,20	0,20
3	0,01	0,02	0,02	-0,02	0,00	-0,01
4	-0,22	-0,24	-0,11	-0,07	-0,10	-0,08
5	-0,23	-0,23	-0,14	-0,13	-0,17	-0,15
6	-0,68	-0,69	-0,47	-0,55	-0,58	-0,52
7	0,39	0,40	0,32	0,37	0,34	0,33
8	0,32	0,33	0,23	0,27	0,25	0,23
9	0,35	0,36	0,19	0,20	0,17	0,18
10	0,31	0,31	-0,05	-0,02	0,18	0,11
11	0,30	0,31	0,19	0,22	0,23	0,21
12	-0,38	-0,39	-0,17	-0,25	-0,28	-0,22
13	-0,31	-0,32	-0,10	-0,18	-0,21	-0,15
14	-0,62	-0,64	-0,42	-0,49	-0,52	-0,47
15	-0,36	-0,36	-0,23	-0,28	-0,28	-0,28
16	0,42	0,42	0,32	0,36	0,33	0,32
17	0,32	0,33	0,24	0,28	0,26	0,24
18	0,43	0,45	-0,10	-0,06	-0,08	-0,07
19	-0,40	-0,42	-0,11	-0,18	-0,22	-0,16
20	-0,53	-0,55	-0,34	-0,41	-0,44	-0,39
21	0,27	0,26	-0,08	-0,07	0,17	0,07
22	0,33	0,34	0,27	0,30	0,28	0,27
23	0,33	0,34	0,26	0,30	0,27	0,27
24	-0,39	-0,41	-0,13	-0,20	-0,23	-0,17
25	-0,68	-0,70	-0,38	-0,45	-0,48	-0,43
26	-0,04	-0,06	0,06	0,09	0,06	0,08
27	-0,14	-0,16	-0,03	0,00	-0,03	-0,01
28	0,25	0,27	0,19	0,23	0,21	0,20
29	0,33	0,34	0,22	0,26	0,24	0,22
30	-1,57	-1,57	-0,14	-0,09	-0,12	-0,12
31	0,33	0,34	0,26	0,29	0,26	0,26
32	0,22	0,23	0,18	0,21	0,18	0,19
33	0,27	0,29	0,09	0,10	0,16	0,12
34	0,18	0,18	-0,17	-0,14	0,05	-0,01
35	0,30	0,31	0,19	0,22	0,23	0,21
36	0,18	0,20	0,10	0,13	0,11	0,06
37	0,37	0,36	0,01	0,04	0,22	0,17
38	0,30	0,31	0,19	0,22	0,23	0,21
39	-0,86	-0,87	-0,65	-0,72	-0,73	-0,70
40	0,30	0,31	0,19	0,22	0,23	0,21
41	0,30	0,31	0,19	0,22	0,23	0,21
42	0,15	0,16	0,09	0,13	0,11	0,09
43	0,21	0,23	0,12	0,15	0,14	0,09
44	-0,93	-0,94	-0,72	-0,79	-0,70	-0,76

	45	0,33	0,34	0,22	0,26	0,24	0,22
	46	0,20	0,22	0,11	0,14	0,13	0,08
	47	0,14	0,16	0,09	0,13	0,11	0,09
	48	-0,39	-0,41	-0,12	-0,19	-0,22	-0,16
	49	-0,38	-0,39	-0,17	-0,25	-0,28	-0,22
	50	0,08	0,06	0,19	0,21	0,17	0,20

Tabla D 5: Planes óptimos de expansión modelo SIC – 50 barras, para vector de costos B

Tipo Inversión	Nuevos Circuitos				Inversión en FACTS			
Líneas	Sin pérdidas		Con pérdidas		Sin pérdidas		Con pérdidas	
	Genético	Genético FACTS	Genético	Genético FACTS	Genético	Genético FACTS	Genético	Genético FACTS
1	0	0	0	0	-	-	-	0
2	0	0	0	0	-	-	-	-
3	0	0	0	0	-	0,1	-	0,4
4	0	0	0	0	-	0	-	-
5	0	0	0	0	-	-	-	-
6	0	0	0	0	-	-	-	-
7	0	0	0	0	-	-	-	-
8	0	0	0	0	-	-	-	-
9	0	0	0	0	-	0,4	-	-
10	0	0	0	0	-	-	-	0,3
11	1	1	1	0	-	0,4	-	0,1
12	0	0	0	0	-	-	-	-
13	0	1	0	1	-	0	-	-
14	0	0	0	0	-	-	-	0,1
15	0	0	0	0	-	-	-	-
16	1	1	1	1	-	-	-	-
17	0	1	0	0	-	-	-	0,4
18	0	0	0	0	-	0,1	-	0,1
19	0	0	0	0	-	-	-	0,1
20	0	0	0	0	-	0,1	-	-
21	0	0	0	0	-	-	-	0,3
22	0	0	0	0	-	0,3	-	0,1
23	0	0	0	0	-	-	-	0,2
24	1	0	0	0	-	-	-	0,1
25	0	0	0	0	-	-	-	-
26	0	0	0	1	-	0,3	-	0,3
27	0	0	0	0	-	0,2	-	-
28	0	0	0	0	-	-	-	-
29	0	0	0	0	-	0,3	-	0
30	0	0	0	0	-	0,1	-	-

31	0	0	0	0	-	-	-	0,1
32	0	0	0	0	-	-	-	-
33	1	1	1	1	-	0,3	-	0,1
34	1	1	1	1	-	0,2	-	-
35	0	0	0	0	-	0,1	-	0,2
36	0	0	0	0	-	-	-	-
37	0	0	0	0	-	-	-	-
38	0	0	0	0	-	-	-	-
39	0	0	0	0	-	0,3	-	-
40	1	1	1	1	-	0	-	0,4
41	0	0	0	0	-	-	-	-
42	0	0	0	0	-	0	-	-
43	0	0	0	0	-	-	-	-
44	0	0	0	0	-	-	-	-
45	0	0	0	0	-	0,2	-	-
46	0	0	0	0	-	0	-	0
47	0	0	0	0	-	-	-	-
48	0	0	0	0	-	-	-	0
49	0	0	0	0	-	-	-	-
50	0	0	0	0	-	-	-	-
51	0	1	0	0	-	-	-	-
52	1	1	0	1	-	-	-	-
53	0	0	0	0	-	-	-	-
54	1	1	1	1	-	-	-	-
55	0	0	0	0	-	-	-	-
56	0	0	0	0	-	-	-	-
57	1	1	1	1	-	-	-	-
58	1	1	0	1	-	-	-	-
59	1	1	1	1	-	-	-	-
60	0	0	0	0	-	-	-	-
61	0	0	0	0	-	-	-	-
62	0	0	0	0	-	-	-	-
63	0	0	0	0	-	-	-	-
64	1	1	1	1	-	-	-	-
65	0	1	0	0	-	-	-	-
66	0	0	0	0	-	-	-	-
67	0	0	0	0	-	-	-	-

Bibliografía

- [1] RIDER, M. J., GARCIA, A. V., ROMERO, R. Enero 2008. Transmission system expansion planning by a branch-and-bound algorithm. IET Generation, Transmission & Distribution, 2(1): 90 – 99.

- [2] VERMA, A., PANIGRAHI, B. K., BIJWE, P. R. Diciembre 2009. Transmission Network Expansion Planning with Adaptive Particle Swarm Optimization. Nature& Biologically Inspired Computing, 2009.NaBIC 2009.World Congress. pp. 1099 – 1104.

- [3] WU PENG, LIU CHUANQUAN, LI JIE, HUANG CHENG. Septiembre 2010. Transmission Network Expansion Planning under Interval Load. 2010 China International Conference on Electricity Distribution (CICED). pp. 1 – 6.

- [4] BINATO, S., OLIVEIRA, G. C., ORTIZ, J. M. A., SIVLA, E. L. Febrero 2001. Transmission Network Expansion Planning Under a Tabu Search Approach IEEE Transactions on Power Systems 16(1): 62 – 68.

- [5] GOLESTANI, S., TADAYON, M., PIRBAZARI, A. M. Octubre 2010. Transmission network expansion planning considering unit commitment problem simultaneously. Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), 2010 IEEE PES. pp. 1 – 5.

- [6] FORGHANI, M. A., SYED-ESFAHANI, M., RASHIDINEJAD, M., FARAHMAND, H. Octubre 2007. Transmission Expansion Planning using Goal Attainment & GA. 2007 Large Engineering Systems Conference on Power Engineering. pp. 84 – 89.

- [7] HAN YU, CHUNG, C. Y., WONG, K. P. Agosto 2011. Robust Transmission Network Expansion Planning Method With Taguchi's Orthogonal Array Testing. IEEE Transactions on Power Systems 26 (3): 1573 – 1580.

- [8] DONG LEI, LUO JING, YANG YIHAN, LUO LIYUAN. Marzo 2011. Research on Transmission Expansion Planning Based on Probabilistic Incremental Reliability Value. 2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). pp. 1 – 4.

- [9] LEITE DA SILVA, A. M., REZENDE, L.S., HONÓRIO, L. M., MANSO, L. A. F. Marzo 2011. Performance comparison of metaheuristics to solve the multi-stage transmission expansion planning problem. *IET Generation, Transmission & Distribution* 5(3): 360 – 367.

- [10] BALIJEPALLI, V. S. K. M., KHAPARDE, S. A. Julio 2010. Novel approaches for transmission system expansion planning including coordination issues. 2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting. pp. 1 – 7.

- [11] OLIVEIRA, G. C., BINATO, S., PEREIRA, M. V., TOMHÉ, L. M. 2004. Multi-stage transmission expansion planning considering multiple dispatches and contingency criterion. *PSR Consultoria LTDA*. pp. s.p.

- [12] GARCÉS, L. P., ROMERO, R., LOPEZ-LEZAMA, J. M. Noviembre 2010. Market-driven security-constrained Transmission Network Expansion Planning. 2010 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T&D-LA). pp. 427 – 433.

- [13] YANG GU, MCCALLEY, J. Marzo 2011. Market-based transmission expansion planning under uncertainty. 2010 North American Power Symposium (NAPS). pp. 1 – 6.

- [14] KAMYAB, G., FOTUHI-FIRUZABAD, M., RASHIDI-NEJAD, M. Diciembre 2010. Market based criteria for transmission expansion planning. Conference on Power and Energy (PE Con), 2010 IEEE International. pp. 846 – 851.

- [15] YANG GU, MCCALLEY, J. Marzo 2011. Market-based transmission expansion planning. 2011 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition (PSCE). pp. 1 – 9.

- [16] MONTICELLI, A., SANTOS, A., PEREIRA, M. V. F., CUNHA, S. H., PARKER, B. J., PRACA, J. C. G. Octubre 1982. Interactive Transmission Network Planning Using a Least-Effort Criterion. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-101(10): 3919 – 3925.

- [17] OSBORN, D., WILSON, J.L. Junio 2007. Inclusion of Wind in the MISO Transmission Expansion Planning Process. 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting. pp. 1 – 4.

- [18] VERMA, A., PANIGRAHI, B. K., BIJWE, P. R. Junio 2010. Harmony search algorithm for transmission network expansion planning. IET Generation, Transmission & Distribution, 4(6): 663 – 673.
- [19] JUN HUA ZHAO, FOSTER, J., ZHAO YANG DONG, KIT PO WONG. Agosto 2011. Flexible Transmission Network Planning Considering Distributed Generation Impacts. IEEE Transactions on Power Systems, 26(3): 1434 – 1443.
- [20] SABOORI, H., JADID, S. Mayo 2010. Economic assessment methods for transmission network expansion planning in competitive environments. 2010 18th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE). pp. 907 – 912.
- [21] GHANI, N. F. A., OTHMAN, M. M., KASIM, S. R., MUSIRIN, I., MOHAMED, A., HUSSAIN, A. Junio 2010. Determination of composite power system expansion planning. 2010 International Conference on Intelligent and Advanced Systems (ICIAS). pp. 1 – 5.
- [22] GALLEGO, R.A., ROMERO, R., MONTICELLI, A.J. Mayo 2000. Tabu search algorithm for network synthesis. IEEE Transactions on Power Systems, 15(2): 490 – 495.
- [23] ROMERO, R., GALLEGO, R.A., MONTICELLI, A. Mayo 1995. Transmission system expansion planning by simulated annealing. 1995 Power Industry Computer Application Conference. pp. 278 – 283.
- [24] GARVER, L.L. Septiembre 1970. Transmission Network Estimation Using Linear Programming. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-89(7): 1688 – 1697.
- [25] GALLEGO, R.A., MONTICELLI, A., ROMERO, R. Mayo 1998. Transmission system expansion planning by an extended genetic algorithm. IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, 145(3): 329 – 335.
- [26] GALLEGO, R. A., MONTICELLI, A., ROMERO, R. Agosto 1998. Comparative studies on nonconvex optimization methods for transmission network expansion planning. IEEE Transactions on Power Systems, 13(3): 822 – 828.
- [27] ROMERO, R., MONTICELLI, A. Agosto 1994. A zero-one implicit enumeration method for optimizing investments in transmission expansion planning. IEEE Transactions on Power Systems, 9(3): 1385 – 1391.

- [28] VINASCO, G., RIDER, M. J., ROMERO, R. Noviembre 2011. A Strategy to Solve the Multistage Transmission Expansion Planning Problem. IEEE Transactions on Power Systems, 26(4): 2574 – 2576.

- [29] PING REN, NAN LI. Octubre 2010. Optimal Expansion Planning of High-voltage Transmission Network Using the Composite Particle Swarm Optimization. 2010 International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence (AICI), 1: 170 – 173.

- [30] OSBORN, D., LAWHORN, J. Julio 2009. Midwest ISO transmission planning processes. 2009. PES '09. IEEE Power & Energy Society General Meeting. pp. 1 – 5.

- [31] ORFANOS, G. A., SKOTEINOS, I. I., GEORGILAKIS, P. S., HATZIARGYRIOU, N. D. Junio 2010. Transmission expansion planning in deregulated electricity markets for increased wind power penetration. 2010 7th International Conference on the European Energy Market (EEM). pp. 1 – 7.

- [32] HONG-SHAN ZHAO, LIANG CHEN, TAO WU. Marzo 2009. Optimal Computation of the Transmission System Expansion Planning using the Branch and Bound Method. APPEEC 2009. Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. pp. 1 – 4.

- [33] SEPASIAN, M. S., SEIFI, H., FOROUD, A. A., HATAMI, A. R. Agosto 2009. A Multiyear Security Constrained Hybrid Generation-Transmission Expansion Planning Algorithm Including Fuel Supply Costs. IEEE Transactions on Power Systems, 24(3): 1609 – 1618.

- [34] ESCOBAR, A. H., ROMERO, R. A., GALLEGO, R.A. Agosto 2008. Transmission network expansion planning considering multiple generation scenarios. 2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America. pp. 1 – 6.

- [35] GANG QU, HAOZHONG CHENG, LIANGZHONG YAO, ZELIANG MA, ZHONGLIE ZHU, XIAOHUI WANG, JIANZHONG LU. Abril 2008. Transmission surplus capacity based power transmission expansion planning using Chaos optimization Algorithm. DRPT 2008. Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies 2008. pp. 1446 – 1452.

- [36] QUIXIA YU, JIANBO GUO, XIANZHONG DUAN. Abril 2008. Dynamic multi-stage transmission network expansion planning. DRPT 2008. Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies 2008. pp. 635 – 640.
- [37] JAESEOK CHOI, MOUNT, T. D., THOMAS R. J. Noviembre 2007. Transmission Expansion Planning Using Contingency Criteria. IEEE Transactions on Power Systems, 22(4): 2249 – 2261.
- [38] MELIOPOULOS, A. P., WEBB, R. P., BENNON, R. J., JUVES, J. A. Octubre 1982. Optimal Long Range Transmission Planning with AC Load Flow. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-101(10): 4156 – 4163.
- [39] CHOI, J., MOUNT, T. D., THOMAS, R. J., BILLITON, R. Noviembre 2006. Probabilistic reliability criterion for planning transmission system expansions. IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings, 153(6): 719 – 727.
- [40] LU, M., DONG, Z. Y., SAHA, T. K. Noviembre 2005. Transmission expansion planning flexibility. IPEC 2005. The 7th International Power Engineering Conference 2005, 2: 893 – 898.
- [41] BRAGA, A. S. D., SARAIVA, J. T. Agosto 2005. A Multiyear Dynamic Approach for Transmission Expansion Planning and Long-Term Marginal Costs Computation. IEEE Transactions on Power Systems, 20(3): 1631 – 1639.
- [42] ABDELAZIZ, A. R. 2000. Genetic algorithm-based power transmission expansion planning. ICECS 2000. The 7th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems, 2000, 2: 642 – 645.
- [43] BLANCO, G. A., OLSINA, F. G., OJEDA, O.A., GARCES, F. F. Julio 2009. Transmission expansion planning under uncertainty - The role of FACTS in providing strategic flexibility. 2009 IEEE Bucharest PowerTech. pp. 1 – 8.
- [44] RAHMANI, M., RASHIDINEJAD, M., CARRENO, E. M., ROMERO, R. A. Noviembre 2010. A combinatorial approach for transmission expansion & reactive power planning. 2010 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T&D-LA). pp- 529 – 536.

- [45] MURTHY, B. V. S. K., YEMULA, P., KHAPARDE, S. A. Octubre 2008. A Comprehensive Two Level Heuristic Approach to Transmission Expansion Planning. POWERCON 2008. Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference, 2008. pp. 1 – 6.
- [46] ROMERO, R., MONTICELLI, A. Febrero 1994. A hierarchical decomposition approach for transmission network expansion planning. IEEE Transactions on Power Systems, 9(1): 373 – 380.
- [47] BALIJEPALLI, V. S. K. M., KHAPARDE, S. A. Junio 2011. A Holistic Approach for Transmission System Expansion Planning Studies: An Indian Experience. IEEE Systems Journal, 5(2): 199 – 212.
- [48] MAGHOULI, P., HOSSEINI, S. H., BUYGI, M. O., SHAHIDEHPOUR, M. Febrero 2011. A Scenario-Based Multi-Objective Model for Multi-Stage Transmission Expansion Planning. IEEE Transactions on Power Systems, 26(1): 470 – 478.
- [49] MOTAMEDI, A., ZAREIPOUR, H., BUYGI, M. O., ROSEHART, W. D. Noviembre 2010. A Transmission Planning Framework Considering Future Generation Expansions in Electricity Markets. IEEE Transactions on Power Systems, 25(4): 1987 – 1995.
- [50] PARIZAD, A., BAGHAEI, H. R., DEGHAN, S., KIYANI, B. Noviembre 2009. Application of harmony search for transmission expansion planning considering security index and uncertainty. EPECS '09. International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems, 2009. pp. 1 – 8.
- [51] GUAMÁN, W. H., OJEDA, D., VARGAS, A. Noviembre 2010. Centralized expansion planning of the transmission network in competitive markets. A solution based on a hybrid approach. 2010 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T&D-LA). pp. 581 – 588.
- [52] SABOORI, H., MOHAMMADI, M., TAGHE, R. Marzo 2011. Composite Generation and Transmission Expansion Planning Considering the Impact of Wind Power Penetration. 2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). pp. 1 – 6.
- [53] CORTÉS, M. Septiembre 2005. Expansión de redes de transporte de energía eléctrica a través de un algoritmo híbrido de Simulated Annealing. Tesis de magister. Santiago de Chile. Universidad de Chile. 150p.

- [54] BROKERING, Walter. C., PALMA, Rodrigo. B., VARGAS, Luis. D. *Ñom Lufke (El Rayo Domado) o Los Sistemas Eléctricos de Potencia*. 1ª ed. Santiago de Chile: Prentice Hall – Pearson Educación, 2008. 504p.
- [55] D. F .L. Núm. 4/20.018. Chile. Ley General de Servicios Eléctricos. Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción. Santiago, Chile, mayo de 2006.
- [56] CDEC – SIC, Dirección de peajes. Estudio de transmisión troncal: Planes de expansión del sistema troncal del SIC y del SING. Santiago, Chile, octubre 2012.
- [57] Comisión Nacional de Energía. Fijación de precios de nudo, Informe técnico definitivo. Santiago, Chile, Abril 2012.
- [58] Potter, k. and Intermittency Analysis Project Team. 2007. *Intermittency Analysis Project: Summary of Final Results*. California Energy Commission, PIER Research Development & Demonstration Program.CEC-500-2007-081.
- [59] ROJAS, A. Abril 2010. Diseño de una estrategia de control de tensión para minimizar el impacto derivado de la conexión masiva de generadores eólicos al SIC. Memoria de título. Santiago de Chile. Universidad de Chile. 129p.
- [60] BLUM, C., ROLI, A. Septiembre 2003. Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. *Journal ACM Computing Surveys (CSUR)*, 35(3): 268 – 308.
- [61] ESCOBAR, A. H., GALLEGO, R.A., ROMERO, R. Mayo 2004. Multistage and Coordinated planning of the Expansion of Transmission Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 19(2): 735 – 744.
- [62] FANG, R., Hill, D.J. Febrero 2003.A New Strategy for Transmission Expansion in Competitive Electricity Markets. *IEEE Transactions on Power Systems*. pp. 374 – 380.
- [63] ROMERO, R., MONTICELLI, A., GARCIA, A., HAFFNER, S. Enero 2002. Test Systems and mathematical models for transmission network expansion planning. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, 149(1): 27 – 36.

- [64] ALGUACIL, N., MOTTO, A. L., CONEJO, A.J. Agosto 2003. Transmission expansion planning a mixed integer LP approach. IEEE Transactions on Power Systems, 18(3): 1070 – 1077.

- [65] ROMERO, R., MONTICELLI, A., GARCIA, A., HAFFNER, S. Septiembre 2001. Specialized branch-and-bound algorithm for transmission network expansion planning. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 148 (5): 482 – 488.

- [66] SHRESTHA, G. B., FONSEKA, P. A. J. Septiembre 2006. Flexible Transmission and network reinforcements planning considering congestion alleviation. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 153(5): 591 – 598.

- [67] ROMERO, R., MONTICELLI, A., GARCIA, A., HAFFNER, S., MONTOVANI, J. Mayo 2000. Branch and Bounds Algorithm for transmission system expansion planning using a transportation model. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 147 (3): 149 – 156.

- [68] CAI, L. J., ERLICH, I., STAMTSIS, G. Octubre 2004. Optimal Choice and Allocation of FACTS Devices in Deregulated Electricity Market using Genetic Algorithms. IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, 2004, Vol.1. pp. 201 – 207.

- [69] SCHAFFNER, C., ANDERSSON, G. Junio 2003. Determining the Value of Controllable Devices in a Liberalized Electricity Market A New Approach. IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings, 2003, Vol. 4.

- [70] MUTALE, J., STRBAC, G. Agosto 2000. Transmission Network Reinforcements Versus FACTS: An economic Assessment. IEEE Transactions on Power Systems, 15(3): 961 – 967.

- [71] LIMA, F. G. M., GALIANA, F. D., KOCKAR, I., MUNOZ, J. Agosto 2003. Phase shifter Placement in Large-Scale Systems via Mixed Integer Linear Programming. IEEE Transactions on Power Systems, 18 (3): 1029 – 1034.

- [72] GERBEX, S. 2001. Optimal Location of Multi-Type FACTS Devices in a Power System by Means of Genetic Algorithms. 22nd IEEE Power Engineering Society International Conference on Power Industry Computer Applications, 2001.PICA 2001. Innovative Computing for Power - Electric Energy Meets the Market. pp. 70 – 73.

- [73] TARANTO, G. N., PINTO, L. M. V. G., PEREIRA, M. V. F. Mayo 1992. Representation of FACTS Devices in Power System Economic Dispatch. IEEE Transactions on Power Systems, 7(2): 572 – 576.
- [74] DE OLIVEIRA, E. J., LIMA, J. W. M., DE ALMEIDA, K. C. Febrero 2000. Allocation of FACTS Devices in Hydrothermal Systems. IEEE Transactions Power Systems, 15 (1): 276 – 282.
- [75] BLANCO, G. A., OLSINA, F. G., GARCÉS, F. F. Dispositivos FACTS en Mercados Eléctricos Competitivos - Estado del Arte. CONICET, DAAD.
- [76] ROMERO, R., ROCHA, C., MONTOVANI, J. R. S., SANCHEZ, I. G. Marzo 2005. Constructive heuristic algorithm for the DC model in Transmission Network Expansion Planning. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 152 (2): 277 – 282.
- [77] POVH, D. Febrero 2000. Use of HVDC and FACTS. Proceedings of the IEEE, 88 (2): 235 – 245.
- [78] KOCH, H. J. Noviembre 2005. Influences of Bottle-necks in the Transmission Network. The 7th International Power Engineering Conference, 2005, Vol. 2. pp. 798 – 802.
- [79] SEPPA, T. O., SALEHIAN, A. Octubre 2006. Random variability and uncertainty of transmission line thermal ratings. Power Systems Conference and Exposition, 2006. pp. 1957 – 1961.
- [80] HINGORANI, Narain, GYUGYI, Laszlo. Understanding FACTS: Concepts and technology of Flexible AC Transmission Systems. New York, USA. John Wiley & Sons, INC., Publication. 2000. p. 432
- [82] TARANTO, G. N., PINTO, L. M. V. G., PEREIRA, M. V. F. Mayo 1992. Representation of FACTS devices in power system economic dispatch. IEEE Transactions on Power Systems, 7(2): 572 – 576.
- [83] Ley Núm. 20.257. Chile. Introduce modificaciones a la ley general de servicios eléctricos respecto de la generación de energía eléctrica con fuentes de energías renovables no convencionales. Marzo 2008.

- [84] NEICÚN, M. Diciembre 2011. Metodología para la planificación de la expansión en transmisión considerando la estabilidad de tensión del sistema. Memoria de título. Santiago, Chile. Universidad de Chile. 129p.
- [85] CDEC – SIC. Estadísticas de operación 2002 – 2011. www.cdec-sic.cl
- [86] INE Chile. Distribución y consumo energético en Chile. Septiembre 2008. www.ine.cl
- [87] Comisión Nacional de Energía. Norma técnica de seguridad y calidad de servicio. Santiago, Chile. Octubre 2009.
- [88] CDEC – SIC. Mapa Sistema Interconectado Central. Julio 2012. www.cdec-sic.cl