

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



## **METODOLOGÍA PARA EL PLANEAMIENTO DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN CON UBICACIÓN ÓPTIMA DE DISPOSITIVOS FACTS**

### **TESIS**

**PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS  
MENCIÓN: SISTEMAS DE POTENCIA**

**PRESENTADA POR:  
FREDDY CARLOS GONZALES SANCHEZ**

**LIMA - PERU**

2011

A mi esposa Rosario y mis hijos Freddy, Shiumy (QEPD), Bryan y Juan José, quienes con su amor motivan mis acciones.

- A mis padres José (QEPD) e Irene y mis hermanos José, Irma, Edgar, Judith y Vilma por su apoyo incondicional y permanente.

## **Agradecimientos**

Agradezco a mi asesor y guía, el M. Sc. Víctor Félix Cáceres Cárdenas, por sus consejos y apoyo en la elaboración de la presente tesis.

A todos los profesores de la Universidad Nacional de Ingeniería, por los conocimientos brindados.

A la Empresa Red de Energía del Perú (REP), por el apoyo en información técnica y apoyo económico brindado para los estudios de post grado.

Al profesor Dr. Jaime Luyo, por su confianza, dirección y consejos en el desarrollo de la presente tesis.

Agradezco al M. Sc. Juan Velásquez, por sus consejos y recomendaciones en la elaboración de la presente tesis.

Agradezco de igual forma, a los revisores de la tesis, el M. Sc. Jose Koc Rueda y el M. Sc. Zócimo Naupari, por los consejos brindados en el desarrollo del presente trabajo.

## Indice

<b>Agradecimientos.....</b>	<b>III</b>
<b>Indice de tablas.....</b>	<b>VII</b>
<b>Indice de figuras.....</b>	<b>IX</b>
<b>Lista de acrónimos.....</b>	<b>XII</b>
<b>Resumen.....</b>	<b>XIII</b>
<b>Capítulo I Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Limitaciones y alcances.....	3
1.4 Estructura de la tesis.....	4
<b>Capítulo II Expansión de los sistemas de transmisión.....</b>	<b>5</b>
2.1 Generalidades.....	5
2.2 Planeamiento Estático de Expansión de la Transmisión .....	7
2.2.1 Modelamiento estático de expansión de la transmisión .....	9
2.2.1.1 Modelo DC.....	10
2.2.1.2 Modelo de transporte.....	12
2.2.1.3 Modelo Híbrido.....	13
2.2.2 Técnicas de solución del planeamiento estático.....	14
2.2.2.1 Algoritmos heurísticos constructivos.....	14
2.2.2.1.1 Algoritmo de Garver.....	14
2.2.2.1.2 Algoritmo de Villasana-Garver .....	15
2.2.2.1.3 Algoritmo de mínimo esfuerzo .....	15
2.2.2.1.4 Algoritmo de Mínimo Corte de Carga (MCC).....	16
2.2.2.2 Métodos de Optimización Clásica.....	16
2.2.2.3 Métodos de Optimización Combinatoria .....	17
<b>Capítulo III Sistemas Flexibles de Transmisión de Corriente Alterna (FACTS)</b>	<b>19</b>
3.1 Generalidades.....	19
3.2 Principios de operación de los equipos FACTS.....	20
3.3 Clasificación de los equipos FACTS.....	21
3.3.1 Controlador serie.....	21
3.3.2 Controlador en derivación.....	21
3.3.3 Controlador serie-serie.....	21
3.3.4 Controlador serie-derivación.....	22

3.4	El SVC.....	22
3.5	El TCSC.....	23
3.5.1	Parámetros y modos de operación del TCSC.....	23
3.5.2	Consideraciones para el cálculo de Parámetros del TCSC.....	25
3.6	Ubicación óptima de los equipos FACTS.....	25
3.6.1	Técnicas de sensibilidad.....	26
3.6.2	Técnicas Heurísticas.....	30
3.6.2.1	Algoritmos Genéticos (AGs).....	30
3.6.2.2	Relajación del Lagrangiano.....	32
3.6.2.3	Búsqueda Tabú.....	33
	<b>Capítulo IV Introducción a los Algoritmos Genéticos.....</b>	<b>34</b>
4.1	Generalidades.....	34
4.1.1	Resumen de técnicas evolutivas.....	35
4.2	Algoritmos Genéticos.....	35
4.2.1	Definición.....	35
4.2.2	Descripción.....	35
4.3	Operaciones básicas de los algoritmos genéticos.....	36
4.3.1	Representación de la variable.....	38
4.3.2	Población de individuos.....	38
4.3.3	Ruleta de selección.....	38
4.3.4	El proceso de cruce.....	39
4.3.5	El proceso de mutación.....	39
4.4	Algoritmo Genético aplicado al problema de planeamiento de la transmisión	39
4.4.1	Representación del Problema.....	41
4.4.2	Codificación del problema.....	41
4.4.3	Selección, recombinación y mutación.....	43
4.4.4	Parámetros de Control y Criterios de Parada.....	45
4.5	Ejemplos de aplicación de los AGs.....	45
4.5.1	Ejemplo ubicación óptima de un capacitor serie en un SEP.....	46
4.5.1.1	Análisis de resultados.....	48
4.5.2	Ejemplo expansión de la transmisión en Sistema Garver de 6 barras	49
4.5.2.1	Análisis de resultados.....	51
	<b>Capítulo V Metodología.....</b>	<b>52</b>
5.1	Generalidades.....	52
5.2	Planteamiento del problema.....	53
5.3	Desarrollo de la metodología .....	55
5.3.1	Etapas de la metodología.....	58
	<b>Capítulo VI Aplicación de la metodología y resultados .....</b>	<b>62</b>

6.1	Generalidades.....	62
6.2	Aplicación de la metodología.....	64
6.2.1	Información Base.....	64
6.2.2	Definición del escenario.....	65
6.2.3	Optimizar la red existente (1º).....	66
6.2.3.1	Determinar los lugares factibles de ubicación de FACTS....	66
6.2.3.2	Población inicial de individuos.....	72
6.2.3.3	Ejecución de Flujo de Potencia.....	72
6.2.3.4	Evaluación de desempeño.....	73
6.2.3.5	Proceso de selección, cruce y mutación.....	73
6.2.3.6	Resultados.....	73
6.2.3.7	Cálculo de parámetros del TCSC .....	74
6.2.4	Expansión de la Red Mejorada (2º).....	78
6.2.4.1	Determinación de líneas candidatas.....	79
6.2.4.2	Selección aleatoria de líneas.....	83
6.2.4.3	Individuo.....	83
6.2.4.4	Nueva topología de la red de transmisión.....	84
6.2.4.5	Ejecución de Flujo de Potencia.....	84
6.2.4.6	Evaluar sobrecargas.....	84
6.2.4.7	Proceso de selección, cruce y mutación.....	85
6.2.4.8	Función de Aptitud.....	85
6.2.4.9	Costo de inversión.....	86
6.2.4.10	Selección del plan.....	87
	<b>Conclusiones.....</b>	<b>88</b>
	<b>Recomendaciones.....</b>	<b>91</b>
	<b>Bibliografía .....</b>	<b>92</b>
	<b>Anexos.....</b>	<b>96</b>
	Anexo A: Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN).....	97
	Anexo B: Código fuente del algoritmo genético.....	99
	Anexo C: Ejemplo de operaciones básicas de los algoritmos genéticos .....	106
	Anexo D: Ejemplo de ubicación óptima de un capacitor serie en un SEP.....	110
	Anexo E: Información complementaria de aplicación de la metodología al SEIN...	113
	Anexo F: Información complementaria Sistema Garver de 6 barras.....	131

## Índice de tablas

Tabla 4.1	Representación de individuos como cadena de ocho bits.....	106
Tabla 4.2	Población inicial, $x$ , y $f(x)$ .....	106
Tabla 4.3	Individuos elegidos.....	106
Tabla 4.4	Primera Generación de individuos después del cruce.....	107
Tabla 4.5	Primera generación de Individuos.....	108
Tabla 4.6	Segunda generación de Individuos.....	108
Tabla 4.7	Tercera generación de Individuos.....	108
Tabla 4.8	Cuarta generación de Individuos.....	109
Tabla 4.9	Quinta generación de Individuos.....	109
Tabla 4.10	Sexta generación de Individuos.....	109
Tabla 4.11	Resultados del proceso de cruce.....	109
Tabla 4.12	Población Inicial de 8 individuos.....	47
Tabla 4.13	Líneas candidatas.....	50
Tabla 4.14	Datos del Sistema Garver de 6 barras .....	131
Tabla 4.15	Población Inicial de Individuos para el Sistema Garver de 6 barras....	131
Tabla 4.16	Costo de Alternativas Encontradas.....	50
Tabla 6.1	Proyección de Demanda de Energía .....	113
Tabla 6.2	Proyección de Demanda de Potencia Período 2006 – 2015.....	113
Tabla 6.3	Escenarios de Expansión de Generación.....	64
Tabla 6.4	Proyección de Generación en Chilca.....	65
Tabla 6.5	Proyección de Generación Utilizada.....	65
Tabla 6.6	Datos de Líneas de 220 kV del SEIN.....	115
Tabla 6.7	Datos de Generadores del SEIN - Escenario de Avenida.....	116
Tabla 6.8	Datos de Generadores del SEIN - Escenario de Estiaje.....	117
Tabla 6.9	Datos de Cargas del SEIN - Escenario de Avenida.....	118
Tabla 6.10	Datos de Cargas del SEIN - Escenario de Estiaje.....	119
Tabla 6.11	Líneas consideradas para el análisis de sensibilidad.....	67
Tabla 6.12	Sensibilidad de líneas. ....	68
Tabla 6.13	Líneas candidatas para instalación de TCSC.....	70
Tabla 6.14	Líneas candidatas y población inicial de individuos.....	72
Tabla 6.15	Tensiones en barras principales sin TCSC.....	74
Tabla 6.16	Parámetros del TCSC ubicado en la L-2203 .....	75
Tabla 6.17	Parámetros del TCSC ubicado en la L-2231.....	75

Tabla 6.18	Tensiones en barras principales con TCSC.....	77
Tabla 6.19	Resumen de escenario con y sin TCSC.....	78
Tabla 6.20	Líneas candidatas.....	80
Tabla 6.21	Propuesta Plan Referencial de Electricidad del MINEM.....	81
Tabla 6.22	Líneas candidatas y población inicial de individuos.....	83
Tabla 6.23	Función de aptitud de generación N° 10.....	86
Tabla 6.24	Costo de Alternativas encontradas.....	86



## Índice de figuras

Figura 1.1	Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN).....	97
Figura 1.2	Diagrama Unifilar del SEIN.....	98
Figura 3.1	Controladores FACTS en la Transmisión de Potencia.....	21
Figura 3.2	Clasificación de controladores FACTS según su conexión .....	22
(a)	Controlador serie.....	22
(b)	Controlador en derivación.....	22
(c)	Controlador serie-serie.....	22
(d)	Controlador coordinado serie-paralelo.....	22
(e)	Controlador unificado serie-paralelo.....	22
Figura 3.3	Representación de un equipo SVC.....	22
Figura 3.4	Representación de un equipo TCSC.....	23
Figura 3.5	Modos de operación de un TCSC.....	23
(a)	Modo pasatodo.....	23
(b)	Modo bloqueado .....	23
(c)	Modo conducción parcial capacitivo.....	23
(d)	Modo conducción parcial inductivo .....	23
Figura 3.6	Reactancia a frecuencia fundamental de un TCSC .....	25
Figura 3.7	Sensibilidad de líneas.....	28
Figura 3.8	Representación gráfica de la función objetivo.....	31
(a)	Función Objetivo, nivel de tensión en barras.....	31
(b)	Función objetivo, carga en líneas.....	31
Figura 4.1	Ruleta de selección .....	106
Figura 4.2	Ruleta con 80% de probabilidad de cruce.....	107
Figura 4.3	Ruleta para puntos de cruce.....	107
Figura 4.4	Puntos de cruce de cada par de individuos.....	107
Figura 4.5	Sistema Garver de 6 barras.....	40
Figura 4.6	Codificación del problema de planeamiento.....	42
Figura 4.7	Formas de Codificación del problema de planeamiento.....	42
Figura 4.8	Codificación binaria, combinación y mutación.....	43
Figura 4.9	Recombinación y mutación.....	45
(a)	Circuitos candidatos.....	44
(b)	Configuraciones seleccionadas.....	44
(c)	Configuraciones después del cruce.....	44

(d)	Configuraciones después de la mutación.....	45
Figura 4.10	Diagrama unifilar de red sencilla.....	46
Figura 4.11	Ejemplo de cromosoma.....	46
Figura 4.12	Ejemplo de ruleta sesgada al 25%.....	46
Figura 4.13	Funciones de aptitud de tensión y carga.....	47
Figura 4.14	Diagrama Unifilar y datos de carga y líneas.....	110
Figura 4.15	Cargas de red de 3 barras, 7mo y 9no año.....	110
Figura 4.16	Caso base, para red de 3 barras.....	111
Figura 4.17	Caso séptimo año, sin TCSC.....	111
Figura 4.18	Caso séptimo año, con TCSC.....	112
Figura 4.19	Caso noveno año, con TCSC.....	112
Figura 4.20	Expansión de la transmisión del Sistema Garver de 6 barras.....	49
Figura 4.21	Sistema Garver representado en el Digsilent, Periodo Final.....	132
Figura 4.22	Sistema Garver caso Periodo Final, alternativa 1.....	133
Figura 4.23	Sistema Garver caso Periodo Final, alternativa 2.....	134
Figura 4.24	Sistema Garver caso Periodo Final, alternativa 3.....	135
Figura 4.25	Sistema Garver caso Periodo Final, alternativa 4.....	136
Figura 5.1	Descomposición de la Metodología.....	55
Figura 5.2	Diagrama de Flujo para ubicación de FACTS.....	56
Figura 5.3	Etapas de la Metodología.....	57
Figura 5.4	Diagrama de Flujo de etapas de la Metodología.....	57
Figura 5.5	Ejemplo de cadena de cromosomas.....	58
Figura 5.6	Ejemplo de Población inicial de individuos.....	58
Figura 5.7	Flujograma para la Función de Aptitud.....	59
Figura 5.8	Flujograma del Algoritmo Genético.....	60
Figura 5.9	Selección vía ruleta.....	60
Figura 5.10	Cruzamiento de dos puntos.....	61
Figura 6.1	División de áreas del SEIN.....	62
Figura 6.2	Diagrama de flujo de la metodología.....	63
Figura 6.3	Proyección de Demanda de Energía.....	113
Figura 6.4	Proyección de Demanda de potencia.....	113
Figura 6.5	Sistema Transmisión Nacional del Perú.....	114
Figura 6.6	Sistema Eléctrico Interconectado Nacional - Demanda Máxima Avenida-2006 .....	120
Figura 6.7	Sistema Eléctrico Interconectado Nacional - Demanda Máxima Estiaje-2006.....	121
Figura 6.8	Sistema Eléctrico Interconectado Nacional - Demanda Media	

	Avenida-2006 .....	122
Figura 6.9	Sistema Eléctrico Interconectado Nacional - Demanda Media Estiaje-2006.....	123
Figura 6.10	Sistema Eléctrico Interconectado Nacional - Demanda Mínima Avenida-2006.....	124
Figura 6.11	Sistema Eléctrico Interconectado Nacional - Demanda Mínima Estiaje-2006.....	125
Figura 6.12	SEIN-Demanda Máxima Avenida-Proyectada 2008_Sin TCSC.....	126
Figura 6.13	Sensibilidad de Líneas para ubicación de TCSC (escenario: Máx-Med-Mín_Avenida).....	69
Figura 6.14	Sensibilidad de Líneas para ubicación de TCSC (escenario: Máx-Med-Mín_Estiaje).....	69
Figura 6.15	SEIN - Líneas Candidatas para ubicación de TCSC.....	71
Figura 6.16	SEIN-Demanda 20% de carga base_Sin TCSC.....	127
Figura 6.17	Angulo de disparo del TCSC ubicado en la L-2203.....	76
Figura 6.18	Angulo de disparo del TCSC ubicado en la L-2231.....	76
Figura 6.19	SEIN-Demanda 25% de carga base_con TCSC.....	128
Figura 6.20	SEIN-Demanda Máxima Avenida_con TCSC.....	129
Figura 6.21	SEIN-Demanda Máxima Estiaje_con TCSC.....	130
Figura 6.22	Líneas candidatas y líneas existentes.....	81
Figura 6.23	Representación de líneas candidatas en el DigSILENT.....	82

**Lista de acrónimos**

SEIN	Sistema Eléctrico Interconectado Nacional
COES	Comité de Operación Económica del Sistema
OSINERGMIN	Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería
REP	Red de Energía Eléctrica del Perú
FACTS	Sistema de Transmisión Flexible de Corriente Alterna
SVC	Compensador Estático Variable
TCSC	Capacitor Serie Controlado por Tiristores
CA	Corriente Alterna
CD	Corriente Directa
SEP	Sistemas Eléctricos de Potencia
AG	Algoritmo Genético
EPRI	Electric Power Research Institute
STATCOM	Compensador Estático de Control Automático
PAR	Reguladores de Fase
TCPST	Transformadores de Cambio de Fase Controlados por Tiristores

## Resumen

En este trabajo, se propone una metodología para solucionar el problema del planeamiento estático de la expansión del sistema de transmisión de corto o largo plazo.

La metodología esta basada en flujos de potencia activa y reactiva y el uso de un algoritmo genético. Es decir, se utiliza los resultados del flujo de potencia para la evaluación de la aptitud de cada individuo dentro del algoritmo genético. Para ello, se elaboró un algoritmo basado en la teoría fundamental de los algoritmos genéticos. Se utilizó el lenguaje de programación C++ para correr el algoritmo genético de optimización y se usó el software: Power Factory DlgSILENT para correr los casos que el algoritmo de optimización nos indica.

La diferencia del presente trabajo con otros similares radica en que, la presente metodología esta estructurada en dos etapas que nos permite tratar el problema de operación y expansión de la transmisión: **la primera**, mejora la red existente con la ubicación óptima de dispositivos FACTS; luego, **la segunda**, con la red mejorada nos permite ubicar optimamente las líneas de transmisión que se deben de construir para atender los requerimientos de demanda proyectada.

Para optimizar la red, con técnica de sensibilidades se encontró las líneas factibles para la instalación de un capacitor serie. Para la ubicación óptima de este dispositivo, se utilizo el software DigSILENT. Los resultados de flujos de potencia sirvieron para evaluar la función de desempeño en un proceso iterativo dentro del algoritmo genético. Los resultados indican la instalación de capacitores series: uno en la línea L-2203 y otro en la L-2231 con reactancias de 40 y 37.5  $\Omega$  respectivamente y se logró una mejor distribución de flujos en las líneas que vienen de la C.H. Mantaro, además de aumentar la cargabilidad de 3483.3 a 3747.5 MW, lo cual nos permitió atender una mayor demanda.

Para la expansión de la red mejorada, se utilizó la técnica basada en descomposición de Benders utilizando un AG para resolver el subproblema de expansión y un flujo de potencia lineal en la solución del problema de operación. Considerando el proyecto de generación ubicado en la SE Chilca (900 MW), se logró el objetivo de determinar las líneas a construir para satisfacer la demanda proyectada. El costo de las mismas ascendió a un monto de 47904 miles \$.

## Abstract

In this work, propose a methodology to solve the problem static planning the expansion of the transmission system of short or long term.

The methodology is based on active power flows and reactive and the use of a genetic algorithm. That is, results using power flow for assessing the fitness of each individual within the genetic algorithm. To this end, developed an algorithm based on the fundamental theory of genetic algorithms. We used the programming language C++ to run the genetic algorithm optimization and software was used: Power Factory DIgSILENT cases running the optimization algorithm shows.

The difference of this study with similar ones is that, this methodology is structured in two phases allows us to address the issue of operation and expansion of the transmission: the first phase, improving the existing network with the optimal location of FACTS devices, then, the second phase, with the enhanced network allows us to optimally locate the transmission lines to be built to meet projected demand requirements.

To optimize the network, with sensibilitys technique was found feasible lines for installing a series capacitor. For the optimum location in this device, the software was used DigSILENT. The results of power flow, used to evaluate the performance function in an iterative process within the genetic algorithm. The results indicate the installation of series capacitors, one on the line L-2203 and another in the L-2231 reactors with 40 and 37.5  $\Omega$ , respectively. Achieve a better distribution of flows in the lines that come from the CH Mantaro, besides increasing the chargeability of 3483.3 to 3747.5 MW, which allows us to meet increased demand.

For expansion of the enhanced network, we used the technique based on Benders decomposition using a GA to solve the subproblem of expansion and linear power flow in the solution of the problem of operation. Whereas the generation project located in the SE Chilca (900 MW). It was possible to determine the lines to be built to meet projected demand. The cost of these amounted to a total of 47904 thousands \$

## Capítulo I

### Introducción

#### 1.1 Planteamiento del problema

En muchos países, se han dado cambios en el sector eléctrico. Así, hoy existen actividades eléctricas específicas de generación, transmisión, distribución y comercialización. Con estas actividades divididas del sector eléctrico, no solo surge la competencia entre los agentes, sino que va siendo la base en la toma de decisiones y esto de alguna forma direcciona o restringe el desarrollo de los sistemas de transmisión.

La planificación de los sistemas de transmisión, sigue de acuerdo a la reglamentación de cada país. En algunos, la planificación lo efectúa o es responsabilidad del ente regulador, en otros, el Estado realiza una labor indicativa, y deja el desarrollo del sistema de transmisión a cargo de los agentes.

El Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN) del Perú, también a experimentado cambios y debe enfrentar nuevos retos, como resultado principalmente: del crecimiento de la demanda, restricciones ambientales y otros que dificultan la viabilidad para la construcción de nuevas líneas, y en consecuencia el SEIN opera con líneas cargadas junto a otras líneas subutilizadas, originando problemas en la operación en tiempo real, con generación local obligatoria por seguridad, lo que en consecuencia encarece la operación debido al uso de recursos mas costosos.

Por otro lado, sabemos que en el SEIN las líneas de transmisión no se diseñaron para poder controlar el flujo de potencia en las líneas y la tensión en barras (el flujo en estas es netamente por impedancia de la línea). El control de estas variables eléctricas en la mayoría de los casos se efectúa con los grupos generadores a traves de los redespachos, lo que trae como consecuencia el encarecimiento de la operación.

El SEIN es un sistema eléctrico débil por zonas, por ejemplo: en la zona norte es un sistema radial en 220 kV, en otras zonas con frecuencia se tiene problemas de sobrecargas, de tensión, etc. Todo esto, originado por la incertidumbre existente al momento de la planificación del sistema de transmisión y generación. En este sentido, es necesario profundizar los estudios en el tema de la planificación y realizar mejoras continuamente para evitar luego los problemas en la operación.

El marco regulatorio peruano establece que la expansión de la transmisión del SEIN debe realizarse manteniendo la calidad, la seguridad y aprovechando al máximo los recursos energéticos. La empresa Red de Energía del Perú (REP), dedicada a la transmisión de energía eléctrica, es responsable de la operación de gran parte de las líneas de transmisión eléctrica en 220, 138 y 60 kV del SEIN. REP, de acuerdo a su Contrato de Concesión presenta al Ministerio de Energía y Minas (MINEM) cada dos años, un programa de equipamiento del Sistema de Transmisión a su cargo. En este programa, no se contempla mejorar la red existente con el uso de los FACTS, y en su metodología no se expande la red pensando tener un control de flujo en las líneas.

Por lo tanto, al ser la inversión en la transmisión un factor de gran importancia, es necesario analizar, estudiar y plantear nuevas alternativas técnicas y económicas que den solución a los distintos problemas que se están presentando. Podríamos afirmar que, muchos de los problemas que hoy existen, tienen su origen en la etapa del planeamiento de la expansión; y su solución, debería ser tratado también desde esta etapa.

Ante estos problemas, es necesario planificar el sistema de transmisión con la idea de poder tener el control de los flujos de potencia en las líneas y evitar problemas en la operación del sistema. En este sentido, el desarrollo de los sistemas FACTS (Flexible AC Transmissions Systems), basados en la electrónica de potencia, nos ofrece una excelente alternativa para afrontar con éxito estos nuevos retos.

Como se sabe, el problema del planeamiento de la expansión del sistema de transmisión se puede tratar desde dos perspectivas; planeamiento estático, en la cual solo se considera una etapa del problema con un horizonte de tiempo determinado (por ejemplo, 10 años) y tiene como fin determinar las líneas que se deben de construir y su inversión al inicio del horizonte de tiempo, y un planeamiento dinámico, el cual divide el horizonte de tiempo en intervalos y determina las mejores alternativas topológicas, el tipo de inversión y el momento más adecuado para realizar dichas inversiones.

Este trabajo, se centra en el planeamiento estático de la expansión de la transmisión de corto o largo plazo, con una perspectiva de control de flujo en las líneas, considerando el uso y ubicación óptima de dispositivos FACTS.

Si bien es cierto, existen diferentes metodologías que tratan el tema del planeamiento estático, estas tienen como único objetivo la construcción de nuevas líneas y no enfocan el problema, desde el punto de vista de mejorar la red existente antes de ver la necesidad de construcción de una nueva línea.



## 1.2 Objetivos

El objetivo de la presente tesis es estudiar las formas de expansión de los sistemas de transmisión y las técnicas existentes de ubicación óptima de dispositivos FACTS en un sistema eléctrico de potencia, y a partir de esto:

1. Proponer una metodología para el planeamiento estático de la expansión de la transmisión de un SEP, que considere el uso de los dispositivos FACTS, de manera de planificar con una perspectiva de control de flujo en las líneas.
2. Mostrar la validez de la metodología propuesta, aplicando la metodología al SEIN (Figura 1.1, anexo A), implementando las soluciones en el software DigSILENT.

## 1.3 Limitaciones y alcances

El presente estudio analiza la expansión del sistema de transmisión en condiciones de estado estacionario. Y está enmarcada en una planificación estática.

La metodología esta basada en flujos de potencia activa y reactiva y un algoritmo genético. Se utiliza los resultados del flujo de potencia para la evaluación de la aptitud de cada individuo dentro del algoritmo genético. Para ello, se usó el software Power Factory DlgSILENT para correr los casos que el algoritmo de optimización indica. Este proceso iterativo se realizó en forma manual.

El presente trabajo, realiza una contribución para el Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN), al considerar e incorporar desde la etapa de planificación las nuevas tecnologías como son los equipos FACTS.

En la aplicación de la presente metodología al SEIN, se mostraran las soluciones que son operativamente viables.

En la etapa de ubicación óptima de dispositivos FACTS, la metodología es descrita y detallada con el uso del capacitor serie controlado por tiristores (TCSC), efectuándose su análisis en el modo operativo capacitivo y bloqueo de sus tiristores, el cual es el punto límite donde la impedancia del TCSC es capacitiva pura y en estado estacionario lo podemos representar como un capacitor serie fijo.

La presente metodología, sin pérdida de generalidad puede aplicarse y utilizarse para ubicar cualquier tipo de equipo en un Sistema Electrico de Potencia.

#### 1.4 Estructura de la tesis

La presente tesis se estructura de la siguiente forma:

Capítulo II: *Expansión de los Sistemas de Transmisión* – Se describe las formas de planeamiento de expansión de la transmisión. Se formula la misma como un problema de optimización de gran complejidad. Se describe tres formas de modelamiento del problema estático (Modelo DC, modelo de Transporte y el modelo Híbrido). Así mismo, se describe tres técnicas de solución del problema estático: Algoritmos heurísticos constructivos (Garver, Villasana-Garver, mínimo esfuerzo y mínimo corte de carga), métodos de optimización clásica y métodos de optimización combinatoria.

Capítulo III: *Sistemas Flexibles de Transmisión de Corriente Alterna* – El objetivo de este capítulo es estudiar a estos dispositivos FACTS, sus bondades, características operativas, capacidad, ventajas y aplicaciones para maximizar la capacidad de transferencia en líneas de transmisión. Se describe técnicas de ubicación óptima de FACTS como son las técnicas basadas en sensibilidades y técnicas heurísticas (Algoritmos Genéticos, relajación del Lagrangiano y búsqueda tabú).

Capítulo IV: *Introducción a los Algoritmos Genéticos* – Se describe a los algoritmos genéticos (AG) como una técnica heurística de optimización para facilitar la solución de problemas difíciles de resolver. Se explica las operaciones básicas de los AG's y se detalla la aplicación de esta técnica en el problema de planeamiento. Se presenta con dos ejemplos la utilidad de los AG's en sistemas eléctricos de potencia.

Capítulo V: *Metodología* – En este capítulo se explica la presente metodología organizado en dos etapas: **la primera**, que consiste en mejorar la red existente con la ubicación óptima de dispositivos FACTS y luego, **la segunda**, que a partir de la red mejorada nos permite ubicar de manera óptima las líneas de transmisión que se debe de construir para atender los requerimientos de demanda proyectada.

Capítulo VI: *Aplicación de la metodología y resultados* – Se aplica la metodología al SEIN del Perú, enfocando nuestra zona de interés al área de mayor crecimiento de demanda, considerando el ingreso del gran parque de generación a vapor debido al aprovechamiento masivo del gas de Camisea, ubicado en la zona sur de Lima.

Capítulo VII: *Conclusiones y recomendaciones* – Se presentan las principales conclusiones obtenidas y recomendaciones para futuras investigaciones.

## **Capítulo II**

### **Expansión de los sistemas de transmisión**

#### **2.1 Generalidades**

Un sistema de transmisión debe de crecer a mínimo costo y debe de cumplir ciertos requisitos, como por ejemplo: satisfacer requerimientos tanto de los generadores como de los consumidores, debe ser técnicamente eficiente, confiable y debe poder brindar niveles adecuados de calidad de servicio. Para lograr todo ello, es necesario que el desarrollo del sistema de transmisión deba ser remunerado en forma justa a sus propietarios [1].

El sistema peruano, en la última década ha experimentado cambios sustanciales en su reestructuración regulatoria. Y, el desarrollo del sistema de transmisión se ha convertido en un factor de gran importancia por la necesidad de acondicionar el sistema eléctrico de tal forma que permita mantener la integridad operativa del sistema.

Ante los cambios presentados, es necesario plantear nuevas alternativas técnicas y económicas que den solución a los mismos. Gran parte de los problemas tienen su origen en la etapa de planeamiento de la expansión de largo plazo. Por lo tanto, la solución de muchos de los problemas que se vienen presentando, obviamente deben ser tratados desde la etapa de planificación.

El planeamiento de la expansión de la transmisión puede ser analizado en dos formas: planeamiento estático, el cual determina qué elementos y dónde instalarlos en el sistema eléctrico de potencia (SEP); y el planeamiento dinámico, que considera lo anterior y define cuándo deben ser instalados dichos elementos. Las dos formas sirven para definir la estructura y los elementos necesarios para favorecer económicamente a los agentes pertenecientes al SEP.

Matemáticamente, en los problemas de expansión de largo plazo se utilizan las ecuaciones del flujo de potencia lineal. Así, la expansión de la transmisión se formula como un problema de programación no lineal entero-mixto (PNLEM). Es decir, es un problema que involucra funciones no lineales, con variables reales (flujo en las líneas, valor de ángulos de tensión en barras, etc) y variables enteras (número de líneas, transformadores, etc). Y, por ser un sistema de transmisión generalmente de gran tamaño, tenemos un problema de alta complejidad matemática [2].

El estudio y exploración de diferentes metodologías que intentan resolver este problema de alta complejidad matemática, sirvieron para llegar a la conclusión de que no es posible encontrar la solución óptima para un sistema de transmisión de gran tamaño. Esto por el esfuerzo computacional que se requiere. En consecuencia, lo que se busca ya no es encontrar la solución óptima del problema y en su lugar, se usan técnicas que nos permitan encontrar una solución de calidad. Estas técnicas, combinan métodos exactos y heurísticos permitiéndonos encontrar soluciones a los problemas de planeamiento, las mismas que satisfacen los requerimientos preestablecidos de expansión de sistemas reales de gran tamaño.

Soluciones aproximadas del problema de la expansión de la transmisión combinaron versiones con flujos de carga en DC y técnicas de programación lineal el cual determina la solución óptima en continua del plan de expansión. El modelo DC, considera al número de líneas y transformadores como una variable continua y no como una variable entera. Esto es integrado en un algoritmo heurístico para encontrar una solución entera para el problema del planeamiento estático [3]. Luego, la programación lineal se combinó con la programación dinámica, pero su aplicación solo fué satisfactorio para sistemas pequeños por la necesidad gran recurso computacional. También se desarrollaron los métodos heurísticos constructivos cuyo análisis se basa en sensibilidades [4] por ejemplo el mínimo esfuerzo [5] y mínimo corte de carga [6]. Hoy en día, existen variedad de técnicas matemáticas como la de descomposición de Benders y Branch & Bound [8,9], técnicas combinatoriales como los algoritmos genéticos [9,10,11], meméticos, evolutivos, GRASP, búsqueda Tabú [11,12], Simulated Annealing [11,13], etc.

Para sistemas pequeños (pocas líneas candidatas y pocas barras) las técnicas descomposición de Benders con Branch and Bound, nos permiten encontrar soluciones de excelente calidad para el problema estático. Pero, para sistemas grandes (gran número de barras, sistema enmallado y gran cantidad de número de líneas candidatas), no son adecuadas debido al gran número de posibles soluciones (explosión combinatorial).

Para sistemas de alta complejidad, se recurre a las técnicas combinatoriales con la intención de obtener una solución “de buena calidad”, así esta solución no sea la solución óptima. Con estas técnicas, se renuncia a encontrar la solución óptima y se busca obtener una o varias soluciones subóptimas, dentro de las cuales puede encontrarse la solución óptima [2].

Para el planeamiento estático, los algoritmos genéticos, los métodos híbridos, simulated annealing y búsqueda Tabú son eficientes en la obtención de excelentes soluciones. Los métodos anteriores combinados entre sí, dieron origen a los denominados algoritmos híbridos [9].

Actualmente, se continúa experimentando y buscando metodologías que nos permitan resolver el problema del planeamiento estático de la expansión de la transmisión usando como técnicas de solución los algoritmos genéticos, técnicas evolutivas, búsqueda tabú y simulated annealing; también soluciones con el uso de la técnica de descomposición de Benders con Branch and Bound.

Este trabajo presenta una nueva metodología para realizar el planeamiento estático de la expansión de la transmisión. La metodología está basada en flujos de potencia activa y reactiva y el uso de un algoritmo genético. Es decir, se utiliza los resultados del flujo de potencia para la evaluación de la aptitud de cada individuo dentro del algoritmo genético. La diferencia del presente trabajo con otros similares radica en que, la presente metodología está estructurada en dos etapas, la cual nos permite tratar el problema de operación y expansión de la transmisión: la primera, mejora la red existente con la ubicación óptima de dispositivos FACTS; la segunda, con la red mejorada nos permite ubicar optimamente las líneas de transmisión que se debe de construir para atender los requerimientos de demanda proyectada.

## **2.2 Planeamiento Estático de Expansión de la Transmisión**

La expansión de la generación y transmisión es un problema de optimización de mucha complejidad debido a diferentes factores, de los cuales podemos anotar [10]:

1. La consideración de un período de largo plazo, de esta manera los inversionistas se pueden beneficiar de las economías de escala de la transmisión, y que también están presentes en algunas inversiones de generación, por ejemplo en inversiones de centrales hidroeléctricas. En estas inversiones es necesario decidir la construcción de determinada central hidroeléctrica con mucha anticipación, mucho antes de que se muestren necesarias para el sistema.
2. Las inversiones en generación y transmisión dependen entre sí y deberían ser analizadas en forma conjunta en todo el horizonte de tiempo considerado.
3. Las características técnicas, económicas y ambientales de las inversiones, deben de ser analizadas en conjunto.
4. La demanda proyectada, siempre tiene asociado un grado de incertidumbre, del mismo modo existe incertidumbre respecto a los recursos hídricos, del costo y

disponibilidad de otras fuentes de energía (carbón, gas, derivados del petróleo, etc) en el horizonte de planeamiento.

Considerando los factores anotados, para el planeamiento de la generación y transmisión, nos damos cuenta que este problema de optimización es de realmente difícil solución por el elevado número de variables (enteras y continuas), por el tipo de variables (técnicas y económicas) y por el número de restricciones (lineales y no lineales). Por ello, su solución siempre se ha simplificado a través de la separación entre el planeamiento de la transmisión y el planeamiento de la generación, resolviéndose primero el de generación, donde para su solución se utiliza una representación aproximada de las inversiones de la transmisión. También se simplifica su solución al no involucrar variables económicas relacionadas con mercados de energía en el modelo de planeamiento.

Por otro lado, para planificar los sistemas de transmisión, tradicionalmente se han utilizado modelos estáticos que analizan un solo horizonte de tiempo y consideran que todas las inversiones son realizadas en el mismo instante y al inicio del período considerado.

En consecuencia, podemos afirmar lo siguiente:

- El problema de planeamiento continúa siendo estudiado, y para su solución todavía se efectúa la separación entre el planeamiento de la generación y el planeamiento de la transmisión.
- No se ha concluido el estudio del planeamiento estático, y se siguen investigando nuevas alternativas para su solución.
- En el proceso de planificar la expansión de la transmisión, no se considera la etapa de mejoramiento y optimización de la red existente.

En el ámbito académico, se continúan realizando trabajos de alto nivel y recurso computacional y se analizan “todas” las alternativas o topologías que el software pueda considerar. En este proceso, se parte siempre de la intención de ampliar la red con la construcción de nuevas líneas, pero no se considera la posibilidad de mejorar la red existente. Se hace necesario entonces, proponer metodologías que permitan planificar la transmisión con un control de los flujos en las líneas utilizando nuevas tecnologías.

El presente trabajo pretende abordar el planeamiento estático de la transmisión considerando: *primero*, mejorar la red existente con equipos FACTS y *luego*, expandir la red con la construcción de nuevas líneas. Para ello, a diferencia de otras metodologías toma gran importancia el conocimiento o experiencia del planificador, conocimientos del operador del centro de control en tiempo real, y conocimiento de los proyectos en

cartera, de manera de poder considerar solo candidatos potenciales y evitar la llamada explosión combinatoria en el proceso de solución de este problema.

### 2.2.1 Modelamiento estático de expansión de la transmisión

Para el modelamiento del problema del planeamiento estático de la expansión de la transmisión se considera un único horizonte de tiempo. Este problema se puede decir que es una simplificación del problema dinámico. En el modelo estático, el objetivo es determinar la ubicación física y el tipo de inversión que se debe realizar para que el valor presente del costo total de inversión y de operación sea mínimo al comienzo del horizonte de planeamiento y en el período de tiempo considerado [16,17].

En forma general podemos representar al problema de planeamiento de la expansión de la generación y transmisión de los SEP como un problema de optimización [16,17]:

$$\text{Minimizar } P = c(x) + d(y)$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

$$A(x) \geq b \quad (1)$$

$$E(x) + F(y) \geq h$$

Donde:

- $x$ , considera todas las variables de inversión (capacidades de generación y transmisión);
- $c(x)$ , es el costo total asociado a las decisiones de inversión;
- $A(x) \geq b$ , son todas las restricciones que están asociadas a las decisiones de inversión (financieras, cronograma de construcciones, límites físicos, etc.);
- $y$ , considera todas las variables de operación del SEP (nivel de generación en barras, cargas, flujos en líneas y transformadores, etc.);
- $d(y)$ , es el costo total asociado a las decisiones de operación;
- $E(x)+F(y) \geq h$ , considera todas las restricciones asociadas a las decisiones de operación que a su vez dependen de las decisiones de inversión.

Con esta formulación dada en (1) y con definiciones apropiadas para esta función objetivo  $P = c(x)+d(y)$  y para las restricciones  $A(x) \geq b$  y  $E(x)+F(y) \geq h$ , es posible tratar una variedad de problemas de expansión de capacidades, problemas de planeamiento estático de la transmisión [8,11] y problemas del planeamiento dinámico [10]. Así, para el problema de planeamiento estático de la expansión de la transmisión de un SEP comúnmente se implementan tres modelos clásicos: el modelo DC [16,17], el modelo de transportes [3,18,19] y el modelo híbrido [3,19].

En esta parte del trabajo, se utilizará la expresión (1) para formular el problema de planeamiento estático de expansión de la transmisión de un SEP, que tiene como objetivo definir la cantidad y la ubicación física de las nuevas inversiones.

### 2.2.1.1 Modelo DC

En el modelo DC, se plantea el problema del planeamiento estático considerándolo como un problema de Programación No Lineal Entero Mixto (PNLEM), cuya solución es difícil de resolver por la gran cantidad de candidatos que se considera. En este modelo, en cada ruta se considera que se pueden construir 0, 1, 2 ó n ternas en paralelo, lo cual incrementa el número de topologías a ser evaluadas [16,17]. Su formulación es:

$$\text{Minimizar } V = \sum_{(i,j) \in \Omega} C_{ij} n_{ij} + \sum_i \alpha_i r_i \quad (2)$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

$$\begin{aligned} B(x + \delta^0)\theta + g + r &= d \\ (x_{ij} + \delta^0_{ij}) |\theta_i - \theta_j| &\leq (x_{ij} + \delta^0_{ij}) \Phi_{ijmax} \\ 0 \leq g &\leq g_{max} \\ 0 \leq r &\leq d \\ 0 \leq n_{ij} &\leq n_{ijmax} \\ (i,j) &\in \Omega \end{aligned}$$

Donde:

- $C_{ij}$  Costo de adicionar una nueva línea en la franja o ruta  $i-j$
- $X_{ij}$  Nueva susceptancia a ser instalada en la franja o ruta  $i-j$
- $B(.)$  Matriz de susceptancias
- $\Theta$  Ángulos en las tensiones en barras.
- $\delta^0$  Vector de susceptancias iniciales
- $\delta^0_{ij}$  Susceptancia inicial de la franja  $(i-j) \in \Omega$ .
- $n_{ij}$  Número de circuitos adicionados en la rama  $i-j$ ,  $n_{ij} = x_{ij}/\delta_{ij}$ , donde  $\delta_{ij}$  es la susceptancia nominal de un circuito conectado entre los nodos  $i-j$ .
- $\Omega$  Conjunto de todas las ramas definidas por las líneas existentes y las alternativas de expansión
- $\Phi_{ijmax}$  Relación:  $f_{ijmax}/\delta^0_{ij}$ , donde  $f_{ijmax}$  es flujo máximo permitido en el circuito  $i-j$
- $d$  Representa las cargas en barras.
- $g$  Representa la generación en barras.
- $g_{max}$  Representa la capacidad máxima de generación en barra.
- $r$  Representa los generadores ficticios.



$\alpha$  Parámetro de penalización asociado con la potencia no servida, causada por las limitaciones en la capacidad de transmisión

Este modelo DC, no garantiza la conectividad de la red cuando se realiza la adición de un solo circuito. En consecuencia, la red final podría resultar una red desconectada.

En cada configuración encontrada, la formulación (2) se convierte en un problema de programación lineal cuyo objetivo es ver si la inversión encontrada tiene un corte de carga igual a cero. Pero (2) siempre es factible debido a la presencia del factor  $\sum \alpha_i r_i$ .

Con esta formulación se consideran variables continuas de operación y variables enteras de inversión.

Este modelo, es considerado como un modelo ideal para ser utilizado en planeamiento de sistemas de transmisión, pues considera las dos leyes de Kirchhoff en la descripción del sistema eléctrico. La desventaja de este modelo es que resuelve solo el problema de potencia activa. Siendo luego necesario resolver el problema de potencia reactiva, el cual consiste en un problema de planeamiento óptimo de ubicación de nuevos generadores de potencia reactiva en el SEP.

El modelo mostrado en (2) es el resultado de la modificación del modelo DC convencional. Es decir, el término  $\sum \alpha_i r_i$  en la función objetivo se añadió para facilitar su solución. Cuando  $\alpha$  asume un valor relativamente grande, entonces todos los  $r_i$  son iguales a cero, esto quiere decir que toda la demanda del SEP es atendida. Para un valor pequeño de  $\alpha$ , podría encontrarse una solución donde algunos  $r_i$  resulten diferentes de cero, esto quedaría decir que no se logró satisfacer toda la demanda del SEP, existiendo una Potencia No Suministrada (PNS). Por lo tanto, para el caso en que todos los  $r_i$  son iguales a cero, la solución encontrada tanto en la formulación original como en la modificada serán iguales.

La intención de adicionar un segundo término en la función objetivo es para que el problema transformado sea factible, ya que cuando aparezcan sobrecargas en el sistema, estas serán compensadas con generadores ficticios instalados en todas las barras de carga. Por lo tanto, debemos tener en cuenta el concepto de factibilidad de este problema de planeamiento. Para una topología determinada el problema (2) es un problema de programación lineal (PL). Si una solución presenta un  $r_i \neq 0$ , entonces la propuesta de inversión no es factible para la formulación original pero es factible para la formulación (2). Por lo tanto, un algoritmo que resuelva (2) será eficiente cuando logre

entregar una solución final sin corte de carga ( $r=0$ ) para que esa solución sea también igual o equivalente a la formulación original.

Cuando se encuentra una topología específica de inversión, el problema se convierte en un problema de mínimo corte de carga. Entonces, una vez definida una alternativa de inversión, el problema (2) se reduce a un problema de PL el cual puede ser resuelto por cualquier técnica eficiente. El algoritmo de PL, con una topología o alternativa de inversión definida resuelve el siguiente problema [16,17]:

$$\text{Minimizar } W = \sum_i \alpha_i r_i \quad (3)$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

$$\begin{aligned} B(x + \delta^o)\theta + g + r &= d \\ (x_{ij}^k + \delta_{ij}^o) | \theta_i - \theta_j | &\leq (x_{ij}^k + \delta_{ij}^o) \Phi_{ijmax} \\ 0 &\leq g \leq g_{max} \\ 0 &\leq r \leq d \end{aligned}$$

La expresión dada en (3) representa un problema de PL cuyos valores de  $x_{ij}^k$  son conocidos para una topología de inversión específica. Por lo tanto, para un  $x^k$  dado, la solución que se encuentre con un algoritmo de PL aplicado al sistema (3) nos indicará que el sistema presenta corte de carga (infactible) en relación a la formulación original. Con estas consideraciones se desarrollaron algoritmos usando Simulated Annealing [13,15], Genéticos [7,10,11], Búsqueda Tabu [12] e Híbridos [11] que resuelven el problema de planeamiento de expansión de la transmisión y generación.

Cabe acotar que, encontrar una solución óptima para el problema de planeamiento estático de un SEP de gran tamaño y complejidad, usando la formulación (2), representa todavía un gran desafío, pues no existe en la actualidad una técnica de solución o algoritmo con esa capacidad.

### 2.2.1.2 Modelo de transporte

Este modelo fué considerado la primera propuesta para el planeamiento de la transmisión de un SEP que utilizó programación lineal. Fué formulado por Garver [3]. La metodología de Garver consiste en resolver de forma aproximada una versión relajada del modelo DC. El modelo de Garver (modelo de transporte), solo considera la primera

ley de Kirchhoff y las capacidades de transmisión de las líneas. Este modelo no considera la segunda ley de Kirchhoff. Este modelo tiene la forma [3,18,19]:

$$\text{Minimizar } V = \sum_{(i,j) \in \Omega} C_{ij} n_{ij} + \sum_i \alpha_i r_i \quad (4)$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

$$\begin{aligned} Sf + g + r &= d \\ |f_{ij}| - (n_{ij} + n_{ij}^{\circ}) f_{ij} &\leq 0 \\ 0 \leq g &\leq g_{max} \\ 0 \leq r &\leq d \\ 0 \leq n_{ij} &\leq n_{ijmax} \\ (i,j) &\in \Omega \end{aligned}$$

Donde:

$S$  representa la matriz de incidencia barra-ruta

$f_{ij}$  representa el flujo de potencia en la ruta i-j

$n_{ij}$  representa el número de líneas nuevas en la ruta i-j

$n_{ij}^{\circ}$  representa el número de líneas existentes en la ruta i-j, en la topología inicial

Este modelo al no considerar las restricciones que corresponde a la segunda ley de Kirchhoff, tiene desventajas en su solución encontrada, pudiendo resultar una solución inadecuada, debido a que la solución de este modelo podría presentar un corte de carga inadecuado.

La ventaja del modelo de transportes, radica en que este se convierte en un problema lineal entero mixto (PLEM) que obviamente es más fácil de resolver. Garver en [3], utilizó un algoritmo aproximado para resolverlo. Este algoritmo utilizado por Garver fue ampliamente aceptado en su momento, al no existir algoritmos mejores que resolvieran el problema de planeamiento de expansión de la transmisión.

### 2.2.1.3 Modelo Híbrido

Formulación planteada por Garver [3]. Este modelo combina el modelo de transportes y el modelo DC. Este modelo pretende resolver las desventajas encontradas en la solución del modelo de transportes. Entonces, considera adicionar parcialmente restricciones correspondientes a la segunda ley de Kirchhoff, las cuales corresponden a líneas y transformadores existentes, y son eliminadas las restricciones correspondientes a las nuevas ramas. Este modelo tiene la forma [3,19]:

$$\text{Minimizar } V = \sum_{(i,j) \in \Omega} C_{ij} n_{ij} + \sum_i \alpha_i r_i \quad (5)$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

$$\begin{aligned} B_1 \theta + S_2 f + g + r &= d \\ |\theta_i - \theta_j| &\leq \Phi_{ijmax} && (i,j) \in \Omega_1 \\ |f_{ij}| - (n_{ij} + n_{ij}^0) f_{ijmax} &\leq 0 && (i,j) \in \Omega_2 \\ 0 &\leq g \leq g_{max} \\ 0 &\leq r \leq d \\ 0 &\leq n_{ij} \leq n_{ijmax} \\ &&& (i,j) \in \Omega \end{aligned}$$

Donde:

- $\Omega_1$  Representa el conjunto de rutas donde ya existen líneas en la topología básica
- $\Omega_2$  Representa el conjunto de rutas candidatas en lugares donde no existen líneas en la configuración inicial.
- $B_1$  Representa la matriz de susceptancias para las rutas que pertenecen a  $\Omega_1$
- $S_2$  Representa la matriz de incidencia de rutas para los lugares que pertenecen a  $\Omega_2$
- $f$  Representa el vector de flujos por las líneas que pertenecen a  $\Omega_2$ .

## 2.2.2 Técnicas de solución del planeamiento estático

El problema de planeamiento estático, se caracteriza porque no se determina cuándo se deben de realizadas determinadas inversiones tanto de expansión de la generación como de la transmisión de energía eléctrica. Es decir, se considera un solo período de planeamiento.

### 2.2.2.1 Algoritmos heurísticos constructivos

Garver [3], fue el primer método aproximado, propuso un algoritmo para encontrar una excelente topología, pero esta no necesariamente resultaría ser la configuración óptima. Existieron otros métodos como el de Villanasa [14], el cual fué una modificación del método de Garver donde se consideraba la red de transmisión usando un modelo híbrido.

Metodos como del mínimo esfuerzo y mínimo corte de carga usaron también el modelo DC [16,17]. Estas metodologías son muy empleadas para el planeamiento de sistemas de transmisión, pues son de fácil implementación y utilizan poco recurso computacional; con relación a la calidad de la respuesta.

#### 2.2.2.1.1 Algoritmo de Garver

El algoritmo de Garver [3], es una metodología que debe seguirse paso a paso y en forma iterativa, en cada iteración el algoritmo debe de tomar una decisión de añadir una línea a la topología actual. El algoritmo de Garver en cada paso resuelve el sistema (4), sin considerar los generadores ficticios y usando programación lineal (PL).

En cada paso, se añade a la última topología en estudio, el circuito candidato con mayor flujo de potencia en la solución de PL. El proceso termina cuando la solución de PL indica que no se requieren más líneas y que el sistema está operando sin sobrecargas.

La ventaja de esta metodología, es su simplicidad en la implementación de su algoritmo. Su desventaja radica, en que esta metodología no garantiza encontrar la solución óptima del sistema.

#### **2.2.2.1.2 Algoritmo de Villasana-Garver**

La metodología de Villasana-Garver [14], es una ampliación de la metodología de Garver [3], en esta se añade la segunda ley de Kirchhoff a la topología existente indicada en la formulación (4), tomando la forma presentada en (5) con la diferencia que no se considera los generadores ficticios.

En esta metodología, en cada paso se resuelve la programación lineal obteniéndose como resultado las líneas que deben ser añadidas al sistema. Para esto, el algoritmo selecciona el circuito candidato que lleva el mayor flujo de potencia igual que en el algoritmo de Garver. Esta nueva topología es considerada como parte de la red en la solución de los siguientes problemas de PL. Es decir, todo circuito adicionado pasa a satisfacer la segunda ley de Kirchhoff en las siguientes iteraciones. Esta particularidad permite que la solución final encontrada por el algoritmo Villanasa-Garver sea factible para el modelo DC. Pero esta metodología, tampoco garantiza una solución óptima.

#### **2.2.2.1.3 Algoritmo de mínimo esfuerzo**

En el algoritmo de mínimo esfuerzo [5], se usa el modelo DC. Esta metodología, también se sigue paso a paso. Es decir, para una topología del sistema inicial, los circuitos son añadidos uno por uno. El criterio para añadir el próximo circuito se determina por un análisis de sensibilidad, llamado de mínimo esfuerzo.

En la topología inicial, existía la probabilidad de tener barras desconectadas, esto se resolvía superponiendo a la topología del sistema, una “topología ficticia” constituida por enlaces con impedancias altas ( $10^4$  veces los valores nominales), ubicados en todas los enlaces donde se podía considerar nuevas líneas. La baja capacidad de transmisión de la “topología ficticia” obviamente impediría que sus enlaces sean utilizados mientras sea posible transportar la potencia por la topología real.

Esta metodología soluciona en cada paso la programación lineal de la relación dada en (3), y para esto no considera las limitaciones en las líneas de transmisión, en consecuencia, las líneas de la topología real y ficticia podían sobrecargarse y darnos siempre cero el corte de carga.

La ventaja de esta metodología era su rapidez y soluciones de buena calidad. Pero, la desventaja era que no garantizaba una solución óptima pudiéndose encontrar soluciones alejadas del óptimo global, debido a que no había forma de saber que tan lejos se encontraba la solución encontrada con la solución óptima.

#### **2.2.2.1.4 Algoritmo de Mínimo Corte Carga (MCC)**

En esta metodología [4], la topología inicial llamada topología base y en cada paso también se añade de un circuito a la topología inicial, de la misma forma como en algoritmo de mínimo esfuerzo, pero utiliza un indicador de sensibilidad diferente. Este algoritmo, en cada iteración decide añadir un circuito a la topología base hasta que el sistema opere sin corte de carga. Es decir, en cada paso se resuelve el sistema (3).

En cada iteración del algoritmo de MCC se añade un circuito el cual es seleccionado de acuerdo a un índice de desempeño o índice de sensibilidad. Su solución se obtiene en dos etapas, como sigue:

##### 1era etapa, adición de circuitos

1. Se define la topología inicial o configuración base del SEP y los circuitos candidatos a ser adicionados.
2. Se calcula el corte de carga para la topología inicial usando un algoritmo de PL, en el caso de no existir corte de carga se pasara a la 2da etapa; en caso contrario se calcula el índice de sensibilidad previamente establecido y se elabora una lista ordenada de los circuitos de acuerdo valor del índice de sensibilidad.
3. Se añade el primer circuito de la lista ordenada por sensibilidad a la configuración actual, obteniendo una nueva topología. Luego, se regresa al paso 2.

##### 2da etapa, retiro de circuitos

En esta etapa, se intentan retirar los circuitos adicionados. Para esto, primero se elabora una lista por costo de los circuitos adicionados. Y se intenta retirar cada circuito de uno en uno, verificando que su retiro no produzca sobrecarga. Al retirar un circuito, se debe generar nuevamente la lista hasta que no sea posible retirar ningún circuito adicionado.

#### **2.2.2.2 Métodos de Optimización Clásica**

El objetivo es hallar la solución óptima del problema de planeamiento de la transmisión utilizando el modelo DC. Es decir, resolver la formulación dada en (2). Esto significó

resolver el problema no lineal entero mixto (PNLEM). Así, en los años 80, se dió inicio a una nueva etapa de investigación con el propósito de resolver la formulación dada en (2) de forma óptima. La metodología más utilizada fue la técnica de descomposición de Benders [8,9], el cual para su análisis descompone al problema de planeamiento subdividiéndolo en dos partes:

- .-**Subproblema de inversión** donde se elige el plan de expansión candidato calculando su costo de inversión asociados al mismo.

- .-**Subproblema de operación** adonde el plan de expansión candidato es probado en términos de atender la demanda en forma adecuada, es decir sin sobrecargas.

El óptimo global se obtiene en forma iterativa de las soluciones separadas de los subproblemas de operación e inversión.

En [6] se describe y detalla el uso de un esquema de descomposición por jerarquía compuesto de tres etapas: *la primera etapa* resuelve el problema de planeamiento de la transmisión usando descomposición de Benders [8,9], en esta etapa el subproblema de operación se resuelve utilizando el modelo de transportes [3,18,19]. En la *segunda etapa* la red es modelada usando un modelo híbrido [r,s]. Y en la *etapa final* se utiliza el modelo DC [16,17] resolviendo el subproblema de operación usando un algoritmo de programación lineal y el subproblema de inversión es solucionado usando un algoritmo de enumeración implícita [15].

Así, aplicando metodologías de descomposición se hallaron soluciones óptimas globales para sistemas de tamaño pequeño y mediano, como por ejemplo, para los casos de estudio como el sistema Garver de 6 barras. Pero, para sistemas de mayor complejidad, con más número de alternativas candidatas, la metodología de descomposición no converge justamente por el elevado número de alternativas.

Ante esto, se iniciaron nuevos estudios e investigaciones inclinadas a los métodos de optimización combinatoria, cuya objetivo fundamental era la de resolver problemas para sistemas de alta complejidad, de gran tamaño y poder obtener soluciones muy próximas al óptimo global.

### 2.2.2.3 Métodos de Optimización Combinatoria

En estos métodos, se asume que la calidad de una solución puede ser cuantificada y que pueden ser comparadas entre una solución y otra; además, se considera que el conjunto de soluciones es finito. Así, resolver un problema de optimización combinatoria consiste en determinar la “mejor” o la solución “óptima” entre un gran número de alternativas que también son soluciones.

La solución óptima de un PNLEM no se puede obtener en tiempo de cómputo razonable. Pero, se pueden resolver con algoritmos adecuados, considerando dos opciones: primero que permita obtener el óptimo global con la desventaja de requerir tiempos de cómputo impracticables, y la otra que permita obtener soluciones subóptimas en tiempos de computos razonables. La primera opción, da origen a los algoritmos de optimización, como los métodos de enumeración usando planos de corte (“branch and bound”). La segunda opción, son llamados algoritmos heurísticos, entre las cuales tenemos los *algoritmos de búsqueda local y algoritmos aleatorios*.

También, se distinguen los *algoritmos generales y algoritmos especializados*.

Algoritmos tales como: simulated annealing [11,13], genéticos [9,10,11] y búsqueda tabú [11,12] son algoritmos generales que nos dan soluciones de muy buena calidad, a pesar de que al implementarlas se comportan como algoritmos de aproximación.

El algoritmo de “*simulated annealing*” se fundamenta básicamente en conceptos descritos en mecánica estadística. El *algoritmo genético* es una técnica de búsqueda basada en la evolución y selección natural de los seres vivos. El algoritmo de *búsqueda tabú*, se basa en las reglas generadas usando inteligencia artificial; aquí, se cuenta con un esquema de búsqueda local y luego se explora el espacio de posibles soluciones.

En este trabajo, para el proceso de optimización se utilizan los algoritmos genéticos para la búsqueda de la alternativa de solución del problema del planeamiento estático del sistema de transmisión.



## Capítulo III

### Sistemas Flexibles de Transmisión de Corriente Alterna (FACTS)

#### 3.1 Generalidades

Los FACTS, son equipos basados en dispositivos de electrónica de potencia y equipos estáticos instalados en el lado de alta tensión de los sistemas eléctricos de potencia (SEP), esta incorporación de equipos, es básicamente con la idea de hacer los sistemas electrónicamente controlables. Los FACTS aparecieron por los años 80 en el EPRI y su desarrollo conceptual fue dado por Hingorani y Gyugyi [20]. La utilidad de estos equipos radica en que con su instalación podemos variar las cantidades eléctricas, por ejemplo la magnitud tensión en barras, flujo de potencia en las líneas, Etc.

En la década de los 70, estos dispositivos fueron usados basando su construcción en tiristores convencionales. Las primeras versiones se instalaron en enlaces HVDC. La compensación reactiva en paralelo usando reactores y capacitores controlados electrónicamente se dio también en esos años [21]. Posteriormente, se desarrolló los Capacitores Series Controlados por Tiristores (TCSC), cuyo objetivo principal era “mejorar” la longitud eléctrica de las líneas, disminuyendo su impedancia ficticia y en consecuencia logrando poder transmitir mayor flujo de potencia en la línea en que se instala [25].

Luego se desarrollaron los controladores modernos cuya construcción se basa en convertidores electrónicos siendo estos capaces de generar o absorber potencia reactiva sin la necesidad de elementos de almacenamiento de reactivos.

Los dispositivos semiconductores usados últimamente son los denominados de control completo, como el GTO<sup>1</sup> y el IGBT<sup>2</sup>.

El GTO utiliza el tiristor convencional con una característica de encendido rápido, con este se puede lograr controlar los flujos del orden de los megawatts.

El IGBT es un equipo de la familia de los transistores. Su uso en sistemas de potencia se debe a que nos permite controlar altos niveles de energía.

<sup>1</sup> Tiristores de Apagado por Compuerta (*Gate Turn-Off Thyristor*)

<sup>2</sup> Transistores Bipolares de Compuerta Aislada (*Insulated Gate Bipolar Transistor*)

### 3.2 Principios de operación de los equipos FACTS

Los dispositivos FACTS, constan de una nueva tecnología aplicada a los sistemas de transmisión. Su desarrollo esta basado en una combinación de equipos (transformadores y condensadores), elementos de electrónica de potencia, microelectrónica y equipos de telecomunicaciones, con los cuales se posibilita una operación preestablecida, coordinada y flexible de los equipos instalados en el sistema eléctrico de potencia [22].

Las siguientes definiciones provienen de la IEEE [22]:

**Flexibilidad de la Transmisión de la Potencia Eléctrica:** habilidad de acomodarse a cambios en el sistema de transmisión eléctrica o en las condiciones de operación, tal que se mantengan márgenes suficientes de estabilidad estacionaria y transitoria.

**Sistemas de Transmisión Flexible en Corriente Alterna:** basados en electrónica de potencia y en otros controladores estáticos para así aumentar la confiabilidad e incrementar la capacidad de transferencia de potencia. A estos dispositivos se les denomina Controladores FACTS.

Los equipos FACTS, se fundamentan en el control que se puede ejercer sobre los parámetros que afectan los flujos de potencia en las líneas. La Figura 3.1, muestra la potencia activa que se transmite por una línea entre dos sistemas, la cual esta definida por las tensiones en barras en cada extremo de la línea ( $U_1$  y  $U_2$ ), la reactancia de línea ( $X_{12}$ ) y la diferencia angular entre ambas barras ( $\delta_1 - \delta_2$ ).

Dependiendo del tipo de dispositivo FACTS, se podrá variar o controlar uno, algunos o estos tres parámetros (tensión, reactancia o ángulo de tensión).

En [22], se describe y detalla las diferentes posibilidades que se puede lograr en el control de flujo que disponen los equipos FACTS. Podemos resumir lo siguiente:

- El control y variación de tensión lo podemos lograr con los equipos SVC y STATCOM (por ejemplo en  $U_1$ ), con estos equipos logramos un mecanismo de control reactivo. Cabe indicar que en bajas proporciones no afecta la diferencia de fase entre barras.

- La variación de la diferencia de fase entre barras, lo podemos lograr con los equipos PAR y los transformadores TCPST, con estos equipos se afecta el flujo de potencia activa transmitida por la línea, considerando que en bajas proporciones no se afectara a las magnitudes de las tensiones en barras.

- La variación de la reactancia de línea, lo podemos lograr con los TCSC, permitiéndonos controlar los flujos de potencia activa cuando se realizada en pequeñas proporciones y tener un control completo cuando se realiza en mayor escala.

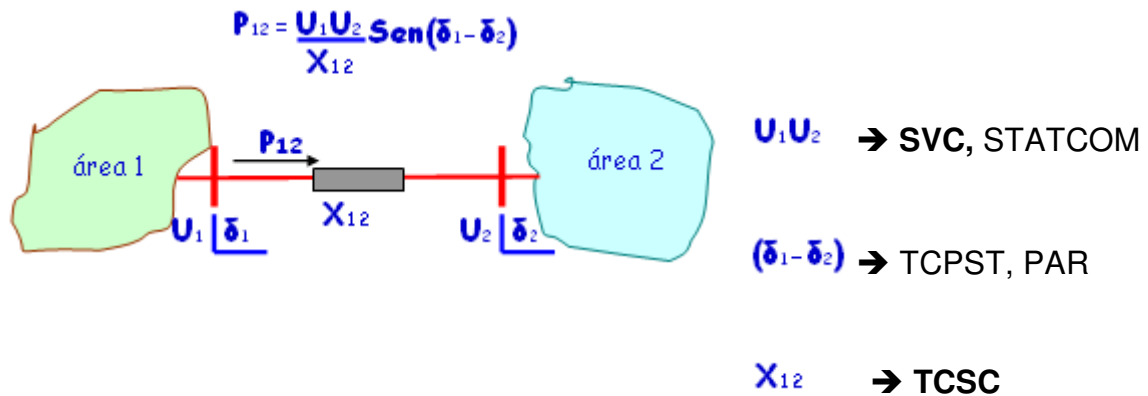


Figura 3.1 Controladores FACTS en la Transmisión de Potencia

De esta manera, también podríamos combinar un controlador serie y uno paralelo y tener un control de la impedancia de línea  $Z$  mediante el *controlador serie*, y simultáneamente controlar la tensión en barras con el *controlador paralelo*. En consecuencia, podemos proveer para el sistema un control tanto para la potencia activa como para la reactiva. Es decir, podemos tener un control global tanto en la línea como en la barra.

### 3.3 Clasificación de los equipos FACTS

Podemos clasificarlas en función de la conexión de los dispositivos [20], como sigue:

**3.3.1 Controlador serie** (Figura 3.2 (a)).- Este puede estar conformado por una impedancia variable un reactor, un capacitor, una combinación de ambas, o una fuente variable basada en electrónica de potencia. Su principio de operación se basa en inyectar un voltaje en serie con la línea. Una impedancia variable multiplicada por la corriente que pasa por ella representa una tensión en serie inyectado a la línea. Cuando la tensión esta en cuadratura con la corriente de línea, entonces el controlador serie sólo aporta o consume potencia reactiva; en otro valor de ángulo de fase representara el control de la potencia activa.

**3.3.2 Controlador en derivación** (Figura 3.2 (b)).- Este puede estar conformado de una impedancia variable. Su principio de operación se basa en poder inyectar corriente al sistema en el punto de conexión del dispositivo en derivación. Si conectamos una impedancia variable a la tensión de la línea logramos un flujo de corriente variable y nos representa una inyección de corriente a la línea. Cuando la corriente inyectada esté en cuadratura con la tensión de línea, el controlador en paralelo sólo aporta o consume potencia reactiva; en otro valor de ángulo de fase nos representa el manejo de potencia activa.

**3.3.3 Controlador serie-serie** (Figura 3.2 (c)).- Este puede ser una combinación de controladores serie coordinados en un sistema de transmisión multilínea.

**3.3.4 Controlador serie-derivación** (Figura 3.2 (d)).- Este puede ser una combinación de controladores en derivación y serie, controlados de manera coordinada.

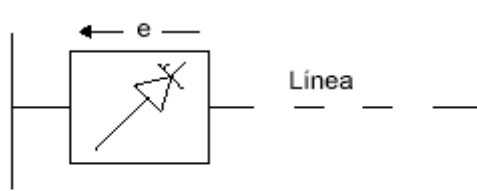


Figura 3.2 (a) Controlador serie

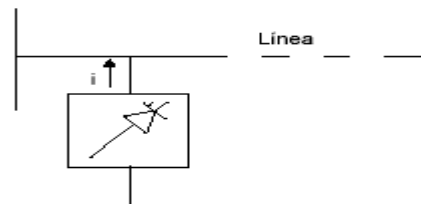


Figura 3.2 (b) Controlador en derivación

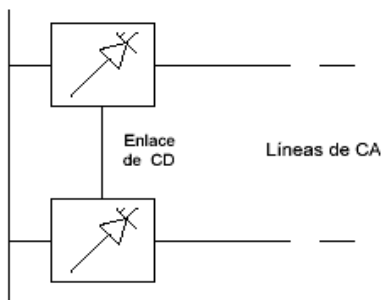


Figura 3.2 (c) Controlador serie-serie

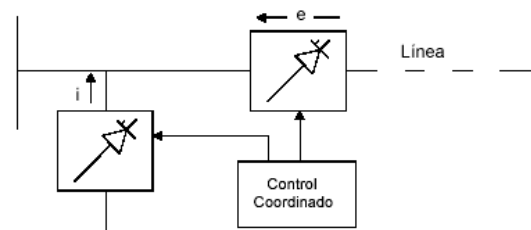


Figura 3.2(d) Controlador coordinado serie-paralelo

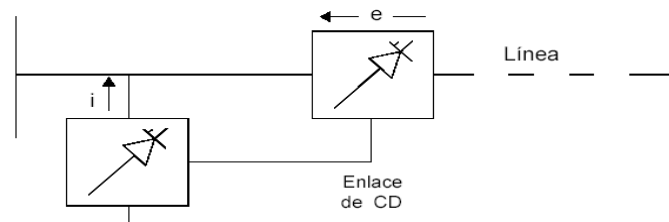


Figura 3.2 (e) Controlador unificado serie-paralelo

Figura 3.2 Clasificación de los FACTS según su conexión

**3.4 El SVC**

Este es un equipo conectado en paralelo a una barra, mediante el cual se logra absorber en forma controlada corriente capacitiva y/o corriente inductiva del sistema, de esta manera se entrega o se absorbe potencia reactiva (Figura 3.3). El Compensador Estático Regulable, nos brinda lo posibilidad de una compensación reactiva mediante un banco de capacitores y un reactor, los cuales se encuentran conectados a la barra a través de un sistema de control.

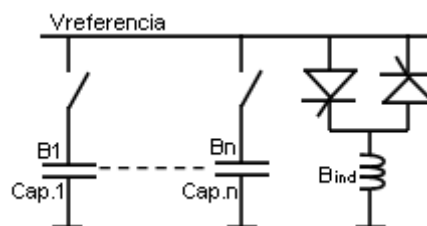


Figura 3.3 Representación de un equipo SVC

### 3.5 EL TCSC

Este es un equipo conectado en serie con la línea de transmisión, mediante el cual podemos tener el control del flujo de potencia en la línea a la cual esta conectada. Su fundamento de operación esta basado en la modificación de la impedancia de la línea al insertar capacitores o inductancias en serie con la línea logrando variar su reactancia y en consecuencia el flujo de potencia (Figura 3.4). Además, mejora la estabilidad transitoria del sistema y el amortiguamiento de las oscilaciones electromecánicas, mostrando su efectividad en la reducción de las corrientes de falla. Una compensación serie convencional consta de bancos de capacitores que son controlados en forma individual por elementos mecánicos [25,26]. El TCSC básico, podemos considerarlo como un SVC conectado en serie con la línea de transmisión.

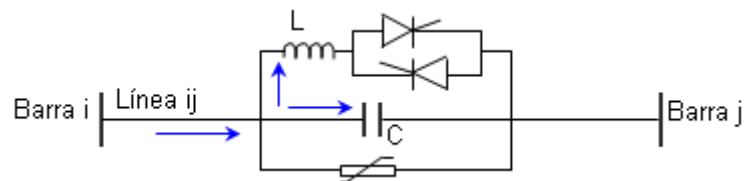


Figura 3.4 Representación de un equipo TCSC

#### 3.5.1 Parámetros y modos de operación del TCSC

Los parámetros de este tipo de dispositivo son: su inductancia (L), su capacitancia (C) y su ángulo de disparo ( $\alpha$ ) ó ángulo de conducción ( $\delta$ ), los cuales se relacionan de la siguiente manera [27]  $\delta = 2(\pi - \alpha)$ :

El TCSC de acuerdo al ángulo de conducción, tiene los siguientes modos de operación:

Modo tiristor pasa todo, tiristor bloqueado, capacitivo e inductivo [27] (Figura 3.5).

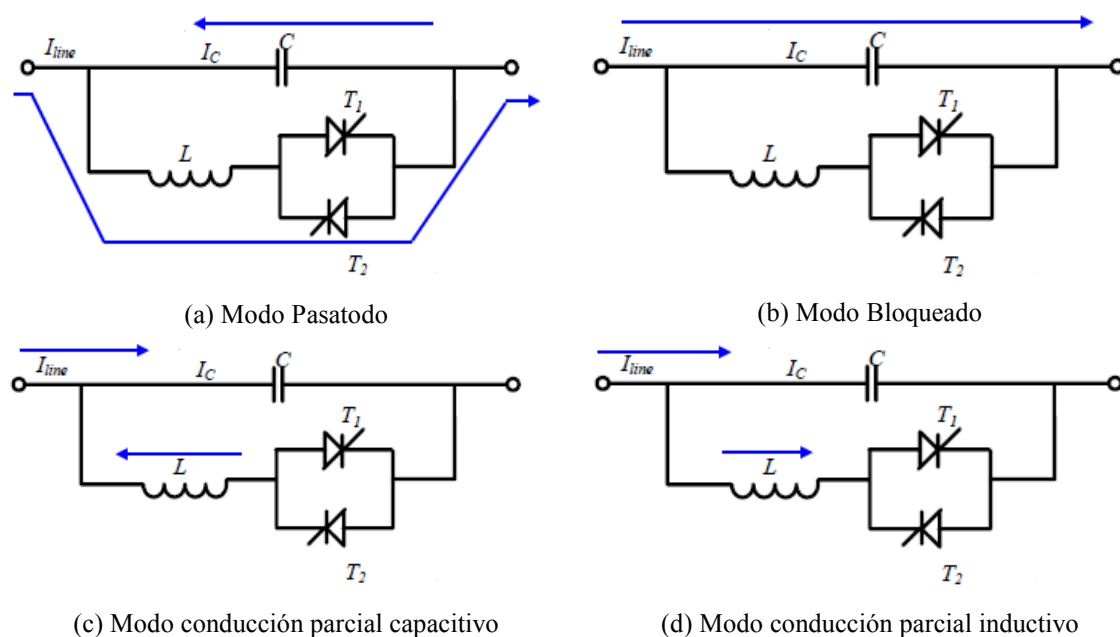


Figura 3.5 Modos de operación del TCSC

**-Modo tiristor pasa todo (a)**, la corriente es inductiva debido a que la impedancia del inductor es menor al del capacitor. En esta condición, los tiristores conducen con un ángulo de conducción de  $180^\circ$  y a través de los tiristores resulta una corriente senoidal. En esta forma de operación, el TCSC resulta un capacitor en paralelo con un inductor.

**-Modo tiristor bloqueado (b)**, la reactancia total es capacitiva, debido a que los pulso de disparo en el tiristor se encuentran bloqueados.

**-Modo conducción parcial capacitivo (c)**, en este caso, el ángulo de conducción es la encargada de controlar la reactancia capacitiva o inductiva que determina el comportamiento del TCSC. En la operación de modo capacitivo, los tiristores disparan cuando la tensión y corriente del capacitor tienen polaridad opuesta. Para evitar resonancia el ángulo de disparo ( $\alpha$ ) debe de estar en el rango  $\alpha_{\min} \leq \alpha \leq 180^\circ$ .

**-Modo conducción parcial inductivo (d)**, en este caso, el TCSC opera con conducción alta en los tiristores. El control presenta una impedancia inductiva.

### 3.5.2 Consideraciones par el cálculo de Parámetros del TCSC

Para el cálculo de los parámetros del TCSC debemos tener presente lo siguiente [25,27]:

-La reactancia capacitiva ( $X_C$ ) del TCSC es constante;

-La reactancia inductiva ( $X_L$ ) del TCSC es variable y depende del ángulo ( $\alpha$ );

-En consecuencia, en estado estacionario podemos considerar la impedancia del TCSC como un capacitor fijo, en paralelo con una reactancia variable. Por lo tanto, estarían relacionadas por la siguiente expresión:

$$X_{TCSC} = \frac{X_L * X_C}{X_C - X_L} \quad (3.1)$$

Pero,  $X_L = X_{L(\alpha)}$  [14] y esta dado por la siguiente expresión:

$$X_{L(\alpha)} = \frac{w * L * \pi}{\pi - 2 * \alpha - \text{Sen} \alpha} \quad (3.2)$$

Donde

$$wL \leq X_{L(\alpha)} \leq \infty$$

Por lo tanto:

$$X_{TCSC} = \frac{X_{L(\alpha)} * X_C}{X_C - X_{L(\alpha)}} \quad (3.3)$$

De la ecuación (3.3), podemos notar que para algún ángulo de disparo, la reactancia inductiva variable puede igualar a la reactancia capacitiva y esto originaría el efecto de resonancia. Esto quiere decir que el TCSC debe tener límites en sus dos rangos de operación, que es lo mismo decir en su ángulo de disparo. Esto es, en su rango inductivo

$0 \leq \alpha \leq \alpha_{\text{mín}}$ , y en el rango capacitivo  $\alpha_{\text{mín}} \leq \alpha \leq \pi$ . La Figura 3.6, ilustra las reactancias de un TCSC para la frecuencia fundamental con respecto al ángulo de disparo.

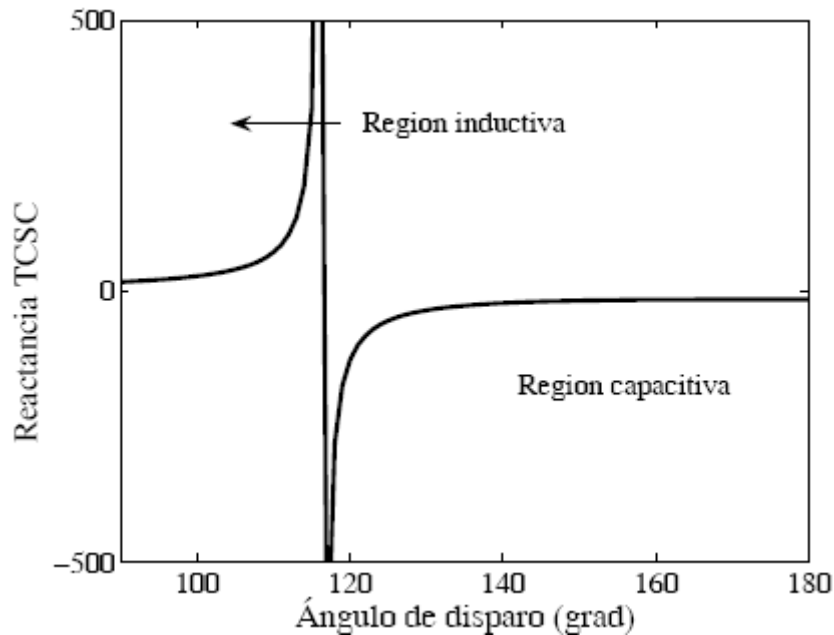


Figura 3.6 Reactancia a frecuencia fundamental de un TCSC

### 3.6 Ubicación óptima de los equipos FACTS

Cuando se decide la opción de instalar un equipo FACTS en un SEP, debemos tener en cuenta tres factores importantes:

- Qué tipo de dispositivo debemos de utilizar, esto dependerá de nuestro objetivo
- La capacidad que se requiere,
- La ubicación del dispositivo en el SEP que optimice el funcionamiento.

El último de estos tres factores, es el de más importancia, pues la ubicación de estos dispositivos en el sistema va depender de lo que se busca, del efecto deseado y también de las características del sistema. Por ejemplo: si se desea evitar el flujo en anillo, la idea sería ubicar el dispositivo en una de las líneas de transmisión que llegan a este anillo y luego buscar forzar el flujo en la manera deseada; también, si se deseara mejorar la operación económica del sistema al incrementar la capacidad de transmisión de potencia (mejorar la cargabilidad del sistema), el dispositivo FACTS se puede ubicar en una línea larga, que por su propia impedancia este subutilizada y al reducir su reactancia ficticia podemos aumentar el flujo a través de ella [28,30].

Definitivamente, la ubicación óptima de un dispositivo FACTS es factor clave, pero esto puede diferir de las perspectivas que se tengan, ya sea como propietario de una empresa transmisora o desde el punto de vista de la confiabilidad del sistema global al cual se interconecta.

Existen diversas técnicas para encontrar la ubicación óptima de dispositivos FACTS, como se dijo, estas técnicas dependen de los objetivos que se persiguen, ya sea en estado estacionario o dinámico, económico, o combinación de estas.

### 3.6.1 Técnicas de sensibilidad

Las técnicas de sensibilidad nos dan la idea de los lugares que son mas convenientes para la instalación de un dispositivo en el SEP. Luego, con esta idea es necesario encontrar el lugar y dimensión exacta del dispositivo en el sistema y eso se puede lograr por medio de un proceso de optimización, o por medio pruebas de ensayo y error donde se va verificando el estado de la red al instalar este nuevo dispositivo.

En [23], Orfanogianni, detalla una metodología descomponiendo un problema en dos subproblemas. En esta metodología, los subproblemas son linealizados usando el Lagrangiano y el método del gradiente reducido. Así, la sensibilidad para encontrar los lugares factibles de ubicación de dispositivos FACTS se halla por medio de Lagrange, como sigue:

$$\begin{aligned}
 & F(x) \\
 \text{Sujeto a:} & \\
 & g(x) = 0 \\
 & l \leq x \leq u
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

Donde:

$F(x)$ : es una función que se pretende maximizar o minimizar, dependiendo el caso  $F(x)$  puede representar costos de instalación, nivel de pérdidas (minimizar) o capacidad de transferencia (maximizar);

$X$ : nos representa todas las variables de estado y de control del sistema;

$g(x)$ : representa el conjunto de restricciones. Estas son ecuaciones de modelamiento de los componentes del sistema: ecuaciones de Kirchoff (ecuaciones de flujo de potencia);

$l, u$ : representan los valores límites, inferior y superior que pueden tomar las variables de estado y de control en el proceso de optimización (límites de flujo en líneas, límites de tensiones, posiciones de tap's, etc).



Luego de separar el problema en dos sub-problemas. El primero corresponde a la función  $F(x)$  y el segundo a las restricciones.

Así, si lo que queremos es instalar un TCSC en una línea, siendo  $X_{i-tcsc}$  la reactancia del TCSC, que se instalara en serie en la línea  $i$ .

Aplicando el multiplicador de Lagrange, nos permite efectuar el análisis de sensibilidad, como sigue:

$$\mu_i = \frac{\partial F_{obj}}{\partial X_{i-tcsc}} \quad (3.5)$$

En este caso, el parámetro de control de un TCSC es su reactancia. Por lo tanto, si se desea incrementar la potencia transferible hacia un nodo  $k$ , el coeficiente de sensibilidad de la potencia  $P_k$  respecto al parámetro de control del dispositivo (TCSC), será:

$$\mu_i = \frac{\partial P_k}{\partial X_{i-tcsc}} \quad (3.6)$$

Esta expresión nos indica cómo afecta a la función objetivo el cambio en la reactancia de la línea (cuando insertamos un TCSC en la línea  $i$ ), el valor  $\mu_i$  se puede interpretar de las siguientes formas:

- Si  $\mu_i$  es positivo, nos indica que con un incremento capacitivo serie en la línea  $i$ , logramos aumentar o maximizar la función objetivo. Esto se interpreta físicamente como que el flujo de potencia a través de la  $i$ -ésima línea se ve incrementado directamente.
- Si  $\mu_i$  es negativo, nos indica que un incremento inductivo serie en la línea  $i$ , contribuirá a maximizar la función objetivo. En este caso, la interpretación física es que al aumentar la impedancia de la línea la potencia se ve forzada a fluir por otras líneas.

$\mu_i$ , nos indica cuánto varía la función objetivo cuando varía el  $X_{i-tcsc}$ . Pero, como la reactancia del capacitor serie ( $X_{tcsc}$ ) depende de las características de la línea. Para integrar las características asociadas con las líneas a los coeficientes de sensibilidad, se define el siguiente vector:

$$\bar{u}_i = \mu_i \cdot X_{i-Línea} \quad (3.7)$$

donde  $X_{i-Línea}$  es la reactancia de la  $i$ -ésima línea.

Nota: Con la finalidad de detallar su interpretación, en la Figura 3.7, se ilustra la sensibilidad de diferentes líneas de un SEP:

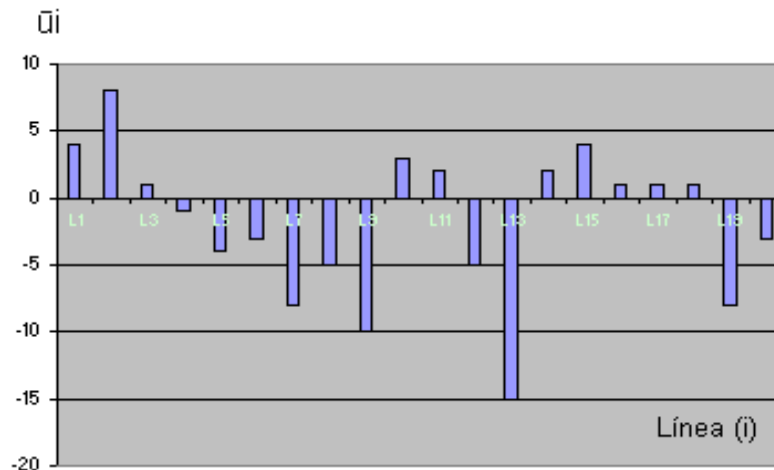


Figura 3.7 Sensibilidad de líneas

Podemos decir que:

- La línea L-13 es la más sensible si se inserta una reactancia inductiva
- La línea L-2 es la más sensible insertando una reactancia capacitiva
- Las líneas L1, L2 y L15 tienen el mayor efecto sobre la función objetivo, si el TCSC que se ubique opera en la región capacitiva. Si el TCSC opera en la región inductiva, su localización en las líneas L7, L9 y L13 tendrá mayor efecto sobre la función objetivo.

Yunqiang en [24,25], explica otra metodología basada en sensibilidad para la ubicación de FACTS, utilizando un índice el cual lo denominó Sensibilidad de Contingencia Sencilla (SCS), el cual es calculado para cada línea. En esta metodología, el objetivo es hallar la mejor ubicación de un TCSC para aliviar sobrecargas en condiciones de contingencias.

La metodología se resume:

$W_{(m \times n)}$ , representa una matriz normalizada de las sobrecargas de flujos en líneas.

$W_{(i,j)}$ , representa la sobrecarga de flujo con respecto al caso base a través de la rama  $j$  durante la contingencia  $i$ , y se calcula por:

$$W_{ij} = \frac{P_{ij, \text{contingencia}}}{P_{0j, \text{caso base}}} - 1 \quad (3.8)$$

$P_{ij, \text{contingencia}}$ , es el flujo por la rama  $j$  durante la contingencia  $i$ .

$P_{0j, \text{caso base}}$ , es el flujo por la rama  $j$  durante el caso base

$-U_{(m \times n)}$ , es una matriz de participación binaria cuyas entradas para un elemento  $U_{(i,j)}$  será 0 ó 1 dependiendo si la rama  $j$  presenta o no sobrecarga de potencia durante la contingencia  $i$ . Para las líneas que no pertenecen enlaces de análisis  $U_{(i,j)}=0$  y se les denomina cantidades irrelevantes de la línea  $j$  con respecto a la contingencia  $i$ .

- $P$ , representa a un vector de probabilidades de ocurrencia fallas en línea, la cual se forma con información histórica de las fallas ocurridas en una línea determinada y en un período de tiempo preestablecido.

$$P_{m \times 1} = [p_1 \ p_2 \ \dots \ p_m]^T \quad (3.9)$$

$p_i$ , es la probabilidad de ocurrencia de la falla  $i$ .

Entonces, se define el índice  $SCS = S_j$  para la línea  $j$ , como la suma de sensibilidades de la línea  $j$  para todas las contingencias consideradas, así:

$$S_j = \sum_{i=1}^M p_i u_i w_{ij} \quad (3.10)$$

Para casos de planificación de la red, el índice se pondera con factores dependiendo de los diferentes escenarios estacionales, escenarios generación-demanda. Así, la expresión anterior será:

$$S_j = \sum_{n=1}^K a_n S_{j,n} \quad (3.11)$$

donde:

- $a_n$ , es el factor de peso para un escenario generación-demanda considerado;
  - $S_{j,n}$ , es el valor del índice SCS respecto al escenario generación-demanda  $n$  calculado mediante la expresión (3.10);
  - $k$ , es el número de escenarios típicos generación-demanda.
- Así, el índice SCS se halla por medio de la expresión (3.11) y la rama con mayor SCS será considerada como la de mejor ubicación para un TCSC.

Existen otras técnicas basadas en sensibilidad, entre unas y otras se diferencian en el objetivo que se persiguen y en la propia metodología para hallar las mejores ubicaciones físicas en el SEP. Podemos resumir algunas como sigue:

Rajarman en [28], explica una metodología para encontrar posibles ubicaciones de los TCSC con la finalidad de aumentar la Capacidad de Transmisión Disponible (ATC). Esta metodología encuentra cuales son las líneas más sensibles a compensar para aumentar el ATC y da un porcentaje aproximado del aumento del ATC para un valor de reactancia dada. Su desventaja esta en que, el valor exacto del aumento del ATC debe de ser calculado en forma analítica. Entonces, existe una desviación en el valor real del aumento del ATC para cada una de las líneas.

Singh en [29], propone la ubicación óptima con la función objetivo de reducción de costos de energía y minimizando los costos de instalación. Para esta metodología, se requiere las contar con funciones analíticas de precios de ofertas.

Verma en [30], detalla una metodología para hallar las mejores ubicaciones de TCSC y TCPAR con la finalidad de aumentar la capacidad total de transmisión. Estas ubicaciones las determina por medio de un índice de severidad de sobrecarga en contingencia. Este índice, utiliza información de acuerdo a la importancia de la línea, lo cual es un concepto subjetivo y podría variar ampliamente los resultados.

### 3.6.2 Técnicas Heurísticas

En [31,32], Gerbex, explica una metodología para ubicar en forma óptima dispositivos FACTS, plantea como un problema de análisis combinatorio y además de ubicar óptimamente los FACTS, optimiza sus parámetros para alcanzar un determinado estado de operación del sistema. En [31], explica las características de convergencia de tres métodos heurísticos, Templado Simulado, Búsqueda Tabú y Algoritmos Genéticos. Gerbex concluye que los algoritmos genéticos y búsqueda tabú, presentan las mejores características de convergencia. En [32], explica la ubicación de diferentes tipos de FACTS utilizando los algoritmos genéticos como método de optimización.

#### 3.6.2.1 Algoritmos Genéticos (AGs)

Los AGs, es una técnica de optimización basada en la teoría de la evolución de Darwin. Gervex en [32], detalla la ubicación óptima de FACTS como un problema de análisis combinatorio, el cual puede ser resuelto por técnicas heurísticas. Pero, esta propuesta puede ser desarrollada con AGs, el criterio de optimización es maximizar la cargabilidad del sistema, considerando restricciones de multicriterio, es decir:

- Límite de flujo de carga en las líneas
- Límites de tensiones en las barras

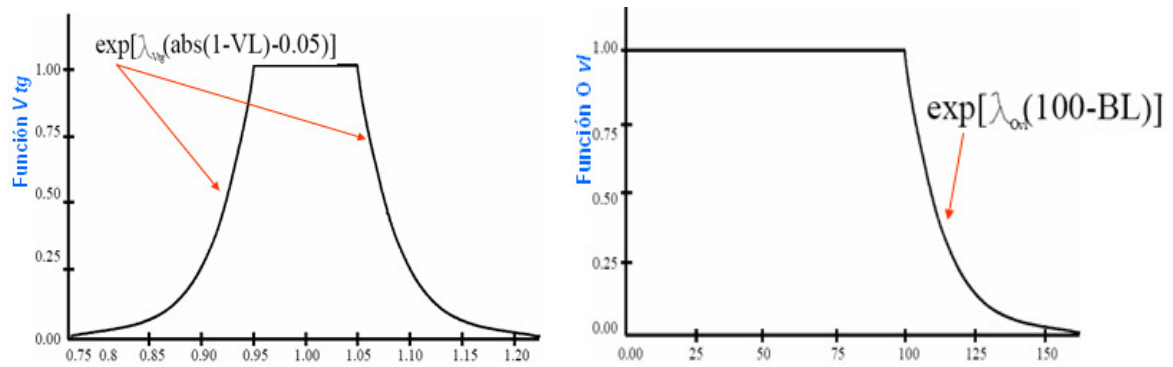
La función objetivo es de la forma:

$$F = \sum_{i=1}^{N_{barras}} W_i \left( V_i - V_{refi} \right)^n + \sum_{j=1}^{N_{líneas}} W_j \left( \frac{S_j}{S_{max-j}} \right)^n \quad (3.12)$$

Donde:

$V_i$  y  $V_{refi}$ , son valores de tensiones actual y nominal de la barra  $i$ , respectivamente;  $S_j$ , es la potencia aparente actual y  $S_{max-j}$  es la potencia aparente máxima de la línea.  $W_i$  y  $W_j$  son factores de ponderación, su valor sirve para dar mas o menos importancia a ciertas barras o líneas; “n” es un exponente igual a 4 que el autor usa para enfatizar más las variaciones de tensión o la sobrecarga en las líneas.

En [32], la función objetivo es como se indica en (3.12), con términos aproximados por funciones exponenciales, como se muestra en la Figura 3.8 y en la ecuación (3.13)



(a) Función Objetivo, tensión en barras

(b) Función objetivo, carga en líneas

Figura 3.8 Representación gráfica de la función objetivo

$$F = \prod_{\text{Barra}} V_{tg\text{barra}} * \prod_{\text{línea}} O_{vlínea} \quad (3.13)$$

Donde:

- $O_{vlínea}$ , representa el nivel de carga en cada línea y  $V_{tg\text{barra}}$  representa el nivel de tensión en cada barra.

- $\lambda_{BL}$ ,  $\lambda_{VL}$ , son coeficientes de decrecimiento de las curvas exponenciales.

-Para encontrar la solución óptima, en el proceso se castiga con un factor a las configuraciones que violen los límites establecidos y se premia a las que no violen.

-Las tensiones dentro de los establecidos, aceptables de operación por ejemplo ( $0.95\text{pu} \leq V_{tg\text{barra}} \leq 1.05\text{pu}$ ), proporcionan un factor igual a la unidad (Figura 3.8(a)). Valores fuera de rango se penalizan de manera automática de acuerdo a la curva exponencial.

-Si el flujo de potencia aparente en una línea está dentro de sus límites, se premia con un valor de la unidad (Figura 3.8 (b)), si la línea esta en condiciones de sobrecarga, se penaliza con un valor menor a la unidad de acuerdo a la exponencial.

Por medio de operadores genéticos se van evaluando posibles ubicaciones de los TCSC. La solución óptima es cuando la función de aptitud es igual a la unidad o cuando se ha estabilizado su valor, es decir, el valor de la función objetivo no cambia en cada iteración.

En [32] un elemento típico es representado de la siguiente manera:

0,2	0,1	1	0,3	0,2
3	2	4	2	1
5	7	4	6	2

→ Valor  
 → Tipo (FACTS)  
 → Localización (Nº de línea o barra)

La intención es ubicar 5 dispositivos FACTS de cuatro diferentes tipos en un sistema.

El tercer reglón corresponde al número de línea o barra donde se ubica el FACTS. El segundo reglón corresponde al tipo de FACTS. Y, el primer reglón hace referencia al

valor con el que el FACTS será insertado en el sistema. Este valor es relativo y representa el porcentaje que tendrá el parámetro controlable del dispositivo. El número de equipos es fijo. Esto representa una desventaja en los resultados, pues la configuración resultante cuando se ubica por ejemplo 5 dispositivos será diferente que si se ubica 4 ó 3 dispositivos.

Feng en [33], utiliza los AGs como técnica de optimización para hallar la ubicación y los valores de reactancia de dispositivos TCSC, su función objetivo es maximizar la Capacidad Total de Transferencia (TTC). La TTC es considerada como la máxima potencia que un vendedor puede transferir por medio de la red a un consumidor, sujeto a restricciones operativas tales como límites térmicos o de tensión. La TTC es obtenida por medio de un programa llamado Continuación de Flujo de Potencia (CPF) el cual se basa en métodos de prolongación a partir de un caso base. La TTC es un concepto utilizado por la Comisión Federal de Regulación de Energía (FERC) de los Estados Unidos de America y es una medida de capacidad de transferencia de la red para futuras actividades comerciales.

En esta metodología, también por medio de operadores genéticos se van iterando posibles ubicaciones y valores del TCSC. Para cada alternativa o individuo se evalúa al sistema el TTC. La función de aptitud es el mismo TTC. Se alcanza el óptimo cuando finaliza el número de generaciones y se ha estabilizado el valor de la función objetivo.

Este tipo de formulación de finalización de un proceso de optimización, donde se concluye con el número de generaciones establecidas, presenta el inconveniente que para un proceso real, pueda que no sea una solución óptima. Ya que la estabilización en el valor de la función de desempeño puede deberse no a que no se encuentren mejores individuos, sino que los parámetros del AG pueden estar mal seleccionados. Por ejemplo, cuando se utiliza el criterio muy rígido para penalizar el desempeño, esto no permite la evolución.

### **3.6.2.2 Relajación del Lagrangiano**

En esta metodología, la idea es relajar las restricciones del problema a optimizar, por medio del uso de multiplicadores de Lagrange. El problema relajado es descompuesto en un número de subproblemas. El método de búsqueda es un algoritmo iterativo que resuelve los subproblemas relajados y actualiza los multiplicadores de Lagrange de acuerdo a la extensión de las restricciones violadas. Para la ubicación de FACTS, en [23] hace uso de esta técnica.

### **3.6.2.3 Búsqueda Tabú**

Es una metodología de mejoramiento iterativo, el cual se inicia desde un punto factible de solución y se intenta determinar un subconjunto de fronteras de las cuales se seleccionará la próxima alternativa solución [34]. Los subconjuntos son clasificados y tabulados. Este método es determinístico y al no ser un método aleatorio de búsqueda, puede estar restringido el espacio de la solución. En [35], Mori usa esta técnica para determinar la óptima ubicación de FACTS en un SEP.

## Capítulo IV

### Introducción a los Algoritmos Genéticos

#### 4.1 Generalidades

Para resolver problemas difíciles, las técnicas de optimización heurísticas son una alternativa que surgen para facilitar la solución de problemas complejos. Estas técnicas incluyen métodos evolutivos, templado simulado, búsqueda tabú, etc. Para el caso de sistemas de potencia, debido a su complejidad, estas técnicas han encontrado muchos problemas al momento de aplicarse, motivo por las que se han desarrollado combinaciones entre ellas y combinaciones con técnicas clásicas de optimización.

A pesar que los métodos convencionales que utilizan el conocimiento del problema disminuyen la complejidad en su solución con técnicas heurísticas. Los esfuerzos son aún insuficientes y la solución que se logra no es precisa debido justamente a la complejidad del problema.

Por lo tanto, se requieren de otras técnicas que nos brinden mejores resultados para la solución de problemas de alta complejidad. Los métodos evolutivos son una alternativa a ser usados en la búsqueda de soluciones óptimas con un proceso de búsqueda aleatoria. Los métodos evolutivos se caracterizan por buscar soluciones sin tener conocimiento previo del problema. Y, tienen como ventaja el reducir los inconvenientes que se tenían al usar las técnicas convencionales, debido a que utilizan un espacio de búsqueda generado aleatoriamente.

Paralelamente, la computación evolutiva es un método de optimización que se basa en una población hipotética. Particularmente, un algoritmo genético (AG), es un algoritmo de búsqueda que se basa en la selección natural y la genética [9,10,11]. Estas difieren de otras técnicas en muchos aspectos, por ejemplo:

- El AG, es un algoritmo que busca varios valores óptimos simultáneamente.
- Trabaja con códigos en lugar de hacerlo con los parámetros en si.
- Evalúa una función de desempeño para su búsqueda de solución. Es decir, solo necesita evaluar la función objetivo y no requiere el cálculo de derivadas u otros términos auxiliares.
- Con el AG, se explora todo el espacio de búsqueda donde la probabilidad de tener un buen desempeño es alta.



#### 4.1.1 Resumen de técnicas evolutivas.

En 1957, el inglés George E. P. Box da un planteamiento evolutivo en la optimización de una producción industrial. Box plantea un método que se asemeja al proceso de selección natural. Estas ideas no fueron formuladas en programa de computadora [36].

En 1959, R. M. Friedberg detalla los primeros resultados respecto a técnicas evolutivas formuladas en programa de computadora. Su programa consistía en un conjunto de instrucciones en lenguaje de máquina y en programación automática usando las computadoras [37].

George J. Friedman en [38] desarrolla la aplicación de técnicas evolutivas en el campo de la robótica; y propone evolucionar los circuitos de control, hoy esto se conoce como redes neuronales. Por tal, a Friedman se le considera como el pionero de la robótica evolutiva, en esta área, se intenta aplicar técnicas evolutivas para planeación de movimientos, transporte, producción, etc.

En 1961, Hans Joachim Bremermann, explicó sus primeras simulaciones de la evolución con el uso de codificación binaria, fundamentando la reproducción, selección y mutación, dándose inicio, a los algoritmos genéticos [39].

En 1967, John H. Holland implementó el Algoritmo Genético.

## 4.2 Algoritmos Genéticos (AGs)

### 4.2.1 Definición

“Son procedimientos adaptativos que sirven para buscar soluciones a problemas difíciles o complejos, están inspirados en la evolución biológica, basados en el principio darwiniano, con patrones de operaciones de reproducción y supervivencia de individuos que mejor se adaptan al entorno donde viven” [9,10].

### 4.2.2 Descripción

Los AGs se fundamentan en seguir con similitud a un proceso de la evolución natural, basada su estudio en la herencia genética (transmisión de características específicas de padres a sus hijos) [9,10].

Darwin en 1859 planteo ideas respecto a la evolución, afirmó que la evolución de una especie se efectúa mediante los siguientes procesos:

-Reproducción, habilidad de transmitir características por herencia a los hijos;

-Recombinación, características transmitidas de padres a hijos;

-Mutación, pequeña modificación del patrón hereditario y

-Selección, individuos más fuertes.

Darwin, concluyó que solo sobreviven los individuos que mejor se adaptan al entorno en que viven. Al grado de adaptación lo denominó aptitud; es decir, mientras un individuo tenga más alta aptitud, este tendrá más probabilidad de sobrevivir.

Los AG's, son técnicas para la solución de problemas de optimización, su proceso se caracteriza:

- Trabajan con una población de puntos, en lugar de un solo punto;
- Cada punto, es un vector y representa una probable solución o candidata solución de un problema.
- Una población es, un conjunto de vectores, y representa un conjunto de soluciones.
- A cada vector se le denomina individuo de una población. Un individuo es llamado como cromosoma, por la analogía con la evolución genética de las personas. Y a cada elemento de un cromosoma se le denomina gene.

Los pasos típicos que se llevan a cabo al implementarse un programa de AGs son:

1. Se genera en forma aleatoria una población inicial (conjunto de individuos).
2. Se calcula la aptitud (fitness) para cada individuo.
3. Se reproduce los mejores individuos, para formar una nueva población.
4. Aplicando operadores genéticos (cruce y mutación) se genera la siguiente población.
5. Regresar al paso 2 hasta alcanzar cierta condición previamente establecida.

### 4.3 Operaciones básicas de los algoritmos genéticos

Las operaciones básicas de los AGs se explicará con el siguiente problema (en el anexo C se ilustran los detalles). Por ejemplo, se desea hallar el valor máximo de  $f(x)$ :

Maximizar  $f(x) = \text{Sen}(\pi * X / 256)$

Donde:  $0 \leq X \leq 255$  ,  $X \in \text{números enteros}$

Podemos observar que se tiene una sola variable que es "X". Podemos utilizar para el algoritmo, un alfabeto binario; la idea es encontrar de qué manera representamos a la variable. En este ejemplo, esto es fácil debido a que la variable solo puede tomar valores enteros entre 0 y 255. Entonces, podemos representar cada individuo de la población como una cadena de 8 bits.

La tabla 4.1, se ilustra la representación del 0, 1 y 255 como una cadena de 8 bits (00000000 representa al cero y 11111111 representa al 255).

**Paso 1.** *Generar la Población inicial*, normalmente esto se genera aleatoriamente. Entonces generamos los 0 y 1 con el mismo grado de probabilidad para cada uno de los

individuos. Consideraremos una población inicial de ocho individuos. En la Tabla 4.2 se ilustra la población inicial,  $x$ , y  $f(x)$ .

**Paso 2.** *Cálculo de la aptitud de cada individuo*, en este caso particular, podemos considerar al mismo  $f(x)=\text{Sen}(\pi \cdot X/256)$ . Por lo tanto, la función aptitud puede ser el valor de  $f(x)$ , como la intención es maximizar la función, la primera posible solución es el mayor valor de  $f(x)=f(99)=0.937$ . Cabe observar que, cada individuo es una posible solución.

**Paso 3.** *Reproducción de los mejores individuos*, esto es para formar una nueva población con el mismo número de individuos. Para esto seleccionamos a los padres de la selección inicial por un proceso estocástico en el que cada individuo es ponderado por su valor de aptitud. En la tabla 4.2, podemos comprobar que la suma de aptitudes de los individuos es 5.040, también se muestra la probabilidad de selección de cada individuo. Estas probabilidades son usadas en una “ruleta de selección” donde cada tamaño de la porción de la ruleta representa la probabilidad de un individuo de ser seleccionado y es proporcional a su valor. La figura 4.1, ilustra la “ruleta de selección” para generar nuevos individuos, se observa que los más aptos, tendrán la mayor probabilidad de selección.

Esta ruleta funciona, generando ocho números aleatorios menor que 100:

Si por ejemplo uno de estos números está entre 0 y 14.5, el primero individuo de la selección inicial es seleccionado. Si otro número está entre 14.5 y 23.9, el segundo individuo es seleccionado, y así sucesivamente. Se observa, que la posibilidad de que un individuo sea seleccionado va depender en forma proporcional a su valor de aptitud.

Luego de aplicar la “ruleta de selección”, los elementos individuos elegidos son los mostrados en la tabla 4.3.

**Paso 4.** *Operador genético de cruce*, una vez escogida la “mejor” población, para generar una nueva población. El Cruce, es la esencia de los AGs. Esto consiste en el intercambio de bits entre los “individuos padres”. Para esto, se asigna una probabilidad de ocurrencia de cruce. Es decir, dados dos padres, la probabilidad que el proceso de cruce entre ellos ocurra. Esta probabilidad puede asignarse entre 60-80. En este ejemplo, asumimos una probabilidad de cruce del 80%. La figura 4.2, ilustra una ruleta con probabilidad de cruce del 80%.

Los individuos seleccionados son agrupados en pares. Para cada par, se genera aleatoriamente si el cruce se realiza o no. Para los pares de individuos que se crucen, se seleccionan dos puntos de cruce con una “ruleta para puntos de cruce” tal como se ilustra en la figura 4.3.

El operación de cruce consiste en intercambiar bits que están entre los dos puntos seleccionados (el orden de los puntos es de izquierda a derecha, de 1 a 2). La figura 4.4, ilustra la selección de los puntos de cruce para cada par de individuos con su

correspondiente decisión de cruce. Notar que en el tercer par, el punto 1 esta a la derecha del punto 2. La operación de cruce salta del final de la cadena de bits, al principio, es decir, la cadena se toma como si fuera un anillo (el final de la cadena unida al principio de esta).

En la tabla 4.4, se ilustra la primera generación de individuos formados luego del cruce. Se muestra también los valores de  $x$ , y el valor de  $f(x)$  de esta primera generación

**Paso 5.** *regresar al paso 2*, con esta generación de nuevos individuos, vamos al paso 2 y repetimos la secuencia hasta encontrar la condición que buscamos.

En este ejemplo, luego del cuarto cruce se alcanza una solución aceptable  $X=126$ ,  $f(x)\approx 1$ . Las tablas 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 y 4.10, muestran los resultados de los procesos iterativos. La tabla 4.11, resume los resultados del proceso de cruce, notar que a partir del 6to cruce el valor de  $x$ ,  $f(x)$  se mantiene constante en cada iteración, esto significa que se obtuvo la condición que deseamos.

#### 4.3.1 Representación de la variable.

Existen diferentes formas de codificar una variable (representación decimal, bits independiente, etc), lo explicaremos más adelante. En este ejemplo, se eligió una representación binaria de 8 bits, puede ser que no sea la forma más conveniente, pues en el ejemplo, el valor óptimo debería ser para  $x=128$ , donde  $f(x)=1$ . La codificación binaria de 128 es 10000000 y de 127 es 01111111; en consecuencia, tan solo un pequeño cambio en la función objetivo puede significar un cambio en todos los bits de la representación pudiendo complicar la búsqueda. Por lo tanto, a veces puede requerirse de una representación más adecuada.

#### 4.3.2 Población de individuos

Es necesario que desde un inicio, se tenga buena calidad de individuos. En AGs, siempre será recomendable tener un conocimiento previo del problema. Poblaciones con mayor cantidad de individuos, se logra explorar mejor el espacio de búsqueda. La inicialización de una población se realiza de manera estocástica, pero podría ser conveniente generar algunos individuos de forma heurística. Esto ayuda a que desde el inicio se tenga una buena calidad de individuos.

#### 4.3.3 Ruleta de selección

En AGs, debe de entenderse que cuando un individuo tenga mayor aptitud, entonces tendrá mayor probabilidad de ser seleccionado. Es decir, el número de veces que un

individuo actual sea seleccionado, es proporcional a su valor de aptitud relativo y al valor promedio de aptitud de la población entera.

En el ejemplo, podemos describirlo como un círculo dividido en porciones que representan las probabilidades de cada individuo. Se determina un punto, como el punto cero y cada arco alrededor del círculo corresponde a un área entre 0 y 100%. Generamos un número aleatorio entre 0 y 100 y será elegido el individuo al que corresponda la porción de círculo en la que caiga el número generado. Obviamente, los individuos con mayor aptitud son probablemente más seleccionados.

La ruleta, puede provocar que el mejor individuo no sea elegido para pasar a la siguiente generación. En este caso, es conveniente usar lo que se denomina una estrategia de elitismo. Tal estrategia asegura que los individuos con mayor aptitud sean elegidos para la siguiente generación.

#### **4.3.4 El proceso de cruce**

El cruce es la esencia de los AGs, es un término utilizado en la recombinación genética durante la reproducción sexual. Si hacemos una semejanza, en los AGs, un hijo debe tener las mismas probabilidades de recibir un gene de ambos padres si los cromosomas de los padres son combinados aleatoriamente.

En AG, los atributos de la operación de cruce pueden variar, estos son: la probabilidad que ocurra y el tipo de cruce elegido. En el ejemplo, se eligió una probabilidad de cruce de 0.8 y se implemento un cruce de dos puntos.

Dependiendo del tipo de problema, una probabilidad de cruce entre 0.6 y 0.85 es un valor que recomiendan autores para la implementación de un AG.

#### **4.3.5 El proceso de mutación**

Normalmente la probabilidad de mutación en un proceso debe de mantenerse constante en todo el proceso, pero esto podría degenerar la búsqueda. La mutación consiste en la variación de los bits que ocurre en cada generación. Frecuentemente se usa una probabilidad baja (0.1%). En algunas implementaciones inician con una probabilidad de mutación de 0.1 % y terminan con 1%

### **4.4 Algoritmo Genético aplicado al problema de planeamiento de la transmisión**

Cuando se tiene una gran dificultad en encontrar la solución óptima de problemas complejos, se recurre a métodos aproximados. Es el caso de los algoritmos genéticos (AGs), que fueron proyectados para resolver este tipo de problemas. Los AGs han sido

utilizados con éxito en la solución de diversos problemas y en varias aplicaciones de ingeniería eléctrica.

Matemáticamente, puede considerarse al AG, como una técnica de optimización combinatoria con una alta probabilidad de encontrar la solución óptima en problemas de gran tamaño, complejos y que presentan muchas soluciones óptimas locales.

Este es el caso, del planeamiento de expansión de la transmisión de SEP, en estos problemas, debido a las restricciones que involucran, variables enteras (el número de líneas y transformadores) y reales (flujo en líneas, etc), se tiene un problema de difícil solución, por el número elevado de soluciones óptimas locales posibles.

Por ejemplo, si consideramos el Sistema Garver mostrado en la figura 4.5. Este sistema está conformado por 5 barras de carga, 3 barras de generación y 6 líneas de transmisión existentes. Además, para la expansión tenemos 9 rutas nuevas candidatas (mostradas en trazos punteados), para la construcción de nuevas líneas. Consideremos la construcción de nuevas líneas paralelas a las existentes o en algunas de las 9 rutas nuevas candidatas. Si además, en cada circuito (existente o en ruta nueva) no debe tener más de 3 líneas paralelas. Es decir, existen 6 posibilidades en circuitos existentes y 9 en rutas nuevas, totalizando 15 posibilidades; en cada una de las cuales se pueden construir hasta 8 líneas de transmisión. Una de las formas de encontrar la solución sería evaluar todas las posibilidades existentes, que en este caso sería igual a  $2^{45}$  alternativas, lo que sería imposible su solución en un tiempo razonable.

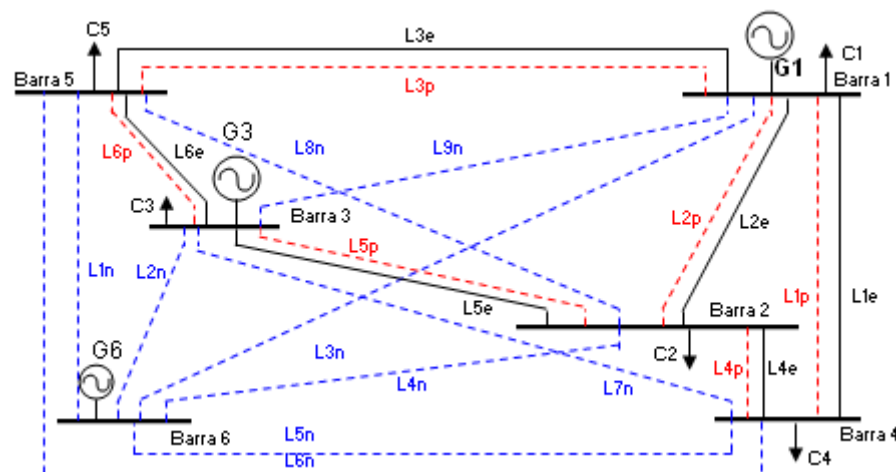


Figura 4.5 Sistema Garver de 6 barras

Obviamente, si consideramos un sistema real, nos damos cuenta de la naturaleza combinatoria de este tipo de problema.

Un conocimiento previo de la configuración del sistema, acompañado de informaciones de costos para las líneas, y de restricciones geográficas y ambientales, entre otras,

permiten considerar en el planeamiento únicamente aquellas ramas candidatas que puedan ser efectivamente construidas.

Por otro lado, en todos los países existen organismos encargados de generar planes preliminares de expansión de la generación y transmisión, estos nos sirven referencia y base para estos estudios. En el caso peruano, este papel es desarrollado por el Ministerio de Energía y Minas (MINEM) [1].

Otros aspectos importantes que determinan el tipo y la calidad del AG aplicado al problema de planeamiento de expansión de la transmisión son:

- La representación y codificación del problema de planeamiento
- El mecanismo que se sigue para las generaciones
- La forma de generar la población inicial
- Los parámetros de control y el criterio de parada

#### 4.4.1 Representación del Problema

En problemas de planeamiento de la expansión de la transmisión se tiene dos detalles a considerar: la parte correspondiente al costo de los elementos añadidos (costo mínimo) y la parte correspondiente a la penalización cuando existe corte de carga que produce cada alternativa o configuración.

Así, en el AG, una configuración (individuo) de la población está conformada por variables enteras de inversión  $n_{ij}$  y variables continuas que tendrán efecto en la operación y están consideradas implícitamente en conjunto como corte de carga del sistema. Entonces, desde el punto de vista del AG las variables que forman una topología son enteras (número de líneas candidatas añadidas en cada ruta). El valor de la función objetivo determina la calidad de la topología candidata. Así, las topologías con valores de función objetivo de mejor calidad participan con mayor frecuencia en la generación de los elementos de la nueva población.

Tradicionalmente, los AGs se formulan en forma de maximización de la función. Para este caso del planeamiento de la transmisión, se efectúa un cambio para dar uso adecuado al AG. Así, para la transformación del problema de minimización a un problema de maximización se utilizó la siguiente relación:

$$\text{Mín } f \iff \text{máx } [1/f]$$

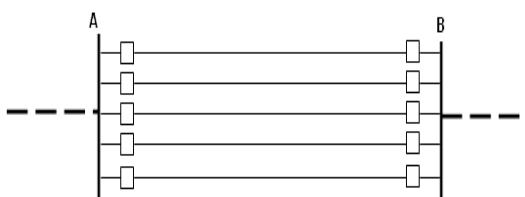
#### 4.4.2 Codificación del problema

Normalmente los AGs utilizan codificación binaria, pues de esta forma logran una mejor implementación en las operaciones de combinación y mutación. Para el problema de planeamiento de la transmisión, las variables que forman una topología candidato son

enteras, por lo tanto, una codificación podría ser representar la variable entera en sistema binario. Sin embargo, veremos que para el problema de planeamiento podemos tener hasta tres formas de codificar cada topología candidata:

- Codificación en sistema binario
- Codificación en bits independientes
- Codificación decimal

Con la figura 4.6 nos permitirá detallar los tres tipos de codificación. Observemos que existe la posibilidad de construir hasta 5 líneas entre las subestaciones A y B.

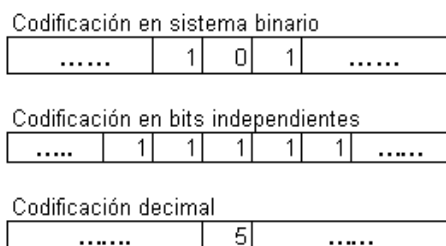


**Figura 4.6 Codificación del problema de planeamiento**

La figura 4.7 muestra las tres formas de codificación. Estas, presentan ventajas y desventajas al considerar los aspectos más importantes del proceso.

La codificación en *sistema binario*, requiere de tres celdas binarias; la codificación por *bits independientes* requiere de cinco celdas binarias y la *decimal* de una celda decimal.

Por otro lado, podemos permitir tener cinco, cuatro o tres líneas paralelas por cada ruta candidata, y también tener un número finito de rutas candidatas. Esto depende de cada SEP.



**Figura 4.7 Formas de Codificación del problema de planeamiento**

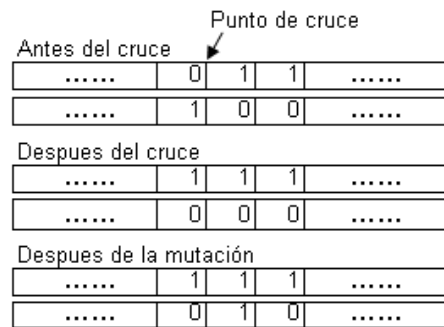
En la figura 4.7, a la ruta A-B se han adicionado 5 líneas.

En la codificación en bits independientes, un “1” representa que los interruptores de la línea están cerrados y un “0” que están abiertos.

La representación *binaria* es muy utilizada, pero existe una desventaja para no utilizarla en problemas de planeamiento de la transmisión: cuando se efectúa la *mutación* y la recombinación pueden generar descendientes muy diferentes a sus configuraciones



parientes originando a veces comportamientos caóticos en el desarrollo del AG. Por ejemplo, en la figura 4.8, si antes de la recombinación se tiene una configuración con 3 líneas añadidas en la ruta A-B y una segunda configuración con 4 líneas. Después del cruce se podría tener una configuración con 7 líneas añadidas y otra configuración sin líneas añadidas. También, en la mutación se podría tener una configuración con 7 líneas añadidas y una segunda configuración con 2 líneas añadidas.



**Figura 4.8 Codificación binaria, combinación y mutación**

En el presente trabajo, se utilizó una codificación con *bits independientes*, pero las operaciones de *recombinación* y *mutación* simulan una codificación binaria.

#### 4.4.3 Selección, Recombinación y Mutación

Con una población inicial, se obtiene la siguiente generación (descendientes) por medio de tres mecanismos: selección, recombinación, y mutación.

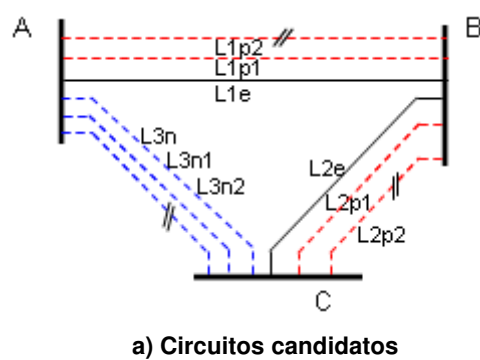
La *selección*, trata de “imitar” el concepto de supervivencia de los individuos en el mundo natural. Para ello, utiliza el valor de la función objetivo, cada topología (individuo) de una población puede tener cierta cantidad de descendientes.

En la selección, podemos aplicar diferentes criterios, por ejemplo: que cada topología candidata tenga derecho a participar en la *reproducción* en forma proporcional a su función objetivo. Es decir, aquellas topologías con mejores funciones objetivo aportarán sus *genes* en una mayor cantidad de descendientes.

En la literatura especializada, existen una variedad de tipos de selección, podemos citar los que más se utilizan: selección proporcional, por escalamiento, basada en ordenamiento y selección por juego.

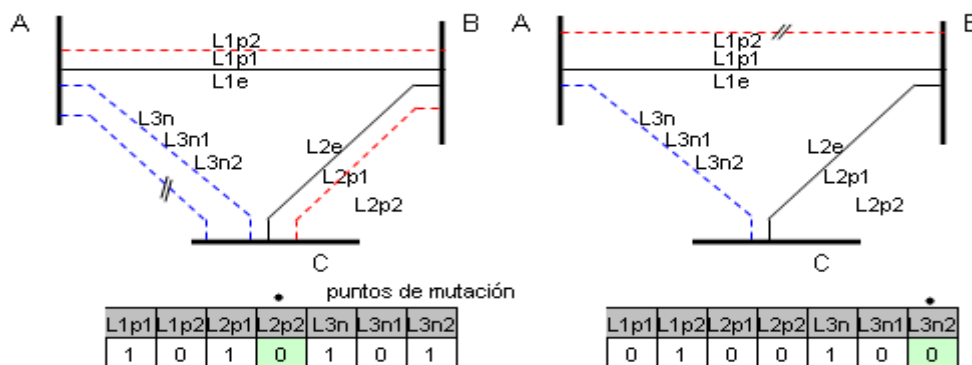
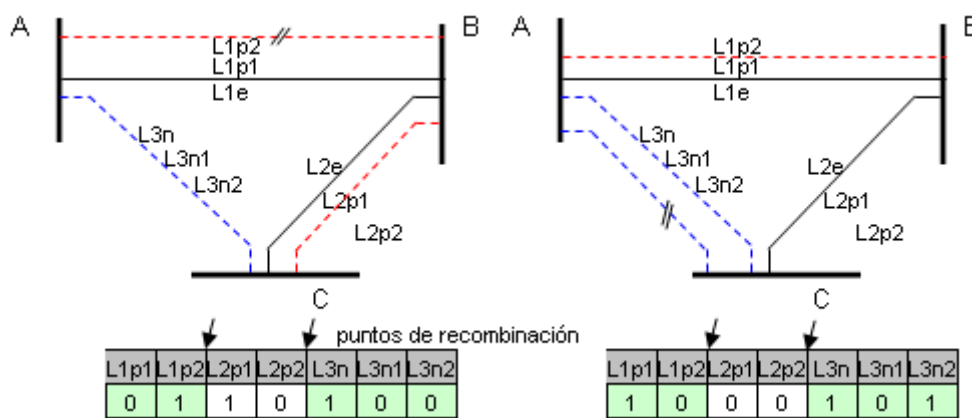
La figura 4.9, ilustra las operaciones de *recombinación* y *mutación* para dos topologías de un sistema sencillo. En la parte a) de la figura se muestra el total de candidatos. Para representar las líneas paralelas a las existentes utilizaremos el código de la línea existente seguido del  $p1$  ó  $p2$ , si las líneas candidatas son de simple o doble terna respectivamente. En la parte b) se muestran dos configuraciones (individuos) de la

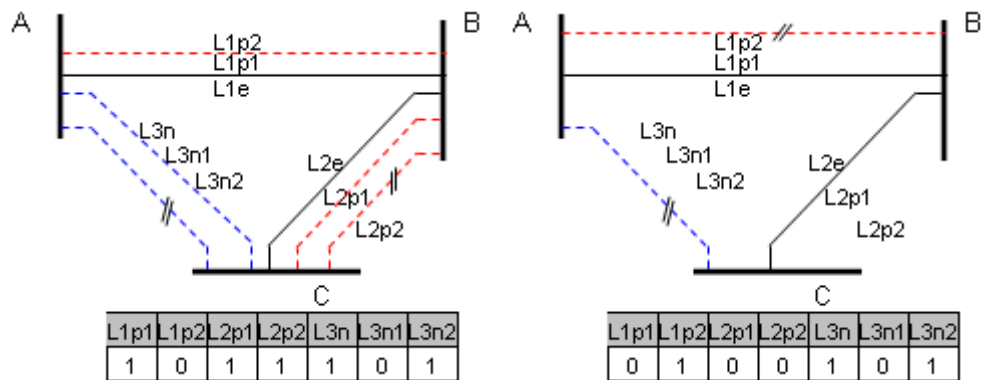
población. En la configuración a) la ruta AB tiene dos líneas adicionales, mientras que en la segunda configuración, esta misma ruta tiene una línea adicional. Esta figura también muestra el punto de recombinación. A través de la operación de *recombinación*, el lado derecho e izquierdo de los puntos de la primera configuración se trasladan al lado derecho e izquierdo de la segunda configuración y viceversa, resultando dos nuevas configuraciones que se muestran en la parte c). La parte d) de la Figura 4.9 muestra las configuraciones resultantes después de realizado el proceso de mutación. En este, el mecanismo de mutación cambia el estado de un solo bit (de 0 a 1 ó de 1 a 0).



Descripción:

- L1e: línea existente
- L1p1: línea paralela simple terna
- L1p2: línea paralela doble terna
- L3n: línea nueva
- L3n1: línea nueva paralela simple terna
- L3n2: línea nueva paralela doble terna





d) Configuraciones después de la mutación

Figura 4.9 Recombinación y mutación

#### 4.4.4 Parámetros de Control y Criterios de Parada

El desempeño del AGs depende de la forma de selección de los parámetros de control, esto son: tasa de recombinación, tasa de mutación y tamaño de la población. Es también importante aplicar una adecuada selección del tipo de recombinación, esto es: de un simple punto, de doble punto o multipunto. De igual forma, como se realiza la mutación.

En este trabajo, se empleó 80% como tasa de recombinación. La tasa de mutación se consideró constante y controlada al 1% por cromosoma.

Como criterio de parada se utilizó la combinación de dos criterios simples: El primero, por número máximo de generaciones, y el segundo, si durante las últimas  $k$  generaciones una solución no mejora. Se aplica el que ocurra primero. Se utilizó un número máximo de 30 generaciones y un parámetro de  $k=10$ . También, se utilizó “tres”, como número máximo de líneas en paralelo por cada ruta candidata.

#### 4.5 Ejemplos de aplicación de los AGs

Tradicionalmente, cuando se presenta un problema de sobrecarga en una línea de transmisión de un SEP, los ingenieros planificadores, y analistas buscan mediante algún análisis de ensayo de prueba y error, la forma de solucionar el problema. Si por ejemplo, se decide la construcción de una nueva línea paralela a la línea sobrecargada, o si se quiere eliminar una determinada congestión, se van probando las líneas candidatas una a una y efectuando corridas del flujos de carga y se va observando si se encuentra la solución. Una vez logrados los resultados desde el punto de vista de estado estacionario, se procede a una simulación dinámica de desconexión de la(s) línea(s) seleccionada(s) verificando que no se provoque un fenómeno de inestabilidad dinámica.

#### 4.5.1 Ejemplo ubicación óptima de un capacitor serie en un SEP

Supongamos una red de 3 líneas, mostrada en figura 4.10.

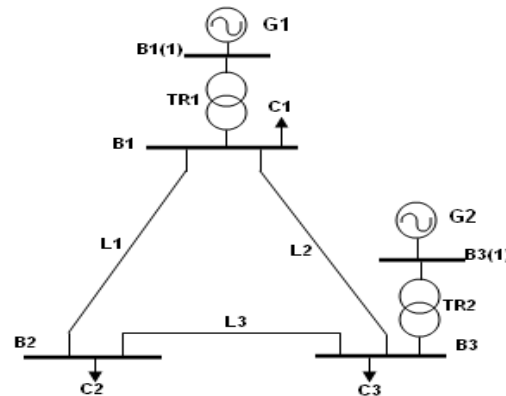


Figura 4.10 Diagrama unifilar de red sencilla

Se plantea, ubicar óptimamente capacitores series y aprovechar la infraestructura del sistema existente. Para el AG usado en este ejemplo, los cromosomas de un individuo típico podemos representarlo bits independientes (figura 4.11). La cadena de cromosomas mostrada corresponde al número de líneas candidatas para la instalación de un capacitor serie. Podemos pensar, que realmente todas las líneas del sistema pueden ser candidatas.

L1	L2	L3
1	0	1

Figura 4.11 Ejemplo de cromosoma

Un individuo es creado mediante una ruleta como se ilustra en la figura 4.12. Observemos que, hay un 75% de probabilidad de que se obtenga un “0” y un 25% que se obtenga un “1”. Un “1” indica que se instala un capacitor en serie en dicha línea, un “0” indica que no.

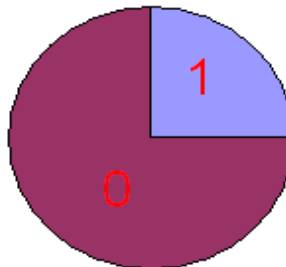


Figura 4.12 Ejemplo de ruleta sesgada al 25%

Así, podemos formar en forma aleatoria, una población inicial de ocho individuos como se muestra en la tabla 4.12.

Nº	L1	L2	L3
1	1	1	1
2	0	0	0
3	0	1	0
4	0	1	0
5	1	0	0
6	0	1	1
7	1	1	0
8	0	1	0

Tabla 4.12 Población Inicial de 8 individuos

La función de aptitud, considera las funciones de aptitudes de tensión y de carga, de acuerdo con la Figura 4.13.

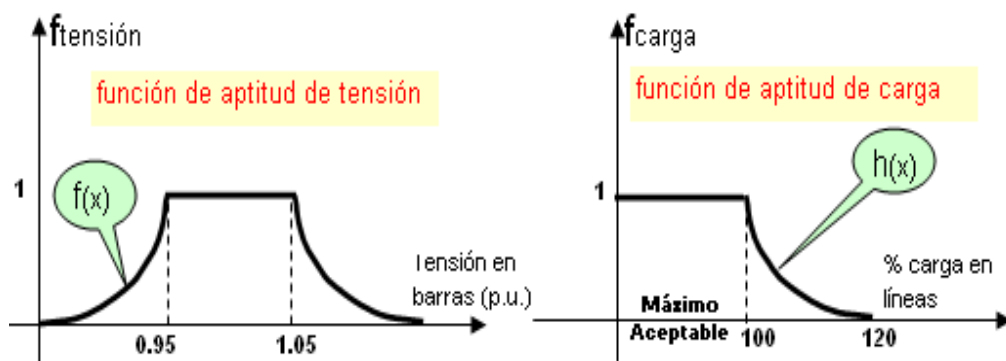


Figura 4.13 Funciones de aptitud de tensión y carga

La evaluación de la función de aptitud de tensión se indica en la ecuación (4.1).

$$f(x) = \exp\{-a \cdot [|\frac{(V_{max}+V_{min})}{2} - V_i| - \frac{(V_{max}-V_{min})}{2}]\} \quad (4.1)$$

La evaluación de la función de aptitud de carga se indica en la ecuación (4.2)

$$h(x) = \exp\{b \cdot [1 - \frac{S_j}{S_{max}}]\} \quad (4.2)$$

La función de aptitud se evalúa como en (4.3).

$$f_{aptitud} = \left[ \prod_{i=1}^{N^{\circ} \text{ de barras}} f_{av}(i) \right] * \left[ \prod_{j=1}^{N^{\circ} \text{ de líneas}} f_{ac}(j) \right] \quad (4.3)$$

donde:

$f_{av}(i)$ , representa la función de aptitud de tensión en barra (i) del sistema

$f_{ac}(j)$ , representa la función de aptitud de carga en la línea (j) del sistema

En el anexo D, se muestra el detalle de los resultados del presente ejemplo.

La metodología de ubicación óptima de un equipo en un SEP, se explicara a detalle en el Capítulo V.

#### 4.5.1.1 Análisis de resultados

La figura 4.14, muestra el diagrama unifilar y los datos de carga (año base) y líneas.

La figura 4.15, muestra las cargas P y Q para el 7mo y 9no año de proyección. Se asumió un crecimiento estático de la demanda con una tasa del 10% anual. También, se asume suficiente capacidad de generación en el período considerado.

##### **Para el caso base (figura 4.16), se observa:**

- Suficiente capacidad instalada;
- Perfil de tensiones normales;
- Líneas L1, L2 y L3 están al 30, 15 y 42% de su capacidad nominal

##### **Para el año 7 (figura 4.17), se observa:**

- Líneas L1, L2 y L3 estarían al 48.5, 34.1 y 100.7% de su capacidad nominal
- Línea L3, con ligera sobrecarga (100,7%)
- Líneas L1 y L2 están subutilizadas
- Tensión en la barra B2, fuera de rango (0,91 pu).

En esta condición, el planificador podría tener la alternativa de construir una terna paralela a L3 para asumir el crecimiento natural de la demanda. Pero, otra alternativa es mejorar la infraestructura existente, con ubicación óptima de capacitores series. Por simplicidad asumiremos valores de reactancias para los capacitores, igual a la mitad de la reactancia de la línea en la cual se instalan. Así, la mejor ubicación de capacitores series se dan en las líneas L1 y L2.

##### **Para el 7mo año, con capacitores instalados (figura 4.18), se observa:**

- Líneas L1, L2 y L3 estarían al 61, 54 y 75% de su capacidad nominal
- Perfil de tensiones normales
- Podemos continuar incrementando la demanda dos años más.

##### **Para el 9no año, con capacitores instalados (figura 4.19), se observa:**

- Líneas L1, L2 y L3 estarían al 87, 85 y 96% de su capacidad nominal
- Perfil de tensiones normales.

##### **Conclusión:**

- Se posterga la construcción de una terna paralela a la L3 por 2-3 años
- Se logra aumentar la cargabilidad del Sistema de 390 a 519 MW.

#### 4.5.2 Ejemplo expansión de la transmisión del sistema Garver de 6 barras

El sistema Garver (figura 4.20) consta de 6 barras, 6 líneas de transmisión, 5 barras de cargas y 3 generadores. Este sistema, cuenta con una demanda proyectada a largo plazo, y asumiremos que los generadores producen energía suficiente para atender esa demanda, pero obviamente no con la red existente. Consideraremos 24 líneas candidatas (trazos punteados) que podrían ser añadidas, estas son: 9 ternas simples ( $L_{1n-1}$ ,  $L_{2n-1}$ , ...,  $L_{9n-1}$ ), 9 ternas dobles ( $L_{1n-2}$ ,  $L_{2n-2}$ , ...,  $L_{9n-2}$ ), estas 18 candidatas en nuevas franjas de servidumbre y 6 líneas de refuerzos paralelas a las existentes ( $L_{1p}$ ,  $L_{2p}$ , ...,  $L_{6p}$ ). La tabla 4.13 muestra las líneas candidatas, cada línea candidata o conjunto de candidatas de nuevos circuitos tiene un costo asociado. Nuestro objetivo es encontrar un conjunto de alternativas que represente el mínimo costo total de inversión, de manera que permita una operación adecuada del sistema de transmisión.

Consideramos que todas las líneas son candidatas (total 33), una probabilidad de cruce de 80%, de mutación de 10%, tipo de selección por ruleta y 2 puntos de cruce. Se usa el programa de flujo de carga Digsilent, con el cual corremos los casos que el algoritmo de optimización le indica.

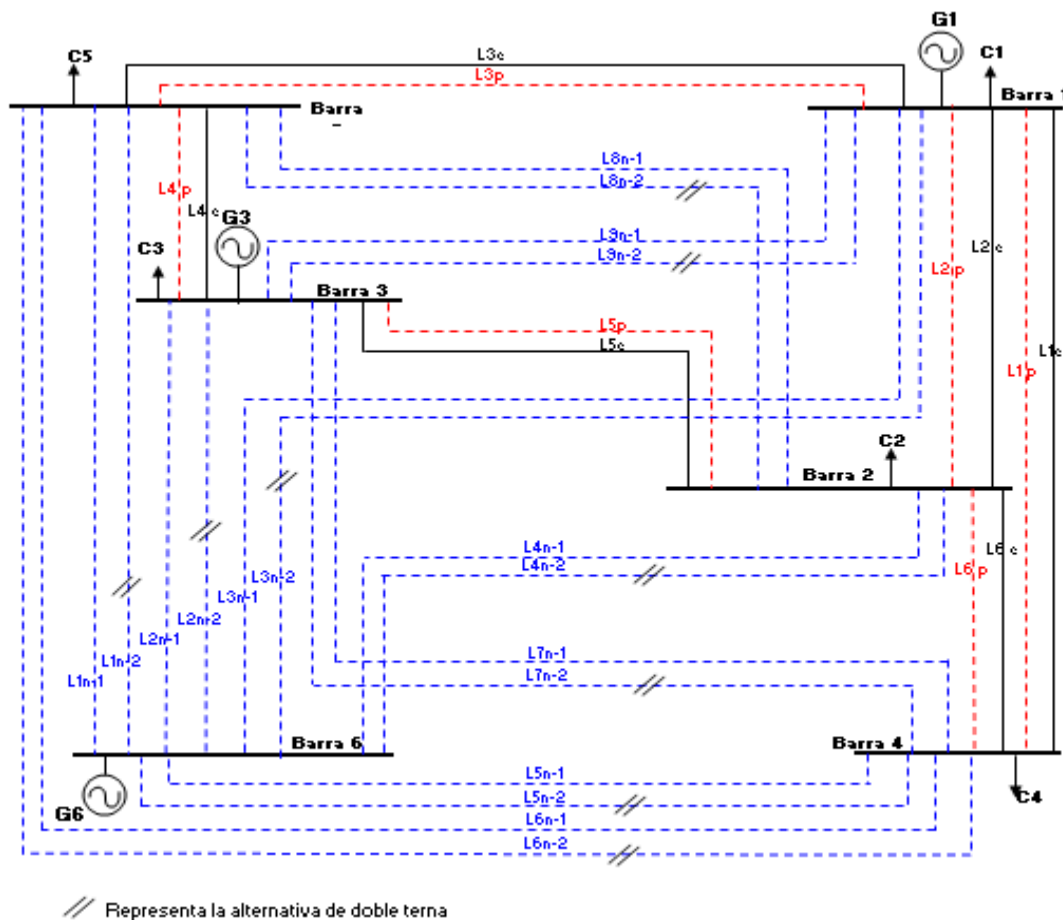


Figura 4.20 Expansión de la transmisión del Sistema Garver de 6 barras

Barra-i	Barra-j	Líneas
1	2	L2p
1	3	L9n-1, L9n-2
1	4	L1p
1	5	L3p
1	6	L3n-1, L3n-2
2	3	L5p,
2	4	L6p
2	5	L8n-1, L8n-2
2	6	L4n-1, L4n-2
3	4	L7n-1, L7n-2
3	5	L4p
3	6	L2n-1, L2n-2
4	5	L6n-1, L6n-2
4	6	L5n-1, L5n-2
5	6	L1n-1, L1n-2

**Tabla 4.13 Líneas candidatas**

-El detalle de tablas y figuras de este ejemplo de aplicación se muestran en el anexo F.

-Los datos líneas, grupos generadores y cargas se muestran en la tabla 4.14.

-En el anexo F, la tabla 4.15 y figura 4.21, muestra la población inicial de individuos obtenidos en forma aleatoria y la representación en el software Digsilent del sistema de estudio, mostrando los flujos en las líneas al final del periodo. Se observa, que las líneas L4e, L5e y L6e al final del periodo no soportan la carga pues idealmente estarían al 245, 326 y 105% de carga de no haber inversión en la transmisión.

-Los resultados de las simulaciones para las generaciones de “individuos hijos” que representan racionamiento de energía igual a “cero” se muestran en las figuras 4.22, 4.23, 4.24 y 4.25.

-El costo asociado de estas alternativas se detalla en la tabla 4.16.

Alternativa	Líneas elegidas	Función de Aptitud	Costo Asociado U. \$
1	L1p,L3p,L5p,L3n2,L4n1,L5n2,L6n1,L6n2,L7n1,L7n2,L9n2	1.333	750
2	L1p,L3p,L4p,L6p,L1n1,L3n2,L4n2,L6n2,L7n1,L7n2,L9n2	1.449	690
3	L4p,L5p,L1n1,L1n2,L2n1,L5n2,L8n2	2.273	440
4	L1p,L3p,L5p,L3n2,L4n1,L5n2,L9n2	2.222	450
<b>5</b>	<b>L4p,L4n1,L4n2,L5n2</b>	<b>3.704</b>	<b>270</b>

**Tabla 4.16 Costo de Alternativas Encontradas**

Como nuestro objetivo es encontrar la alternativa económica, elegimos la alternativa 5.



#### **4.5.2.1 Análisis de resultados**

Si bien, las 5 alternativas de “individuos hijos” encontradas cumplen con la condición (racionamiento de energía igual a “cero”), podemos observar que no todas son realmente viables; por ejemplo las alternativas 1 y 2 equivalen a construir 16 ternas en rutas diferentes, lo cual es poco razonable, más bien reafirma la hipótesis de que todas las líneas son candidatas. Con el mismo criterio, las alternativas 3 y 4 no son atractivas (construir 9 ternas). La alternativa 5, equivale a construir una terna de refuerzo (L4p), 3 ternas paralelas (L4n1, L4n2) en la ruta 2-6 y 2 ternas paralelas en las ruta 4-6.

#### **Conclusión:**

La solución encontrada corresponde a la cantidad de líneas de transmisión que se deben construir. Este “individuo” tiene asociado un costo de expansión de 270.00 unidades y costo de racionamiento igual cero. Este resultado es equivalente a la solución encontrada en la literatura, y corresponde también a la solución óptima para este sistema.

## Capítulo V

### Metodología

#### 5.1 Generalidades

El planeamiento de un SEP, nos permite determinar las acciones o inversiones que deben de realizarse para que un sistema cumpla con su objetivo de atender la demanda con seguridad y calidad, las inversiones deben de ser el menor costo posible. En esto están comprendidos los planeamientos de la operación y de la expansión.

El planeamiento de la Operación, corresponde a las acciones sobre los elementos existentes del SEP que nos permiten atender en forma adecuada una demanda actual y hasta cuando al crecer la demanda el sistema existente ya no sea capaz de cumplir con su objetivo.

El planeamiento de la Expansión, cuando por crecimiento de la carga el sistema existente ya no es capaz de abastecer adecuadamente; en estas condiciones, se procede al planeamiento de la expansión. Esto Incluye, la construcción de nuevas líneas de transmisión y unidades generadoras. En este proceso se determina **dónde, qué, cuándo y cuántos** nuevos equipos deben ser incorporados al SEP para que cumpla con su objetivo de atender la demanda proyectada en forma adecuada.

El problema de planeamiento de Expansión de la Transmisión, es el proceso a mínima inversión, que sirve para determinar la red de transmisión que se debe de construir para atender los requerimientos de demanda proyectada de un SEP.

**La expansión de la transmisión de largo plazo**, es de carácter indicativo; sirve de referencia para los agentes del SEP. Este planeamiento, es un proceso complejo que envuelve estudios energéticos, eléctricos y financieros, los cuales generalmente se realizan siguiendo determinados criterios y premisas. Se resuelve en dos etapas, inicialmente se realiza un *planeamiento estático*, el cual considera un horizonte de tiempo determinado (por ejemplo 10 años) y tiene como finalidad determinar los circuitos que deberán ser construidos y la inversión necesaria al inicio del horizonte de tiempo. Luego, se realiza el *planeamiento dinámico*, el cual divide el período de tiempo en intervalos y define no sólo la mejor topología y tipo de inversión, sino también el momento más apropiado para realizar dichas inversiones.

Este trabajo, se centra en el planeamiento estático de la Expansión de la Transmisión organizado en dos etapas: **la primer etapa**, intenta mejorar la red existente con la ubicación óptima de dispositivos FACTS, luego, **la segunda**, con la red mejorada nos permite encontrar óptimamente las líneas que se debe de construir para atender la demanda proyectada. Esta metodología esta basada en flujos de potencia activa y reactiva y el uso de un algoritmo genético. Es decir, se utiliza los resultados del flujo de potencia para la evaluación de la aptitud de cada individuo dentro del algoritmo genético. Para esto, se elaboró un algoritmo basado en la teoría fundamental de los algoritmos genéticos (anexo B). Se utilizó el lenguaje de programación C++ para correr el algoritmo genético y se usó el software: Power Factory DlgSILENT para correr los casos que el algoritmo de optimización nos indica.

## 5.2 Planteamiento del problema

Para efectuar el planeamiento de expansión de la transmisión, se debe conocer lo siguiente:

- La topología actual del SEP;
- La demanda proyectada;
- El despacho preestablecido y
- El conjunto de alternativas de nuevos circuitos.

Cada alternativa o conjunto de alternativas debe tener uno costo asociado. El objetivo es hallar la(s) alternativa(s) que represente(n) el mínimo costo total de inversión al añadir nuevos circuitos al SEP, de manera que permita una operación adecuada del sistema.

Como se detallo en el capítulo II, para la expansión de la transmisión se utilizan ecuaciones del flujo de potencia lineal. Formulado como un problema de programación no lineal entero mixto (5.1).

$$\text{Minimizar } F = \sum_{(i,j) \in \Omega} C_{ij} n_{ij} + \beta \sum_{i \in \rho} r_i \quad (5.1)$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

Ecuación de balance de flujo

$$Mf + g + r = d \quad (5.2)$$

Ecuación que establece que el flujo es de potencia activa lineal

$$f_{ij} - \zeta_{ij}(n_{ij}^o + n_{ij})(\theta_i + \theta_j) = 0 \quad , (i, j) \in \Phi \quad (5.3)$$

Restricción que limita la sobrecarga en los circuitos

$$|f_{ij}| \leq (n_{ij}^o + n_{ij})f_{ij}^{\max} \quad , (i, j) \in \Phi \quad (5.4)$$

Restricción que limita la potencia generada en cada generador

$$0 \leq g \leq g^{\max} \quad (5.5)$$

Restricción que limita el racionamiento

$$0 \leq r \leq d \quad (5.6)$$

Restricción que limita los circuitos iguales a construir por cada circuito candidato

$$0 \leq n_{ij} \leq n_{ij}^{\max}, \quad (i,j) \in \Omega \quad (5.7)$$

,  $n_{ij}$  entero

Donde:

- F Representa el costo total de inversión del plan de expansión
- $C_{ij}$  Representa el costo de añadir una línea en la ruta  $ij$
- $n_{ij}$  Representa el número de líneas adicionados en la ruta  $ij$
- $\Omega$  Representa al conjunto de rutas donde se pueden añadir líneas
- $\beta$  Coeficiente para la penalidad asociada al racionamiento
- $r_i$  Representa el racionamiento de potencia en la barra  $i$
- $\rho$  Representa el conjunto de las barras del SEP
- M Representa la matriz de incidencia circuito-barra del sistema
- f Representa el vector con elementos  $f_{ij}$
- $f_{ij}$  Representa a los flujos de potencia entre las barras  $i$  e  $j$
- g Vector de generación de potencia
- r Vector con elementos  $r_i$
- d Vector de cargas
- $\zeta_{ij}$  Susceptancia de un circuito en la ruta  $ij$
- $n_{ij}^0$  Número de circuitos inicialmente en la ruta  $ij$ .
- $f_{ij}^{\max}$  Flujo de potencia máximo permitido en un circuito entre las barras  $i$  e  $j$
- $\Phi$  Conjunto de circuitos iniciales y nuevos
- $\theta_i$  Representa los ángulos de las tensiones complejas

Las variables a incógnitas son  $n_{ij}$ ,  $r$  y  $g$ .  $n_{ij}$  es una variable entera,  $r$  y  $g$  son continuas.

Debido a  $n_{ij}$ , la formulación dada es un problema complejo de optimización matemática.

En la función objetivo observamos dos términos:

El primero,  $\sum c_{ij} n_{ij}$ , corresponde al costo total de expansión;

El segundo,  $\beta \sum r_i$ , corresponde al costo del racionamiento.

Un problema bien planteado, con una buena técnica de solución debe ser capaz de encontrar una solución para la cual el valor de  $r$  sea igual a cero (sin racionamiento).

En el Capítulo II, se detallo las técnicas de solución del problema formulado en (5.1), las cuales se resumen en dos grupos:

1º, técnicas basadas en algoritmos de optimización y

2º, técnicas basadas en algoritmos heurísticos.

**El primero**, la metodología más utilizada es la técnica de descomposición de Benders. Esta técnica, descompone el problema en dos partes:

Un **subproblema de inversión**, donde se elige un plan de expansión candidato y se calculan sus costos asociados, y un **subproblema de operación**, donde el plan candidato es probado en términos de adecuada atención de la carga. El óptimo es hallado en forma iterativa.

**El segundo**, se resuelve paso a paso, crean, evalúan y seleccionan topologías de expansión de transmisión, realizan búsquedas locales a base de reglas empíricas o aplican técnicas de sensibilidades. En estas están los *algoritmos heurísticos constructivos* y los *algoritmos de optimización combinatoria*. El *primero*, se caracteriza por ser un procedimiento paso a paso que, a partir de una topología base, se van añadiendo en cada paso circuitos hasta conseguir una adecuada operación del sistema eléctrico. El *segundo*, se caracteriza por hallar una buena solución entre un gran número de soluciones. La calidad de una solución es cuantificable y comparable con otra solución. Entre estos algoritmos tenemos: búsqueda tabú (BT), algoritmos genéticos (AG) y otros.

En este trabajo, para la optimizar la red existente, se hace uso de técnicas basadas en sensibilidades (Capítulo III, 3.6.1) y algoritmos genéticos (Capítulo IV, 4.4). Para la expansión de la red se utiliza la técnica basada en descomposición de Benders utilizando un AG para resolver el subproblema de expansión y un flujo de potencia lineal en la solución del problema de operación.

### 5.3 Desarrollo de la Metodología

La metodología propuesta considera: primero, mejorar la red existente, luego resolver el problema planteado en la ecuación 5.1.

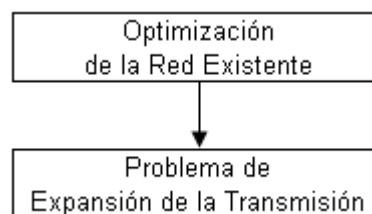


Figura 5.1 Descomposición de la Metodología

**La optimización de la red existente**, se plantea con el uso y ubicación óptima de dispositivo FACTS, para esto:

Primero, para encontrar los lugares factibles de ubicación física de este dispositivo, se aplica la técnica de sensibilidad de Orfanogianni (Capítulo III, 3.6.1). Luego, para su

ubicación óptima en la red, se sigue la técnica heurística de Gervex (Capítulo III, 3.6.2.1), con la diferencia que esta propuesta se desarrolló con AGs. Para esto, se elaboró un algoritmo basado en la teoría fundamental de los algoritmos genéticos. Se utilizó el lenguaje de programación C++ para correr el algoritmo genético de optimización y se usó el software Power Factory DlgSILENT para correr los casos que el algoritmo de optimización nos indica. Es decir, se utiliza los resultados del flujo de potencia para la evaluación de la aptitud de cada individuo dentro del algoritmo genético.

En la figura 5.2, se detalla el diagrama de flujo para la ubicación óptima de FACTS.

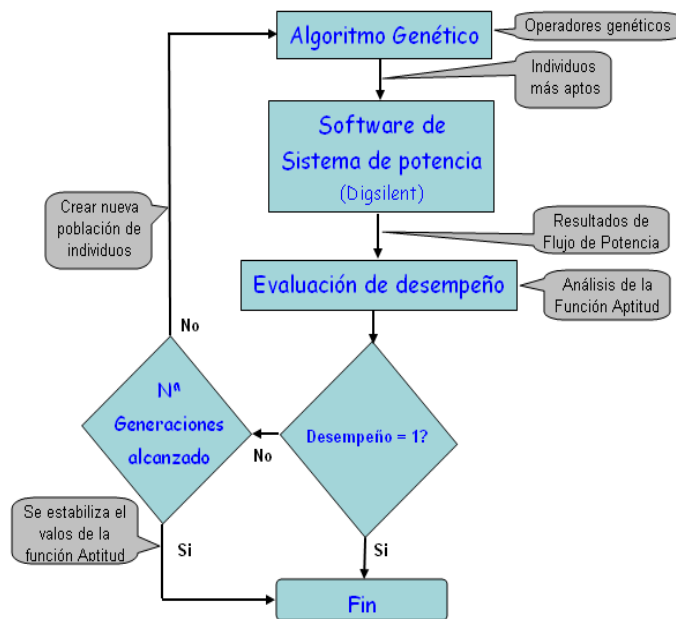


Figura 5.2 Diagrama de Flujo para ubicación de FACTS

Una vez hallado la ubicación óptima de estos dispositivos FACTS en la red, debemos proceder a calcular los parámetros del dispositivo. En este trabajo, para la aplicación se utilizaron los TCSC, y para el cálculo de sus parámetros se siguió las consideraciones indicadas en (Capítulo III, 3.5.2). La secuencia de cálculo de los parámetros del TCSC, se explicara a detalle con la aplicación en el capítulo siguiente (Capítulo VI).

**El problema de expansión de la transmisión**, se plantea de la siguiente manera:

La figura 5.3, muestra las etapas de la presente metodología, el primer bloque (superior), representa al SEP mejorado. El segundo bloque (intermedio), representa el problema de expansión de la transmisión y el tercer bloque (inferior), representa el problema de la operación, ambos aplicados al sistema mejorado. Así, el problema formulado en la ecuación 5.1, aplicado al sistema mejorado, es dividido en dos sub-problemas (segundo y tercer bloque) y son resueltos de modo sucesivo e iterativo.

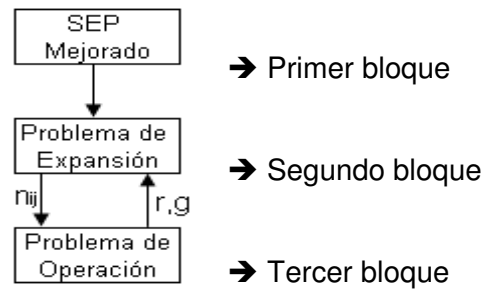


Figura 5.3 Etapas de la Metodología

La figura 5.4, se ilustra y detalla lo siguiente:

**Primer bloque**, significa el uso óptimo de los recursos existentes del sistema. Su no aplicación, podría significar construir más líneas teniendo subutilizadas otras existentes.

**Segundo bloque**, en esta parte, se decide respecto a las variables de inversión (la cantidad y ubicación de los nuevos circuitos). Se calculan los valores de  $n_{ij}$  determinando el costo de expansión de la red. La solución de este problema se efectúa con AGs.

**Tercer bloque**, se decide respecto a las variables de operación ( $r, g$ ) que minimicen el costo de racionamiento de la red expandida. La solución de este problema de operación, se utiliza un flujo de potencia lineal.

El segundo y tercer bloque son resueltos de modo iterativo. Para la ubicación nuevos circuitos en la red, se sigue la técnica heurística de Gervex (Capítulo III, 3.6.2.1), con la diferencia que esta propuesta se desarrolló con AGs (Capítulo IV, 4.4). Para esto, se elaboró un algoritmo basado en la teoría fundamental de los algoritmos genéticos. Se utilizó el lenguaje de programación C++ para correr el algoritmo genético de optimización y se usó el software Power Factory DigSILENT para correr los casos que el algoritmo de optimización nos indica. Es decir, se utiliza los resultados del flujo de potencia para la evaluación de la aptitud de cada individuo dentro del algoritmo genético.

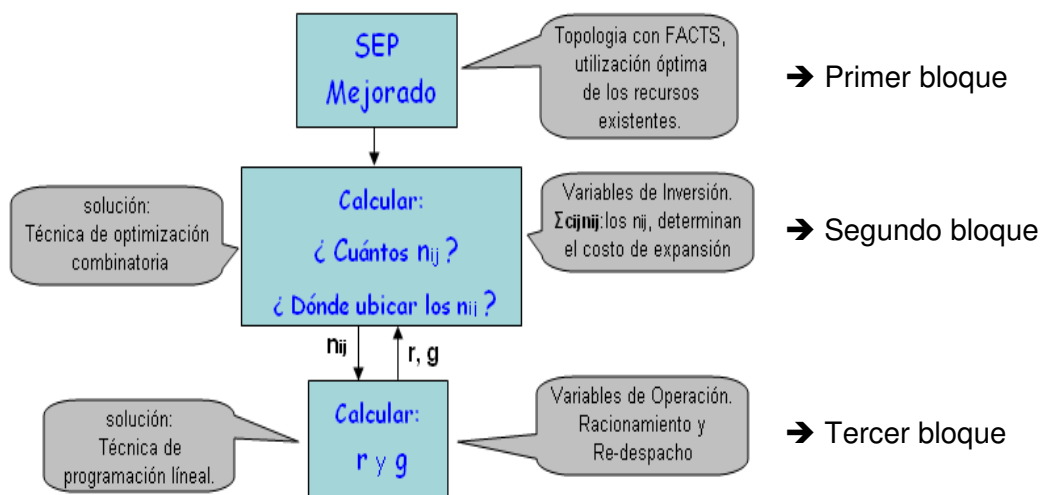


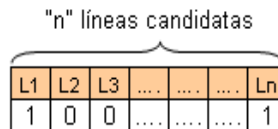
Figura 5.4 Diagrama de Flujo de etapas de la Metodología

### 5.3.1 Etapas de la Metodología

**1º Optimizar la red existente**, según lo detallado por Orfanogianni (Capítulo III, 3.6.1) y Gervex (Capítulo III, 3.6.2.1).

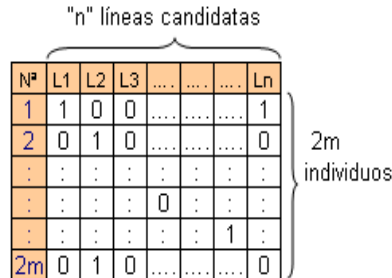
#### 2º Expandir la red mejorada:

-Definimos la cadena de cromosomas (Capítulo IV, 4.4.2). La figura 5.5, ilustra un ejemplo de cadena de cromosomas.



**Figura 5.5** Ejemplo de cadena de cromosomas

-Creamos una población inicial de "2m" individuos ("m" es un número entero) en forma aleatoria, donde la primera cadena de cromosomas corresponde al primer individuo de la población. Este individuo es creado mediante una ruleta de números aleatorios donde hay P% de probabilidad de que se obtenga un uno y (100-P)% de obtener un cero ("P", podemos asumirlo entre 20-25%). Un 1 indica que se adiciona esa línea al SEP y un "0" indica que no. La figura 5.6, ilustra un ejemplo de población inicial de individuos.



**Figura 5.6** Ejemplo de Población inicial de individuos

Notar que, cada individuo representa de manera codificada una solución al problema de expansión.

**3º Definir la función de aptitud ( $f_{Apt}$ )**. Dado que nuestro objetivo es determinar la red de transmisión a mínimo costo. Esta será la inversa de la función objetivo (figura 5.7). Esto se hace debido a que los AG buscan maximizar la función de aptitud mientras que la función objetivo del proceso minimiza costos (capítulo IV, 4.4.1).



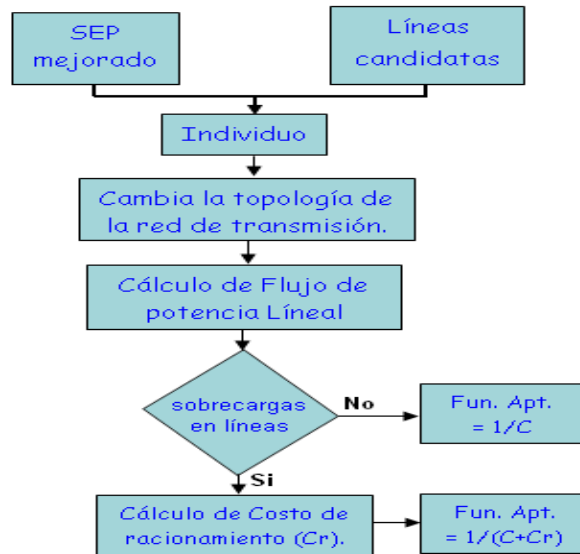


Figura 5.7 Flujograma para la Función de Aptitud

El costo de racionamiento es calculado en función a las sobrecargas existentes tal como se indica en la ecuación 5.8.

$$Cr = \sigma \sum (f_{ij}^{\text{máx}} - |f_{ij}|) \quad , ij \in \Omega \quad 5.8$$

Donde:

- $\sigma$  Representa la penalidad asociada al racionamiento
- $f_{\text{máx}ij}$  Representa la potencia en MVA en el circuito  $ij$
- $f_{ij}$  Representa la potencia máxima admisible en el circuito  $ij$
- $\Omega$  Conjunto de circuitos con sobrecarga

La Penalidad asociada al racionamiento ( $\sigma$ ), es un parámetro que representa la penalidad asociada al racionamiento de energía disminuyendo la aptitud de las soluciones con racionamiento asociado (Capítulo II, 2.2.1).

**4º Evaluar la función de aptitud.** Equivale a resolver el tercer bloque (un problema de operación). Siendo una población inicial (generación cero) sus individuos representan soluciones de pobre calidad, por lo que son mejorados o reemplazados a través de un proceso iterativo en el que en cada iteración (generación) se le aplican los principios de evolución (selección o supervivencia de los más aptos) y los principios genéticos (cruce y mutación), de acuerdo a lo detallado en el (Capítulo IV, 4.3, 4.4). En cada iteración, se evalúa la aptitud de cada individuo de la nueva población resultante. El proceso termina cuando un número máximo de generaciones (criterio de parada, Capítulo IV, 4.4.4) es alcanzado. En la figura 5.8, ilustra el funcionamiento del AG.

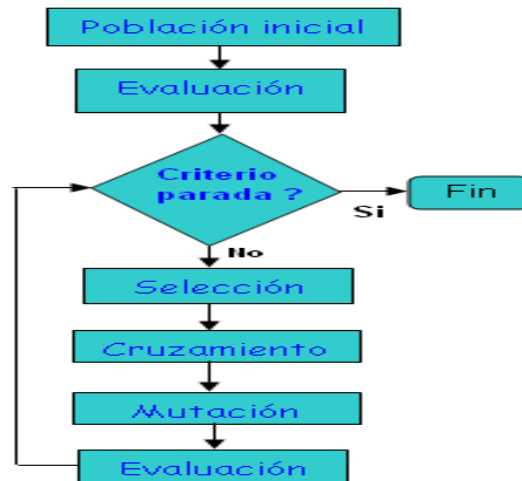


Figura 5.8 Flujograma del Algoritmo Genético

**Selección.** Luego de evaluar la población inicial, son escogidos los individuos más aptos para su reproducción. En este trabajo se utilizó un esquema simple de selección por ruleta (Capítulo IV, 4.3.3). La figura 5.9, ilustra una ruleta que corresponde a una población de 8 individuos.

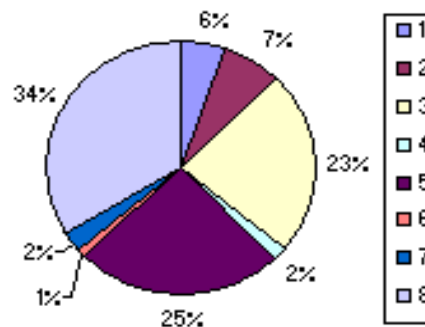


Figura 5.9 Selección vía ruleta

**Cruce.** A través de ello, dos individuos seleccionados aleatoriamente intercambian parte de sus genes en su forma binaria. El cruzamiento no es aplicado a todos los pares de individuos, esto es controlado por un parámetro denominado probabilidad de cruzamiento. Elegimos una probabilidad de cruce de 80% y se implementó un cruce de dos puntos (Capítulo IV, 4.3.4), figura 5.10.

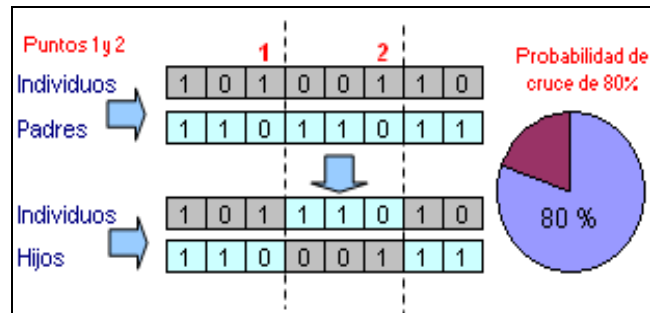


Figura 5.10 Cruzamiento de dos puntos

**Mutación.** Según lo indicado en (Capítulo IV, 4.4.4), en cada generación tenemos la alternativa de poder variar los bits de un individuo.

## Capítulo VI

### Aplicación de la metodología y resultados

#### 6.1 Generalidades

En este capítulo, se aplica la metodología para el planeamiento del sistema de transmisión con ubicación óptima de dispositivos FACTS al SEIN del Perú.

Como se mencionó en los capítulos anteriores, el objetivo es primero mejorar la red existente y luego determinar la red que se debe de construir para atender la demanda proyectada.

La figura 6.1, detalla las áreas que se puede dividir al SEIN y muestra las principales subestaciones que la conforman. En la presente aplicación, enfocaremos nuestra zona de interés en el área N°2, por ser la zona de mayor crecimiento de demanda y se considerará el ingreso del gran parque de generación a vapor debido al aprovechamiento masivo del gas de Camisea, ubicado en la zona sur de Lima.



Figura 6.1 División de áreas del SEIN

Es posible obtener otras configuraciones, pero para los fines de la presente aplicación se utilizará el propuesto.

La figura 6.2, muestra el diagrama de flujo de la presente metodología.

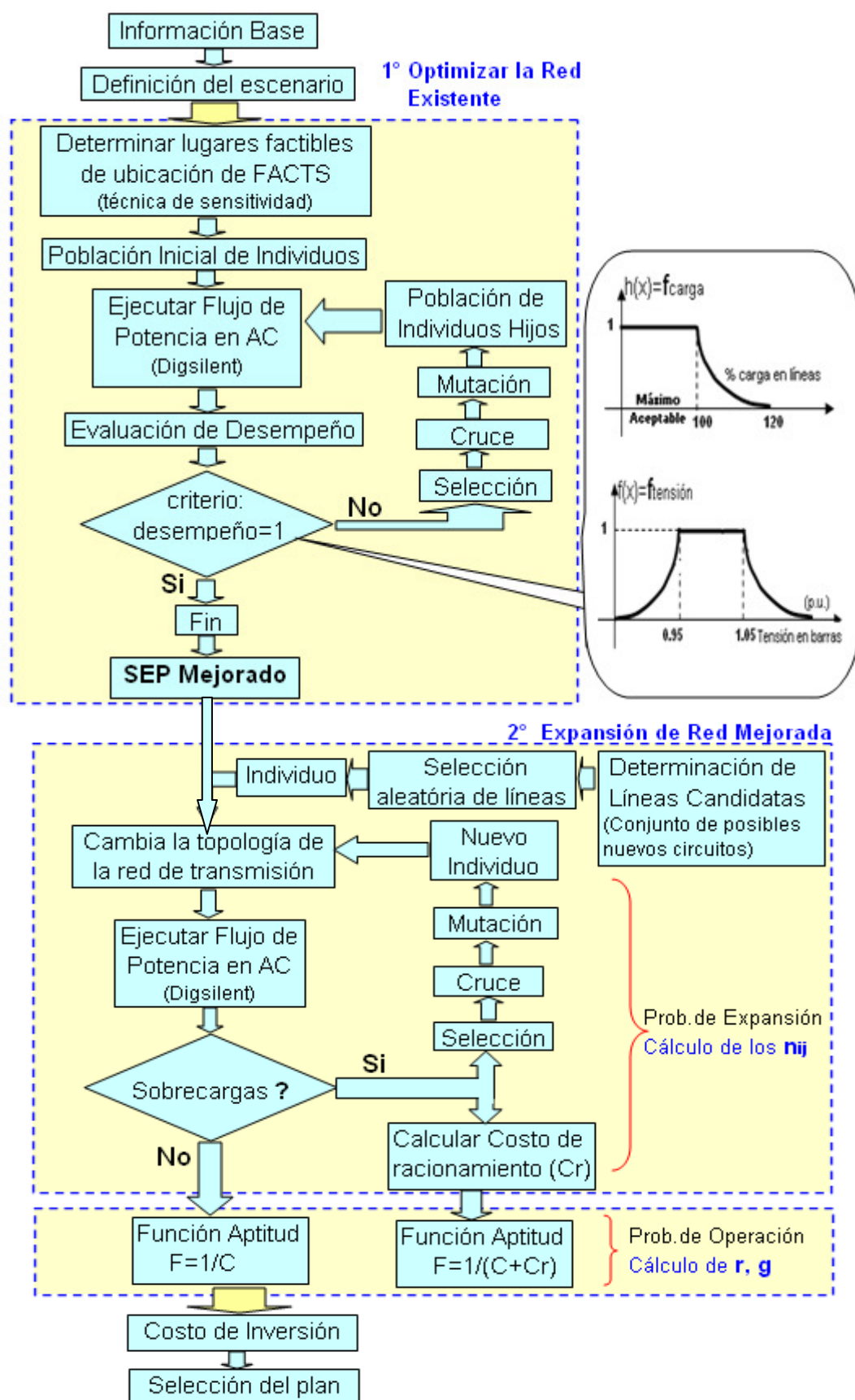


Figura 6.2 Diagrama de flujo de la metodología

## 6.2 Aplicación de la metodología

### 6.2.1 Información Base

Para la presente aplicación se utilizará la proyección de carga y generación del estudio del Plan de Expansión de Rep del año 2006 [40], la cual utiliza las proyecciones de demanda del Estudio de Fijación Tarifaria de Mayo de 2006 del OSINERG [41] y del Plan Referencial de Electricidad del Ministerio de Energía y Minas (MINEM) periodo 2005-2014 [1].

Información de demanda. En el anexo E: la tabla 6.1 muestra la proyección de demanda total y la figura 6.3 ilustra la proyección de demanda de energía, la tabla 6.2 y figura 6.4 muestran la proyección de demanda de potencia.

Información de generación. La tabla 6.3 muestra los 3 escenarios de generación utilizados en el estudio del Plan de Expansión de REP.

AÑO	ESCENARIO A	ESCENARIO B	ESCENARIO C	Cap. MW
2006	TV CT Ventanilla 3	TV CT Ventanilla 3	TV CT Ventanilla 3	85
	TV CT Ventanilla 4	TV CT Ventanilla 4	TV CT Ventanilla 4	85
	TG1 CT Chilca (Enersur)	TG1 CT Chilca (Enersur)	TG1 CT Chilca (Enersur)	170
	UTI CT Santa Rosa (*)	UTI CT Santa Rosa (*)	UTI CT Santa Rosa (*)	105
2007	TG1 CT Kallpa (Globeleq)	TG1 CT Kallpa (Globeleq)		170
Sub-total	615 MW	615 MW	445 MW	
2008			TG1 CT Kallpa (Globeleq)	170
	TG2 CT Chilca (Enersur)	TG2 CT Chilca (Enersur)	TG2 CT Chilca (Enersur)	170
	Ampliación CH Yaupi	Ampliación CH Yaupi	Ampliación CH Yaupi	30
		TG BPZ	TG BPZ	150
2009	CH Platanal	CH Platanal	CH Platanal	220
	CH Machupicchu 2° Etapa	CH Machupicchu 2° Etapa	CH Machupicchu 2° Etapa	75
	Traslado TG de Mollendo	Traslado TG de Mollendo	Traslado TG de Mollendo	70
2010	TV CT Chilca (Enersur)	TV CT Chilca (Enersur)	TV CT Chilca (Enersur)	170
			TG2 CT Kallpa (Globeleq)	170
Sub-total	735 MW	885 MW	1225 MW	
2011	TG1 CT Camisea 1			170
2012	TG2 CT Camisea 1	TG1 CT Camisea 1	CC CT Kallpa (Globeleq)	170
2013	TV CT Camisea 1 (CC)	TG2 CT Camisea 1		170
2014	TG1 CT Camisea 2	TV CT Camisea 1 (CC)	TG1 CT Camisea 1	170
Sub-total	680 MW	510 MW	340 MW	
<b>Total</b>	<b>2030 MW</b>	<b>2010 MW</b>	<b>2010 MW</b>	

**Tabla 6.3 Escenarios de Expansión de Generación**

Fuente: Plan de Expansión del sistema de Transmisión de Red de Energía del Perú, Documento TE-2140-915-2006. Lima, Septiembre de 2006 [40].

De la tabla 6.3, siendo nuestra zona de interés en el área N° 2, por ser la zona de mayor crecimiento de demanda, se considerará el ingreso del gran parque de generación a vapor debido al aprovechamiento masivo del gas de Camisea. Este gran bloque de

generación esta ubicado al sur de Lima, en el distrito de Chilca. La tabla 6.4 muestra la proyección de generación ubicado en el distrito de Chilca.

AÑO	ESCENARIO A	ESCENARIO B	ESCENARIO C	Cap. MW
2006	TG1 CT Chilca (Enersur)	TG1 CT Chilca (Enersur)	TG1 CT Chilca (Enersur)	170
2007	TG1 CT Kallpa (Globeleq)	TG1 CT Kallpa (Globeleq)		170
Sub-total	340 MW	340 MW	170 MW	
2008			TG1 CT Kallpa (Globeleq)	170
	TG2 CT Chilca (Enersur)	TG2 CT Chilca (Enersur)	TG2 CT Chilca (Enersur)	170
2009	CH Platanal	CH Platanal	CH Platanal	220
2010	TV CT Chilca (Enersur)	TV CT Chilca (Enersur)	TV CT Chilca (Enersur)	170
			TG2 CT Kallpa (Globeleq)	170
Sub-total	560 MW	560 MW	900 MW	
2011				
2012			CC CT Kallpa (Globeleq)	170
2013				
2014				
Sub-total	0 MW	0 MW	170 MW	
<b>Total</b>	<b>900 MW</b>	<b>900 MW</b>	<b>1240 MW</b>	

**Tabla 6.4 Proyección de Generación en Chilca**

Para la presente aplicación, se considera el escenario más probable de ocurrencia en cuanto a proyección de generación en la zona sur de Lima (900 MW). La tabla 6.5 resume la proyección total de generación utilizada correspondiente al área N° 2.

Subestación	Generación total (MW)
Chilca	900
Ventanilla	170
Sta Rosa	105
total	1175

**Tabla 6.5 Proyección de Generación Utilizada**

### 6.2.2 Definición del escenario

En el anexo E: la figura 6.5 muestra el diagrama unificar del Sistema Transmisión Nacional del Perú 220 kV, la tabla 6.5 muestra los datos de líneas de 220 kV, la tabla 6.7 los datos de generadores (escenario-Avenida), la tabla 6.8 los datos de generadores (escenario-Estiaje), la tabla 6.9 los datos de cargas (escenario-Avenida) y la tabla 6.10 muestra los datos de Cargas (escenario-Estiaje).

En el anexo E: las figuras 6.6, 6.7, 6.8, 6.9, 6.10 y 6.11 muestran los flujos en líneas y tensiones en barras en p.u. del sistema de 220 kV en el año base (2006) para los escenarios de avenida y estiaje en los períodos de máxima, media y mínima demanda.

En el anexo E: la figura 6.12 muestra el escenario de Máxima Demanda en Avenida Proyectada al año 2008. Este escenario es el más crítico, debido a que en esta época, la

generación utilizada es básicamente hidráulica y en consecuencia el flujo en algunas líneas como la L-2205 y L-2206 que vienen de la C.H. Mantaro estarían con sobrecargas de más del 20%.

### **6.2.3 Optimizar la red existente (1º)**

De acuerdo a la metodología propuesta, la primera etapa considera intentar mejorar la infraestructura existente con la instalación de dispositivos FACTS. Para la presente aplicación se intenta mejorar el sistema con la ubicación óptima del TCSC. Debido a que el presente análisis se efectúa en estado estacionario, se considera los TCSC en modo de operación tiristor bloqueado (Capítulo III, 3.5.1), en la cual la reactancia total es capacitiva. Para esta aplicación se utilizó capacitores series cuyo valor de reactancia por simplicidad se asumió igual a la mitad de la reactancia capacitiva de cada línea en la cual será compensada.

Por otro lado, cabe acotar que la metodología podría aplicarse para encontrar la ubicación óptima de cualquier equipo en el sistema. Por ejemplo, podría pensarse en ubicar óptimamente capacitores Shunt, SVC's, etc.

#### **6.2.3.1 Determinar los lugares factibles de ubicación de FACTS**

Debemos de tener presente que, en principio todas las líneas existentes del sistema son posibles candidatos para la instalación de un TCSC. La tabla 6.11 muestra la relación total de líneas consideradas para este análisis.



Nº	Línea	Código
1	Mantaro-Independencia	L-2203
2	Mantaro-Huancavelica	L-2204
3	Mantaro-Pomacocha	L-2201
4	Mantaro-Pomacocha	L-2202
5	Mantaro-Pachachaca	L-2218
6	Mantaro-Pachachaca	L-2219
7	Mantaro-Huayucachi	L-2220
8	Huayucachi-Zapallal	L-2221
9	Huancavelica-Independencia	L-2231
10	Pomacocha-San Juan	L-2205
11	Pomacocha-San Juan	L-2206
12	Pomacocha-Pachachaca	L-2226
13	Pachachaca-Callahuanca	L-2222
14	Pachachaca-Callahuanca	L-2223
15	Chavarría-Cajamarquilla	L-2015
16	Ica-Marcona	L-2211
17	Independencia-Ica	L-2209
18	San Juan-Independencia	L-2207
19	San Juan-Independencia	L-2208
20	Sta. Rosa-San Juan	L-2010
21	Sta. Rosa-San Juan	L-2011
22	Chavarría-Sta. Rosa	L-2003
23	Chavarría-Sta. Rosa	L-2004
24	Chavarría-Ventanilla	L-2244
25	Chavarría-Ventanilla	L-2245
26	Chavarría-Ventanilla	L-2246
27	Ventanilla-Zapallal	L-2242
28	Ventanilla-Zapallal	L-2243
29	Zapallal-Paramonga	L-2213
30	Paramonga-Chimbote1	L-2215
31	Chimbote1-Trujillo N.	L-2232
32	Chimbote1-Trujillo N.	L-2233
33	Trujillo-Guadalupe	L-2234
34	Guadalupe-Chiclayo O.	L-2236
35	Chiclayo O.-Piura O.	L-2238
36	Piura O.-Talara	L-2248
37	Talara-Zorritos	L-2249

**Tabla 6.11 Líneas consideradas para el análisis de sensibilidad**

Con la finalidad de disminuir el número de candidatos factibles de ubicación física de este dispositivo, se aplicó la técnica de sensibilidad de Orfanogianni (Capítulo III, 3.6.1). Para la aplicación de esta técnica, se analizó en los escenarios de Máxima, Media y Mínima demanda en época de Avenida y Máxima, Media y Mínima demanda en época de Estiaje. Los datos de cargas para los escenarios de avenida y estiaje están mostrados en el anexo E (tabla 6.8 y 6.9), los datos de flujos en líneas para los escenarios de avenida y estiaje en los períodos de máxima, media y mínima demanda son mostrados en el anexo E (figuras 6.6, 6.7, 6.8, 6.9, 6.10 y 6.11). En la figura 6.12, se muestra el escenario de demanda máxima avenida-Proyectada 2008\_Sin TCSC.

La tabla 6.12 muestra el resultado del análisis de sensibilidad. La figura 6.13 y 6.14 nos ilustra estos resultados, en estas figuras podemos observar claramente las líneas que tienen mayor efecto cuando son conectadas en serie a un capacitor.

Nº	Líneas	Código	Avenida			Estiaje		
			u1	u2	U3	u4	u5	u6
1	Mantaro-Independencia	L-2203	540	520	488	551	498	472
2	Mantaro-Huancavelica	L-2204	158	150	140	161	144	135
3	Mantaro-Pomacocha	L-2201	361	305	309	320	283	311
4	Mantaro-Pomacocha	L-2202	361	305	309	320	283	311
5	Mantaro-Pachachaca	L-2218	327	275	284	283	257	292
6	Mantaro-Pachachaca	L-2219	327	275	284	283	257	292
7	Mantaro-Huayucachi	L-2220	164	142	153	162	129	142
8	Huayucachi-Zapallal	L-2221	407	386	431	397	343	398
9	Huancavelica-Independencia	L-2231	405	391	367	413	374	354
10	Pomacocha-San Juan	L-2205	304	269	248	303	245	228
11	Pomacocha-San Juan	L-2206	304	269	248	303	245	228
12	Pomacocha-Pachachaca	L-2226	25	24	19	30	21	13
13	Pachachaca-Callahuanca	L-2222	126	125	136	138	106	122
14	Pachachaca-Callahuanca	L-2223	126	125	136	138	106	122
15	Chavarría-Cajamarquilla	L-2015	44	37	36	50	30	27
16	Ica-Marcona	L-2211	145	138	135	189	138	135
17	Independencia-Ica	L-2209	81	86	71	115	88	72
18	San Juan-Independencia	L-2207	-102	-40	-59	-46	-16	-44
19	San Juan-Independencia	L-2208	-102	-40	-59	-46	-16	-44
20	Sta. Rosa-San Juan	L-2010	74	20	5	27	30	2
21	Sta. Rosa-San Juan	L-2011	72	19	6	27	29	2
22	Chavarría-Sta. Rosa	L-2003	22	-3	5	-7	-7	3
23	Chavarría-Sta. Rosa	L-2004	22	-3	5	-7	-7	3
24	Chavarría-Ventanilla	L-2244	-23	-14	-2	-23	-20	-8
25	Chavarría-Ventanilla	L-2245	-23	-14	-2	-23	-20	-8
26	Chavarría-Ventanilla	L-2246	-23	-14	-2	-23	-20	-8
27	Ventanilla-Zapallal	L-2242	13	14	-5	13	5	-3
28	Ventanilla-Zapallal	L-2243	13	14	-5	12	4	-3
29	Zapallal-Paramonga	L-2213	13	21	153	12	45	127
30	Paramonga-Chimbote1	L-2215	143	96	502	248	311	576
31	Chimbote1-Trujillo N.	L-2232	183	148	223	197	161	182
32	Chimbote1-Trujillo N.	L-2233	188	154	228	203	167	188
33	Trujillo-Guadalupe	L-2234	73	33	174	89	53	106
34	Guadalupe-Chiclayo O.	L-2236	98	45	138	110	36	57
35	Chiclayo O.-Piura O.	L-2238	291	207	391	308	137	117
36	Piura O.-Talara	L-2248	61	22	118	64	23	-18
37	Talara-Zorritos	L-2249	221	181	131	223	182	131

Tabla 6.12 Sensibilidad de líneas

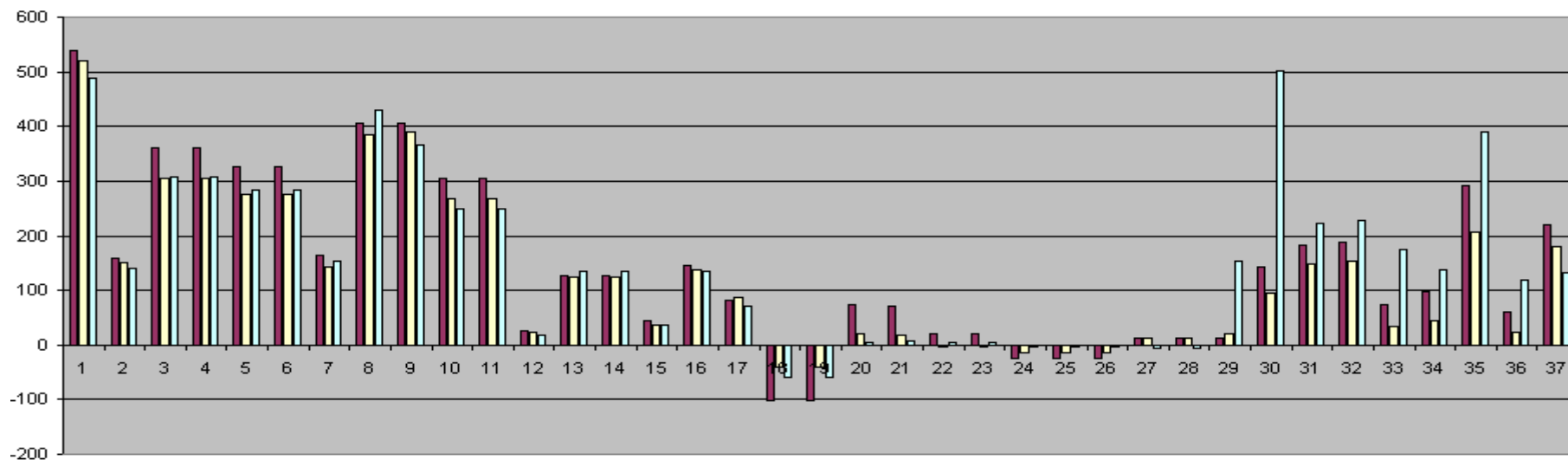


Figura 6.13 Sensibilidad de Líneas para ubicación de TCSC (escenario: Máx-Med-Mín\_Avenida)

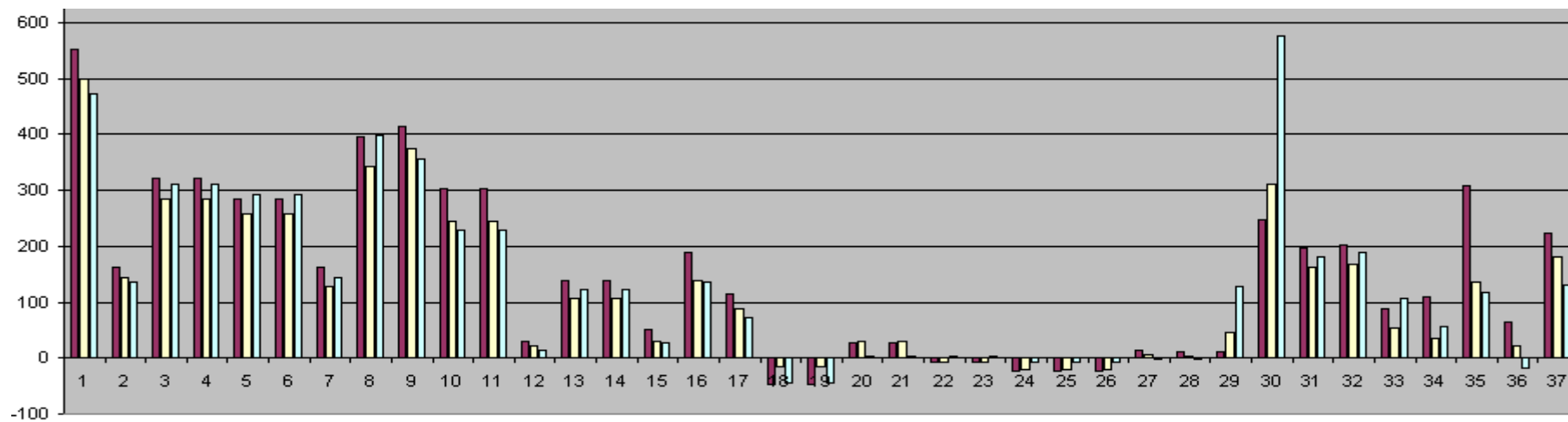


Figura 6.14 Sensibilidad de Líneas para ubicación de TCSC (escenario: Máx-Med-Mín\_Estiaje)

Así, la tabla 6.13, resume las líneas candidatas factibles de ubicación de estos dispositivos.

Línea	Código
Mantaro-Independencia	L-2203
Mantaro-Huancavelica	L-2204
Mantaro-Pomacocha	L-2201
Mantaro-Pachachaca	L-2218
Mantaro-Huayucachi	L-2220
Huayucachi-Zapallal	L-2221
Huancavelica-Independencia	L-2231
Pomacocha-San Juan	L-2205
Pachachaca-Callahuanca	L-2222
Chavarría-Cajamarquilla	L-2015
Ica-Marcona	L-2211
Independencia-Ica	L-2209
San Juan-Independencia	L-2207
Sta. Rosa-San Juan	L-2010
Chavarría-Ventanilla	L-2244
Ventanilla-Zapallal	L-2242
Zapallal-Paramonga	L-2213
Paramonga-Chimbote 1	L-2215
Chimbote 1-Trujillo N.	L-2232
Trujillo-Guadalupe	L-2234
Guadalupe-Chiclayo O.	L-2236
Chiclayo O.-Piura O.	L-2238
Piura O.-Talara	L-2248
Talara-Zorritos	L-2249

**Tabla 6.13 Líneas candidatas para instalación de TCSC**

Las líneas candidatas mostradas en la tabla 13, con los capacitores series instalados en ellas, fueron implementadas en el programa de flujo de potencia. En la figura 6.15, se muestra la implementación de estas líneas y capacitores series en el programa de flujo de potencia DigSILENT. Cada una de estas líneas con sus capacitores series, son candidatos a ser evaluados por la función de desempeño dentro del algoritmo genético. Cabe señalar que, si bien nuestra zona de interés de análisis es el área N° 2, el cálculo de sensibilidades se efectuó para el total de líneas mostradas en la tabla 6.11.

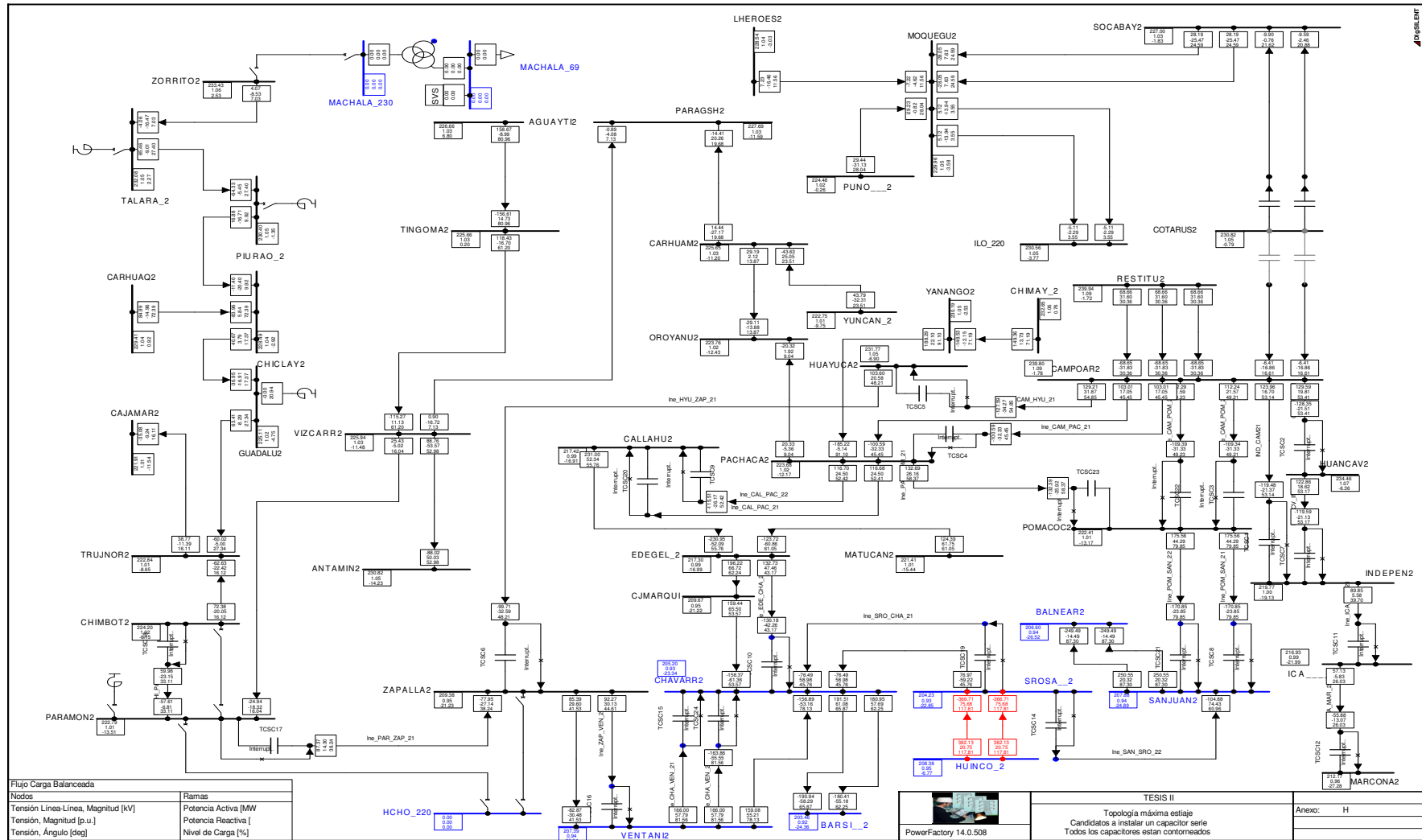


Figura 6.15 SEIN - Líneas Candidatas para ubicación de TCSC

### 6.2.3.2 Población inicial de individuos

Las líneas candidatas de la tabla 6.13, conforman la población inicial de individuos. En la tabla 6.14, se ilustra una población inicial de 8 individuos (individuos padres) y la codificación de bits independientes de ceros y unos, obtenidos en forma aleatoria. Por ejemplo, la primera cadena de cromosomas (individuo 1) es creado por una ruleta de números aleatorios, donde existe un 75% de probabilidad de que se obtenga un cero y un 25% de obtener un “1”, la cual define aquellas líneas en la que se instalara o no un dispositivo. Un “1” indica que se instala un capacitor serie en esa línea y un “0” indica que no hay dispositivo. Cabe indicar que la probabilidad de selección de “ceros y unos” depende del programador, siendo esta un dato de entrada predefinido en el algoritmo de optimización.

Número de	Población inicial de Individuos																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Individuos	L2203	L2204	L2201	L2218	L2220	L2221	L2231	L2205	L2222	L2015	L2211	L2209	L2207	L2010	L2244	L2242	L2213	L2215	L2232	L2234	L2236	L2238	L2248	L2249
1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1
2	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
3	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
4	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1
5	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1
6	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
7	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1
8	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	0	1

Tabla 6.14 Líneas candidatas y población inicial de individuos

El Algoritmo Genético, primero crea la población inicial, cuyos individuos son todos diferentes, es decir la combinación de cromosomas no se repite. Luego evalúa todos y cada uno de estos individuos a través de la función objetivo de tensión en barras y función objetivo de carga en líneas (Capítulo III, 3.6.2.1), esto se hace para todas las configuraciones definidas por los cromosomas.

### 6.2.3.3 Ejecución de Flujo de Potencia

Para la su ubicación óptima del capacitor serie en la red, se realizó con la técnica heurística de Gervex (Capítulo III, 3.6.2.1), se utilizó el lenguaje de programación C++ para correr el algoritmo genético de optimización y se usó el software Power Factory DlgSILENT para correr los casos que el algoritmo de optimización nos indica. Es decir, se utilizó los resultados del flujo de potencia para la evaluación de la aptitud (desempeño) de cada individuo dentro del algoritmo genético.

#### **6.2.3.4 Evaluación de desempeño**

El criterio de optimización es maximizar la cargabilidad del sistema, mediante restricción de optimización multicriterio. Es esto es:

- Límite de cargas de las líneas
- Límites operativos de tensiones en barras

Así el criterio de desempeño según Gervex (Capítulo III, 3.6.2.1) es igual a la unidad.

#### **6.2.3.5 Proceso de selección, cruce y mutación**

Se utilizó una probabilidad de cruce de 80%. Con esta probabilidad de cruce, entre todos los individuos “padres”, se forman parejas aleatorias, se aplica la técnica de cruce a dos puntos y se generan los individuos “hijos” que conforman “nueva población” para la siguiente generación. Cabe señalar que, si un individuo se repite no es necesario evaluarlo nuevamente. Una vez creada la nueva generación, aplicamos los operadores genéticos de mutación para garantizar que la mejor información genética se mantenga, es decir no se generen topologías incoherentes. Finalmente el ciclo se repite hasta alcanzar el objetivo buscado (criterio de desempeño = 1).

Cabe señalar, que la probabilidad de selección de “cruce” depende del programador, siendo esta un dato también de entrada predefinido por el programador en el algoritmo de optimización.

#### **6.2.3.6 Resultados**

Para la presente aplicación, se incrementó la carga del SEIN en forma gradual respecto al año base (2006) con el propósito de obtener violaciones de flujo en las líneas o violaciones de tensión en las barras. Se espera de esta manera que la instalación de dispositivos FACTS (en esta aplicación TCSC), nos permita corregir las violaciones encontradas, incrementando así la cargabilidad del sistema de potencia.

Al ir aumentando la carga gradualmente, al 20% de la carga base (este porcentaje de carga es equivalente a la carga proyectada para el año 2008), se comenzaron a registrar violaciones de cargas en distintas líneas y tensiones al límite de rango en distintas barras del SEIN. La figura 6.16 (anexo E) muestra este escenario, la tabla 6.15 resume las tensiones al límite permitido en las barras principales para una generación total de 3483,35 MW, sin instalación de TCSC (capacitor serie).

Barra de 220 kV	Tensión (p.u.)
San Juan	0.96
Balnearios	0.95
Santa Rosa	0.95
Chavaría	0.95
Ventanilla	0.96

**Tabla 6.15 Tensiones en barras principales sin TCSC**

En lo que respecta a las simulaciones efectuadas. Para encontrar la ubicación óptima de capacitores series en el SEIN (área N° 2, zona Lima Centro), se utilizó una población inicial de 24 líneas candidatas y 8 individuos padres. Los parámetros empleados para estas simulaciones son: 25% de probabilidad de instalación de un capacitor y 80% de probabilidad de cruce. La solución se encontró en la generación N° 13 y se efectuaron un total 48 corridas de flujo de potencia, esto nos indica que el AG logró una evolución de su población inicial hasta dar con este individuo objetivo.

La mejor solución obtenida para el SEIN consta de la instalación de dos TCSC; uno en la línea L-2203 y otro en la L-2231. Para esta etapa, inicialmente se asumió, la compensación serie de las líneas al 50% en estado estacionario. Es decir, la impedancia del TCSC como una impedancia fija (modo tiristor bloqueado), cuyo valor de impedancia consideramos al 50% de la impedancia de la línea.

### 6.2.3.7 Cálculo de parámetros del TCSC

Para el cálculo de los parámetros del TCSC, se siguió los siguientes pasos:

1ª.- Se calculo, en forma horaria las reactancias variables del TCSC ( $X_{TCSC}$ ), de cada equipo instalado en serie con las líneas L-2203 y L-2231. Para ello, se utilizó despachos horarios de un día típico del SEIN y se fue variando la reactancia ( $X_{TCSC}$ ) en el DigSilent, de manera que se obtenga flujos máximos en las líneas L-2203 y L-2231 (Aprox. 152 MVA en cada línea), según lo indicado en (Capítulo III, 3.5.2).

2ª.- Para cada hora se aplicó la expresión indicada en (3.1), para el cálculo de la reactancia variable ( $X_L$ ). La tabla 6.16 y tabla 6.17 muestran los detalles de lo indicado.

3ª.- Para los valores de reactancia obtenidos y utilizando la expresión dada en (3.2), el ángulo de resonancia se localiza gráficamente hallando el ángulo de disparo de los tiristores ( $\alpha$ ), esto se ilustra en las figuras 6.17 y 6.18.

Así, los parámetros obtenidos son los siguientes:

**$X_{TCSC}(L-2203)$ :**

$$C = 1/(w * X_C) = 1/(377 * 40.08) = 66.3 \text{ uF.}$$

$$L = X_L/w = 20.04/377 = 53.1 \text{ mH.}$$

$$\alpha_{\min} = 63^\circ$$



**XTCSC(L-2231):**

$$C = 1/(w \cdot X_c) = 1/(377 \cdot 37.5) = 70.7 \text{ uF.}$$

$$L = X_L/w = 18.75/377 = 49.7 \text{ mH.}$$

$$\alpha_{\min} = 65.3^\circ$$

		SECA	SEIN	SECA	SEIN			L-2203	
	Pot. Máx.	V1	V2	d1	d2	d1-d2	Sen(d1-d2)	Xtcsc	XL
horas	MW	kV	kV	grados	grados	grados		$\Omega$	$\Omega$
1:00	148	239,80	219,45	8,25	-6,8	0,263	0,260	39,37	19,86
2:00	148	239,63	219,11	9,15	-7,40	0,289	0,285	30,65	17,37
3:00	148	239,50	219,41	8,45	-9,48	0,313	0,308	22,40	14,37
4:00	148	238,40	218,32	10,25	-8,99	0,336	0,330	15,82	11,34
5:00	148	238,10	218,45	10,42	-7,89	0,320	0,314	21,30	13,91
6:00	148	237,40	217,11	11,12	-6,87	0,314	0,309	24,14	15,07
7:00	148	237,40	217,45	11,25	-4,12	0,268	0,265	39,25	19,83
8:00	148	235,40	217,10	13,45	-4,12	0,307	0,302	27,46	16,30
9:00	148	235,10	215,32	13,48	-4,50	0,314	0,309	26,12	15,81
10:00	148	234,21	214,21	13,99	-2,15	0,282	0,278	37,50	19,37
11:00	148	234,15	214,15	14,66	-1,35	0,279	0,276	38,26	19,57
12:00	148	233,20	213,20	15,22	-1,25	0,287	0,284	36,46	19,09
13:00	148	233,12	213,12	16,45	0,54	0,278	0,274	39,68	19,94
14:00	148	233,10	213,20	16,80	0,76	0,280	0,276	38,92	19,75
15:00	148	233,10	212,48	16,80	0,75	0,280	0,276	39,18	19,81
16:00	148	232,80	213,48	19,88	3,46	0,287	0,283	36,78	19,18
17:00	148	231,20	211,54	19,66	3,45	0,283	0,279	39,45	19,88
18:00	148	231,11	210,50	19,88	3,58	0,284	0,281	39,45	19,88
19:00	148	231,30	210,12	20,84	4,65	0,283	0,279	40,14	20,06
20:00	148	231,40	211,32	20,84	4,65	0,283	0,279	39,58	19,91
21:00	148	232,50	212,50	20,48	4,55	0,278	0,274	40,08	20,04
22:00	148	234,60	214,60	18,25	2,25	0,279	0,276	37,94	19,49
23:00	148	238,45	218,70	15,3	-1,28	0,289	0,285	31,16	17,53
0:00	148	238,40	218,99	11,9	-4,8	0,291	0,287	30,34	17,27

**Tabla 6.16 Parámetros del TCSC ubicado en la L-2203**

		SEIN	SEHUANSEIN	SEHUAN				L-2231	
	Pot. Máx.	V1	V2	d1	d2	d1-d2	Sen(d1-d2)	Xtcsc	XL
horas	MW	kV	kV	grados	grados	grados		$\Omega$	$\Omega$
1:00	148	219,45	234,75	3,5	-6,8	0,180	0,179	33,57	17,71
2:00	148	219,11	234,22	2,97	-7,40	0,181	0,180	33,39	17,66
3:00	148	219,41	235,52	0,98	-9,48	0,183	0,182	32,42	17,39
4:00	148	218,32	234,43	1,38	-8,99	0,181	0,180	33,56	17,71
5:00	148	218,45	234,71	2,49	-7,89	0,181	0,180	33,39	17,66
6:00	148	217,11	233,22	3,55	-6,87	0,182	0,181	33,93	17,81
7:00	148	217,45	233,45	6,19	-4,12	0,180	0,179	34,42	17,95
8:00	148	217,10	233,90	6,18	-4,12	0,180	0,179	34,46	17,96
9:00	148	215,32	231,43	5,82	-4,50	0,180	0,179	35,49	18,23
10:00	148	214,21	230,32	8,33	-2,15	0,183	0,182	35,20	18,16
11:00	148	214,15	231,26	8,78	-1,35	0,177	0,176	36,96	18,61
12:00	148	213,20	230,50	9,11	-1,25	0,181	0,180	36,10	18,39
13:00	148	213,12	229,12	10,80	0,54	0,179	0,178	37,05	18,64
14:00	148	213,20	228,31	11,07	0,76	0,180	0,179	36,95	18,61
15:00	148	212,48	229,59	11,06	0,75	0,180	0,179	36,82	18,58
16:00	148	213,48	229,30	14,12	3,46	0,186	0,185	34,63	18,00
17:00	148	211,54	228,65	14,12	3,45	0,186	0,185	35,30	18,18
18:00	148	210,50	228,50	14,10	3,58	0,184	0,183	36,47	18,49
19:00	148	210,12	229,51	14,96	4,65	0,180	0,179	37,49	18,75
20:00	148	211,32	228,62	14,94	4,65	0,180	0,179	37,50	18,75
21:00	148	212,50	229,61	14,86	4,55	0,180	0,179	36,81	18,58
22:00	148	214,60	231,71	12,55	2,25	0,180	0,179	35,74	18,30
23:00	148	218,70	235,81	10,2	-1,28	0,200	0,199	26,46	15,51
0:00	148	218,99	235,10	5,99	-4,8	0,188	0,187	30,69	16,88

**Tabla 6.17 Parámetros del TCSC ubicado en la L-2231**

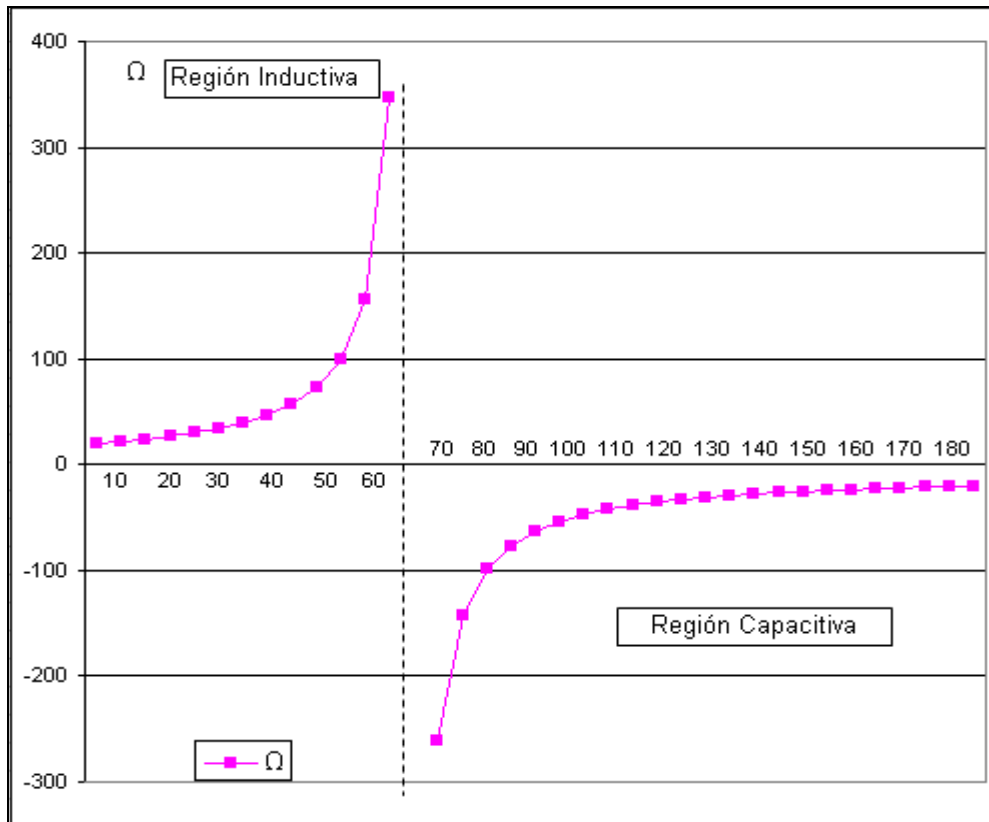


Figura 6.17 Ángulo de disparo del TCSC ubicado en la L-2203

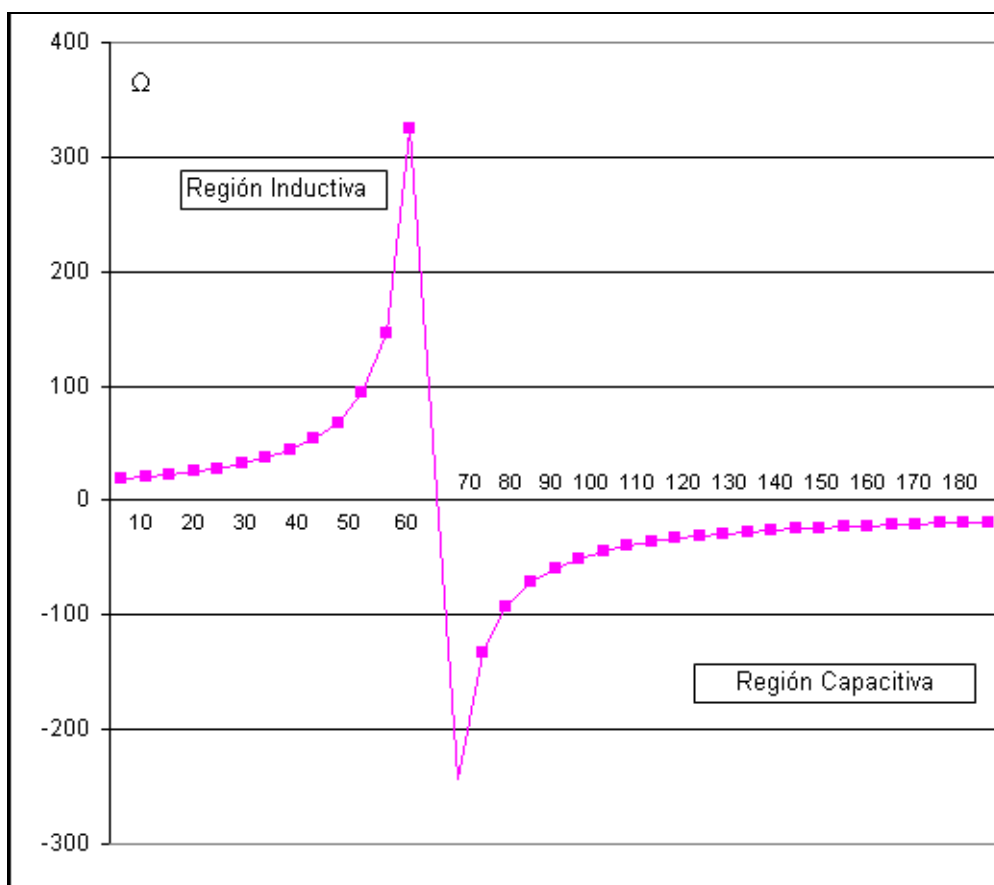


Figura 6.18 Ángulo de disparo del TCSC ubicado en la L-2231

La solución obtenida para el SEIN consta de la instalación de dos TCSC; uno en la línea L-2203 y otro en la L-2231. Las reactancias capacitivas de estos dispositivos son de 40 y 37.5  $\Omega$  respectivamente. Cabe indicar, que es necesario un análisis dinámico para definir con exactitud la reactancia que optimice el funcionamiento de estos dispositivos. La figura 6.19 (anexo E), muestra este escenario y la tabla 6.18 muestra las tensiones en barras principales para una generación total de 3747,56 MW, con la instalación de TCSC (capacitores series).

Barra de 220 kV	Tensión (p.u.)
San Juan	0.99
Balnearios	0.98
Santa Rosa	0.98
Chavarría	0.98
Ventanilla	0.99

**Tabla 6.18 Tensiones en barras principales con TCSC**

La figura 6.20 (anexo E), muestra las tensiones en barras y flujo en las líneas en el escenario de Máx. Dem. Avenida con el TCSC instalados (modo tiristor bloqueado) en las líneas L-2203 y L-2231. La figura 6.21 (anexo E), muestra las tensiones en barras y flujo en las líneas el escenario de Máx. Dem. Estiaje con el TCSC instalados (modo tiristor bloqueado) en las líneas L-2203 y L-2231. En ambos escenarios se observa una mejor distribución de flujos en las líneas.

Los resultados de las simulaciones, también muestran la necesidad de mayor generación local en esta área debido a la mayor concentración de carga en las subestaciones de Lima (SE's de Chavarría, San Juan, Sta. Rosa e Independencia).

La tabla 6.19 resume las tensiones en las barras principales de 220 kV de la zona de Lima y los flujos en las líneas que vienen de la central hidroeléctrica del Mantaro en las topologías: sin compensación y con compensación serie instalados en las líneas L-2203 y L-2231. En esta tabla podemos observar una mejora en los perfiles de tensiones en las barras principales de 220 kV y una mejor distribución de flujo en las líneas. Se observa también que las líneas L-2203 y L-2231 están al máximo de su capacidad (152 MVA).

	Sin TCSC	Con TCSC
Generación →	3483,35 MW	3747,56 MW
Tensión en barras de 220 kV		
San Juan	0.96 p.u.	0.99 p.u.
Balnearios	0.95 p.u.	0.98 p.u.
Santa Rosa	0.95 p.u.	0.98 p.u.
Chavarría	0.95 p.u.	0.98 p.u.
Ventanilla	0.96 p.u.	0.99 p.u.
Flujo en líneas (MW)		
L-2203	128.65	145.97
L-2231	127.37	140.71
L-2204	134.77	148.71
L-2201	116.03	71.90
L-2202	115.98	71.87
L-2205	160.50	132.87
L-2206	160.50	132.92
L-2218	109.51	82.92
L-2219	109.50	82.91
L-2220	130.88	95.46

**Tabla 6.19 Resumen de escenario con y sin TCSC**

### Conclusión:

-Con la ubicación óptima de TCSC (capacitores series), se logra una mejor distribución de flujos en las líneas que vienen de la C.H. Mantaro

-Las líneas L-2205 y L-2206 continúan con sobrecargas, lo cual nos estaría indicado la necesidad de ser repotenciadas o en todo caso la necesidad de tener mayor generación local en esta zona de Lima.

-Sin los capacitores instalados, con una generación total de 3483.35 MW se obtienen tensiones al límite permitido (0.95 p.u.) en las barras principales de Lima. Con los capacitores instalados, se obtiene un mejor perfil de tensiones en estas mismas barras y se logra un incremento en la generación de 3483.35 a 3747.56 MW. Lo cual nos permite atender una mayor demanda sin la necesidad de construcción de nuevas o en todo caso nos indica la postergación en la construcción de nuevas líneas por un periodo equivalente a la carga proyectada.

### Red mejorada

Nuestra red mejorada considera la instalación de compensación serie; uno en la línea L-2203 y otro en la L-2231 con reactancias de 40 y 37.5  $\Omega$  respectivamente.

#### 6.2.4 Expansión de la Red Mejorada (2º)

De acuerdo a la metodología propuesta, con la topología mejorada del SEIN, ahora nuestro objetivo es elaborar el Plan de Expansión del Sistema de Transmisión para evitar las congestiones actuales y futuras. El plan debe definir un programa de equipamiento de

líneas de transmisión que permita garantizar la calidad, continuidad y oportunidad del sistema.

Sin pérdida de generalidad, a efectos de mostrar la metodología, se efectuara el análisis en la zona Lima, por ser la zona de mayor crecimiento de demanda del SEIN. Así mismo, se considerará el ingreso del gran parque de generación a vapor debido al aprovechamiento masivo del gas de Camisea, ubicado en la zona sur de Lima. El estudio definirá la expansión óptima del sistema de transmisión para el período 2006-2015.

Los datos de la red del SEIN son obtenidos del estudio del Plan de Expansión de Rep [40]. De este estudio, se considera los siguientes datos para el presente análisis:

#### **6.2.4.1 Determinación de líneas candidatas**

Para esta etapa, se considera el conjunto de posibles nuevos circuitos. Así, consideramos lo siguiente:

-En las franjas de servidumbres existentes, se considera la posibilidad de tener hasta dos ternas paralelas (líneas de refuerzo).

-En las franjas de servidumbres nuevas, se considera la posibilidad de tener hasta tres ternas paralelas (líneas nuevas).

-De acuerdo a lo indicado anteriormente, se considera el gran parque de generación ubicado en la zona Sur de Lima, la subestación lleva por nombre SE Chilca y el total de generación proyectada es de 900 MW de acuerdo a lo indicado en el estudio del Plan de Expansión del sistema de Transmisión de Red de Energía del Perú (tabla 6.3 Escenarios de Expansión de Generación)

Con estas consideraciones, en la tabla 6.20, se muestran las líneas candidatas consideradas en la presente etapa del estudio.

De	A	Descripción	Tipo de línea	Long. (km)
San Juan	Independencia	Línea simple terna	Refuerzo	216.2
San Juan	Independencia	Línea doble terna	Refuerzo	216.2
Chilca	Independencia	Línea simple terna	Nuevo	116.0
Chilca	Independencia	Línea doble terna	Nuevo	116.0
Chilca	Independencia	Línea triple terna	Nuevo	116.0
Chilca	San Juan	Línea simple terna	Nuevo	61
Chilca	San Juan	Línea doble terna	Nuevo	61
Chilca	San Juan	Línea triple terna	Nuevo	61
Chilca	Sta. Rosa	Línea simple terna	Nuevo	87.3
Chilca	Sta. Rosa	Línea doble terna	Nuevo	87.3
Chilca	Sta. Rosa	Línea triple terna	Nuevo	87.3
Chilca	Chavarría	Línea simple terna	Nuevo	95.65
Chilca	Chavarría	Línea doble terna	Nuevo	95.65
Chilca	Chavarría	Línea triple terna	Nuevo	95.65
Chilca	Ventanilla	Línea simple terna	Nuevo	106.7
Chilca	Ventanilla	Línea doble terna	Nuevo	106.7
Chilca	Ventanilla	Línea triple terna	Nuevo	106.7
Chilca	Zapallal	Línea simple terna	Nuevo	120.4
Chilca	Zapallal	Línea doble terna	Nuevo	124.7
Chilca	Zapallal	Línea triple terna	Nuevo	124.7
San Juan	Sta. Rosa	Línea simple terna	Refuerzo	26.3
San Juan	Sta. Rosa	Línea doble terna	Refuerzo	26.3
Sta. Rosa	Chavarría	Línea simple terna	Refuerzo	8.35
Sta. Rosa	Chavarría	Línea doble terna	Refuerzo	8.35
Chavarría	Ventanilla	Línea simple terna	Refuerzo	10.56
Chavarría	Ventanilla	Línea doble terna	Refuerzo	10.56
Ventanilla	Zapallal	Línea simple terna	Refuerzo	18.0
Ventanilla	Zapallal	Línea doble terna	Refuerzo	18.0
Chilca	Ica	Línea simple terna	Nuevo	95
Chilca	Ica	Línea doble terna	Nuevo	95
Chilca	Ica	Línea triple terna	Nuevo	95
Chilca	Marcona	Línea simple terna	Nuevo	170
Chilca	Marcona	Línea doble terna	Nuevo	170
Chilca	Marcona	Línea triple terna	Nuevo	170
Ica	Marcona	Línea simple terna	Nuevo	155
Ica	Marcona	Línea doble terna	Nuevo	155

**Tabla 6.20 Líneas candidatas**

Cabe señalar, que en esta etapa podemos considerar también la propuesta del Plan Referencial de Electricidad del MINEM período 2005-2014 para el escenario de crecimiento de Demanda Media. La tabla 6.21 muestra las líneas propuestas en el Plan Referencial de Electricidad del MINEM. Las líneas candidatas consideradas en la tabla 6.20 incluyen los proyectos del Plan Referencial de Electricidad del MINEM que corresponden al área de estudio.

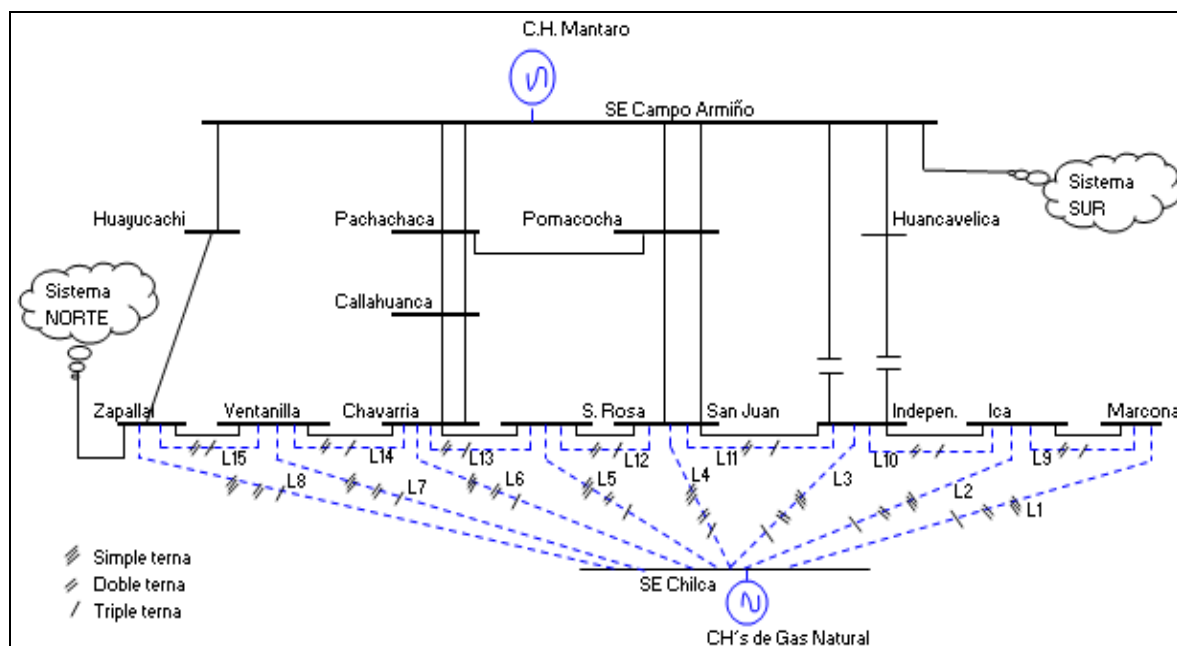
En cuanto a compensación reactiva se considera las del Plan Referencial del MINEM, correspondientes a la zona de interés del presente estudio.

Año	Proyecto	Características	Observaciones
<b>A) Líneas de Transmisión</b>			
2006	Carhuaquero – Jaén 138 kV	140 km	Interconexión sistema aislado Bagua – Jaén
2007	Línea de Transmisión Chilca - San Juan 220kV	50 km	Repotenciación de Línea Existente
	Línea de Transmisión Chilca - San Juan 220kV	50 km	2do. Circuito L-2208
	LT - Una terna Chilca - San Juan 220kV	50 km	L-2090
	LT - Una terna Chilca - San Juan 220kV	50 km	L-2090
2008	Segunda terna Zapallal – Chimbote	382 km	
	Línea 138 kV y 66 kV San Gabán – Mazuco – Puerto Maldonado	225 km	Interconexión sistema aislado Puerto Maldonado
2009	Cotaruse Machupicchu 220 kV	170 km	
	Cajamarca – Caclic – Moyabamba 220 kV	246 km	Interconexión sistema aislado Moyabamba – Tarapoto - Bellavista
2010	Reforzamiento Carhuamayo – Paragsha 220 kV	100 km	
2014	Cambio de tensión de operación a 500 kV Línea de transmisión Chilca – Zapallal	120 km	
	Reforzamiento línea San Juan - Balnearios	10 km	Reforzamiento de conductor
<b>B) Compensación Reactiva</b>			
2007	Banco de condensadores en Santa Rosa	30 Mvar	
	Banco de condensadores en Chavarria	30 Mvar	
2008	Banco de condensadores en Trujillo	30 Mvar	
	Banco de condensadores en Chiclayo	30 Mvar	
2014	Banco de condensadores en Cajamarca	15 Mvar	
	Banco de condensadores en Chimbote	35 Mvar	

**Tabla 6.21 Propuesta Plan Referencial de Electricidad del MINEM**

Fuente: Ministerio de Energía y Minas. Plan Referencial de Electricidad del Ministerio de Energía y Minas periodo 2005 – 2014 [1]

La figura 6.22 ilustra el total de líneas candidatas (trazos punteados) las líneas existentes (trazo continuo) y la generación en la SE Chilca consideradas en esta etapa de estudio.



**Figura 6.22 Líneas candidatas y líneas existentes**

La representación en el software DigSILENT se muestra en la figura 6.23

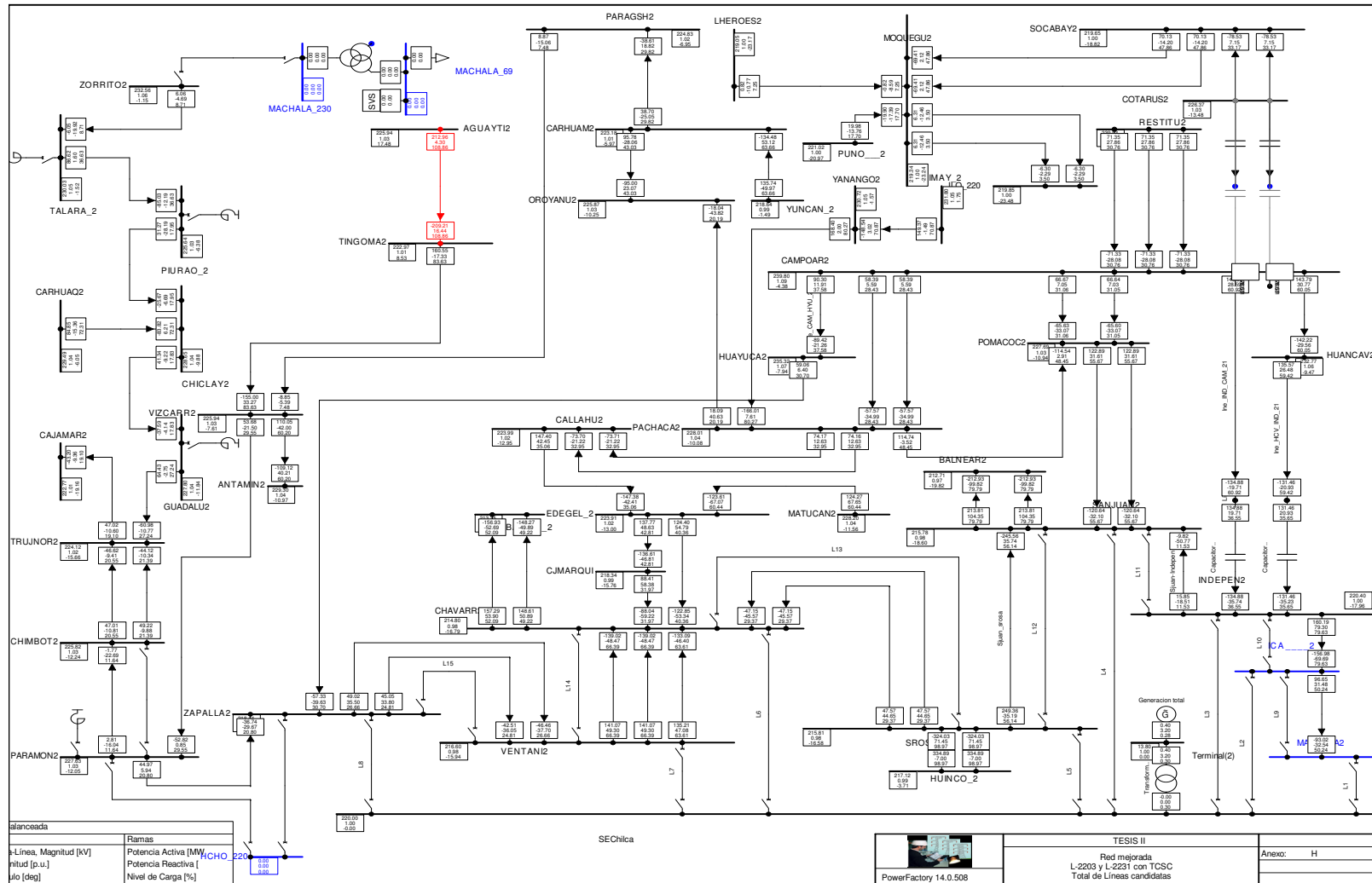


Figura 6.23 Representación de líneas candidatas en el DigSILENT



**6.2.4.2 Selección aleatoria de líneas**

Las líneas candidatas de la tabla 6.20, conforman el total de posibles líneas a analizar. Cada posible combinación de estas de líneas conforman una topología diferente a analizar y cada topología diferente representa un individuo diferente y por ende una alternativa de expansión.

En la tabla 6.22, se ilustra una población inicial de 8 individuos (individuos padres) y la codificación por bits independientes de ceros y unos, obtenidos en forma aleatoria. Por ejemplo, la primera cadena de cromosomas (individuo 1) es creado por una ruleta de números aleatorios, con 75% de probabilidad de que se obtenga un cero y 25% de obtener un “1”. Un “1” indica que tal línea se debe de considerar en el individuo que corresponde y un “0” indica que no se considera tal línea en ese individuo. Cabe indicar que la probabilidad de selección de “ceros y unos” depende del programador, siendo esta un dato de entrada predefinido en el algoritmo de optimización.

Número de Individuos	Población inicial de individuos																																											
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12	L13	L14	L15																													
1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1				
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0
3	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	
4	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	
5	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	
6	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	
7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	
8	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	

**Tabla 6.22 Líneas candidatas y población inicial de individuos**

Se analizan un total de 38 líneas candidatas, ordenadas de la siguiente manera:

- 8 líneas de ternas simples en franjas de servidumbres nuevas;
- 8 líneas de ternas dobles en franjas de servidumbres nuevas;
- 8 líneas de ternas triples en franjas de servidumbres nuevas;
- 7 líneas de ternas simples en franjas de servidumbres existentes;
- 7 líneas de ternas dobles en franjas de servidumbres existentes.

**6.2.4.3 Individuo**

El Algoritmo Genético, primero crea la población inicial, cuyos individuos son todos diferentes, es decir la combinación de cromosomas no se repite. Luego evalúa todos y cada uno de estos individuos a través de la función objetivo (fitness) de carga en líneas (Capítulo III, 3.6.2.1), esto se hace para todas las configuraciones definidas por los

cromosomas. La función objetivo representa el costo total de las líneas que se deben de adicionar a la red inicial para cumplir con los requerimientos de demanda proyectada. También, se debe de evaluar la función de penalización la cual representa el racionamiento de carga o potencia no servida (PNS) por la propuesta de inversión. La PNS representa la suma total de los generadores ficticios que se deben de adicionar a la red para que el sistema opere adecuadamente.

#### **6.2.4.4 Nueva topología de la red de transmisión**

Cada individuo (padre o descendiente), es representada en el software DigSILENT. Esta representación es sencilla debido a que en este software son dibujados todas las líneas candidatas como líneas simples, con la opción de *número de ternas* se van considerando las diferentes topologías que indica cada individuo padre o individuo generado.

#### **6.2.4.5 Ejecución de Flujo de Potencia**

Para la ubicación óptima de la topología a escoger (individuo objetivo), se realizó con la técnica heurística de Gervex (Capítulo III, 3.6.2.1), se utilizó el lenguaje de programación C++ para correr el algoritmo genético de optimización y se usó el software Power Factory DlgSILENT para correr los casos que el algoritmo de optimización nos indica. Es decir, se utilizó los resultados del flujo de potencia para la evaluación de la aptitud de cada individuo dentro del algoritmo genético.

#### **6.2.4.6 Evaluar sobrecargas**

El criterio de optimización es: Límite de cargas en las líneas.

Así el criterio de desempeño según Gervex (Capítulo III, 3.6.2.1) es evaluada de la siguiente manera:

-Si en una topología determinada, no existen sobrecargas en líneas, entonces se evalúa la función objetivo (Función de Aptitud= $1/C$ ), que es la inversa del costo. Este “acomodo” se hace con la intención de maximizar la función objetivo. Es decir, si la función objetivo es máxima, entonces el costo de la topología elegida será la mínima.

-Si en una topología determinada, existiera alguna sobrecargas en líneas, entonces se evalúa la función objetivo (Función de Aptitud= $1/C+Cr$ ). Esto se hace, pues en algunos casos pudiera ser imposible de obtener un racionamiento igual a cero o una PNS nula. En este caso, es necesario obtener el costo de racionamiento. Este último, también nos podría indicar que la solución de la función objetivo no depende de la construcción de nuevas líneas, podría depender de la necesidad de mayor generación local, necesidad de mayor compensación reactiva, etc.

#### **6.2.4.7 Proceso de selección, cruce y mutación**

Se utilizó una probabilidad de cruce de 80%. Con esta probabilidad de cruce, entre todos los individuos se forman parejas aleatorias y a partir de un cruce a dos puntos se generan los individuos hijos que conforman la población para la siguiente generación. Si un individuo se repite no es necesario evaluarlo nuevamente. Una vez creada la nueva generación se aplican los operadores de mutación de manera de garantizar que la mejor información genética se mantenga intacta de generación en generación. Finalmente el ciclo se repite hasta alcanzar el objetivo buscado (función objetivo). Cabe indicar que la probabilidad de selección de "cruce" depende del programador, siendo esta un dato también de entrada predefinido por el programador en el algoritmo de optimización.

#### **6.2.4.8 Función de Aptitud**

Como se detallo anteriormente, cada línea candidata o conjunto de líneas candidatas de nuevos circuitos tiene un costo asociado. Nuestro objetivo es encontrar un conjunto de alternativas que represente el mínimo costo total de inversión, de manera que permita una operación adecuada del sistema de transmisión.

Para encontrar la topología óptima de la red que permita atender la demanda actual y proyectada en el SEIN, se utilizó una población inicial de 38 líneas candidatas y 8 individuos padres. Los parámetros empleados para estas simulaciones son: 25% de probabilidad de instalación de una línea, 80% de probabilidad de cruce, 1% de mutación, tipo de selección por ruleta y 2 puntos de cruce.

La mejor solución se encontró en la generación N° 10 y se efectuaron un total 57 corridas de flujo de potencia, esto nos indica que el AG logró una evolución de su población inicial hasta dar con este individuo objetivo. La solución encontrada tiene un valor de costo de inversión en transmisión de 47904 \$, un corte de carga 0 MW hasta el año 2011. Para los años siguientes, es necesario mayor generación en esta área, pues en las simulaciones es necesario disponer de generación térmica para dar margen a la C.H. de Huinco, encargada de la regulación de frecuencia.

La tabla 6.23, ilustra los resultados de la función de aptitud encontrada para la generación N° 10, la topología del individuo ubicado en la posición 8, muestra el valor de la función de aptitud máxima encontrada y por ende corresponde a la opción más económica.

Número de Individuos	Población de individuos (décima generación)															Función Aptitud f(10)																																				
	L1			L2			L3			L4			L5				L6			L7			L8			L9			L10			L11			L12			L13			L14			L15								
1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,917
2	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1,829			
3	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0,818						
4	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1,478						
5	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1,258						
6	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1,310						
7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1,880						
8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	2,261						

Tabla 6.23 Función de aptitud de generación N° 10

#### 6.2.4.9 Costo de inversión

Las topologías de los individuos ubicados en las posiciones 1 y 3, también cumplen con la condición “racionamiento de energía igual a cero”. La tabla 6.24 resume las tres alternativas encontradas, su correspondiente función de aptitud y su costo asociado. Para este resultado se ha considerado un costo promedio de construcción de líneas de 220 kV en la costa, igual a 120 mil \$/km.

Línea	Característica	Función Aptitud	Costo Asociado U. \$
Chilca – Independencia	Doble terna (nueva)	2.261	47904.0
Chilca - San Juan	Triple terna (nueva)		
San Juan - Sta. Rosa	Simple terna (refuerzo)		
Sta. Rosa - Chavarría	Simple terna (refuerzo)		
Chavarría – Ventanilla	Simple terna (refuerzo)		
Chilca – Independencia	Doble terna (nueva)	1.917	56500.2
Chilca - San Juan	Triple terna (nueva)		
Chilca – Sta Rosa	Simple terna (nueva)		
Chilca – Chavarría	Simple terna (nueva)		
San Juan - Sta. Rosa	Simple terna (refuerzo)		
Sta. Rosa – Chavarría	Simple terna (refuerzo)		
Chavarría – Ventanilla	Simple terna (refuerzo)	0.818	132409.5
Chilca – Ica	Simple terna (nueva)		
Chilca – Independencia	Doble terna (nueva)		
Chilca - San Juan	Triple terna (nueva)		
Chilca – Sta Rosa	Doble terna (nueva)		
Chilca – Chavarría	Simple terna (nueva)		
Chilca – Vetanilla	Simple terna (nueva)		
Chilca – Zapallal	Simple terna (nueva)		
Independencia – Ica	Simple terna (refuerzo)		
San Juan - Independencia	Doble terna (refuerzo)		
San Juan – Sta. Rosa	Doble terna (refuerzo)		
Sta. Rosa – Chavarría	Simple terna (refuerzo)		
Chavarría – Ventanilla	Simple terna (refuerzo)		

Tabla 6.24 Costo de Alternativas encontradas

#### **6.2.4.10 Selección del plan**

Si bien, las tres alternativas encontradas cumplen con la condición (racionamiento de energía igual a “cero”), el resultado escogido no solamente corresponde a la alternativa más económica, sino que también a la topología más factible debido a que la segunda y tercera alternativa corresponden a un mayor número de líneas a construir.

Por lo tanto, la solución encontrada corresponde a la cantidad de líneas de transmisión que se deben construir. Este “individuo” tiene asociado un costo de expansión de 47904 miles de dólares y costo de racionamiento igual cero.

## Conclusiones

1. En este trabajo, se propuso una metodología para la expansión del sistema de transmisión la cual considera el uso y ubicación óptima de dispositivos FACTS en un SEP. La metodología nos permite planificar el sistema de transmisión bajo una perspectiva de tener un control de flujo de potencia en las líneas, permitiéndonos primero optimizar el sistema de transmisión antes de ver la necesidad de construcción de nuevas líneas.
2. En esta tesis, se realizó una evaluación dentro del marco del planeamiento estático del sistema de transmisión, y nos permitió poder determinar lo siguiente:
  - Primero, cuánto se puede mejorar la cargabilidad del SEIN con una mejor distribución de flujo en las líneas; y
  - Segundo, qué líneas se deben de construir para atender la demanda proyectada. Así, la metodología nos permitió encontrar soluciones operativamente viables.
3. En la etapa de optimización de la red existente (1° etapa), se aplicó la técnica basada en sensibilidades, el cual nos permitió encontrar las líneas factibles para la instalación de un capacitor serie. Para la ubicación óptima de este dispositivo, las líneas candidatas fueron implementadas en el programa de flujo de potencia DigSILENT. Con los resultados de flujos de potencia, los candidatos fueron evaluados por la función de aptitud en un proceso iterativo dentro del algoritmo genético (AG). Los resultados nos indicaron la instalación de dos capacitores series con reactancias de 40 y 37.5  $\Omega$  ubicadas en las líneas L-2203 y L-2231 respectivamente. Con la cual, se logró una mejor distribución de flujos de potencia en las líneas que vienen de la C.H. Mantaro. Para ello, se efectuó el análisis en el modo operativo capacitivo y bloqueo de sus tiristores (punto límite donde la impedancia del TCSC es capacitiva pura), y hemos representado como un capacitor serie fijo. Cabe indicar que, si se desea instalar un capacitor serie controlado por tiristores (TCSC), los parámetros de este dispositivo fueron calculados gráficamente según (6.2.3.7).
4. En la etapa de expansión de la red mejorada (2° etapa), se aplicó la técnica basada en descomposición de Benders, utilizando el algoritmo genético para resolver el problema de expansión y un flujo de potencia en la solución del problema de operación. Las líneas candidatas fueron determinadas en forma aleatoria considerando líneas nuevas y de refuerzos. Se consideró el proyecto de generación ubicado en la SE Chilca. Las líneas candidatas fueron implementadas en el programa de flujo de potencia DigSILENT. Con

los resultados de flujos de potencia, los candidatos fueron evaluados por la función de aptitud en un proceso iterativo dentro del AG.

Los resultados indicaron la construcción de 3 líneas paralelas en la franja de servidumbre nueva (SE Chilca – SE San Juan), 2 líneas paralelas nuevas en franja de servidumbre nueva (SE Chilca – SE Independencia) y 3 líneas simples de refuerzo que une las subestaciones de Lima (SE San Juan – SE Sta. Rosa – SE Chavarría – SE Ventanilla). El costo de las mismas asciende a un monto de 47904. miles \$. Con lo cual nos permite atender los requerimientos de demanda proyectada.

Líneas	Características
Chilca - San Juan	Triple terna (nueva)
Chilca – Independencia	Doble terna (nueva)
San Juan - Sta. Rosa	Simple terna (refuerzo)
Sta. Rosa - Chavarría	Simple terna (refuerzo)
Chavarría – Ventanilla	Simple terna (refuerzo)

5. Sin los capacitores instalados en el SEIN, con una generación total de 3483.35 MW se obtuvieron tensiones al límite permitido (0.95 p.u.) en las barras principales de Lima. Con los capacitores instalados, se logró mejorar el perfil de tensiones en estas mismas barras y un incremento en la generación de 3483.35 a 3747.56 MW. Lo cual nos permitió atender una mayor demanda sin la necesidad de construcción de nuevas líneas por un periodo equivalente a la demanda considerada.
6. El presente trabajo ha logrado, plantear una metodología que permite analizar el problema de la expansión y operación de la transmisión de un SEP. La metodología, esta basada en flujos de potencia activa y reactiva en las líneas. Con los resultados del flujo de potencia, se efectuó el cálculo de la aptitud de cada uno de los individuos y mediante un proceso iterativo, nos permitió resolver el problema del planeamiento de la expansión de la transmisión.
7. Se pudo comprobar las ventajas que ofrece los algoritmos genéticos en la solución de problemas complejos. En la aplicación al SEIN, se encontró la ubicación óptima de capacitores series. Los resultados obtenidos con esta metodología, satisfacen los requerimientos y criterios técnicos que previamente fueron establecidos.
8. En este trabajo se presento una metodología para tratar el problema de planeamiento de expansión de la transmisión utilizando el modelo AC para representar el sistema eléctrico. Si bien la metodología presentada se mostró para hallar la ubicación óptima de

capacitores series y el plan óptimo de líneas de transmisión. Es necesario remarcar que, con la misma estructura de la función de aptitud, la metodología puede ser extendida a diferentes aplicaciones, por ejemplo: refuerzo de líneas de transmisión, cambio de conductores de líneas de transmisión, ubicación de dispositivos de compensación reactiva, desconexión de líneas para aliviar sobrecargas sin necesidad de redespachos, etc.

9. En la aplicación de la presente metodología para la expansión de la transmisión del sistema de prueba Garver de 6 barras, la solución encontrada corresponde a la cantidad de líneas de transmisión que se deben construir y la que representa menor costo. Esta solución "individuo", tiene asociado un costo de expansión de 270.00 unidades y costo de racionamiento igual cero. Este resultado es equivalente a la solución encontrada con otras técnicas y la podemos encontrar en [3, 11, 17], y corresponde a la solución óptima para este sistema.



## Recomendaciones

1. El trabajo presentado, desde el punto de vista de metodología, puede ser mejorada. Se recomienda ampliar la metodología de manera que pueda enfocarse y resolver el problema del planeamiento dinámico de la expansión del sistema de transmisión.
2. El trabajo presentado, desde el punto de vista de programación, se recomienda desarrollarlo en forma integrada el algoritmo genético de optimización con el flujo de potencia lineal.
3. Es posible la implementación y ampliación de la metodología con sistemas en tiempo real. Es decir, se podría capturar datos de un sistema SCADA, procesar la información y poder servir como una herramienta auxiliar que ayude a tomar decisiones en la operación en tiempo real.
4. Para que el AG nos de mejores soluciones, se debe de tener cuidado y se recomienda escoger los parámetros de manera adecuada. Siempre es positivo cualquier conocimiento del problema. Por ejemplo, si un sistema presenta un gran número de barras, es mejor considerar un alto número de generaciones y una baja probabilidad de instalación. Esto hace que el AG nos muestre soluciones interesantes.

## Bibliografía

- [1] MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS, “Plan Referencial de Electricidad del Ministerio de Energía y Minas”, período 2005 – 2014.
- [2] M. J. RIDER, “Planeamiento de la expansión de los sistemas de transmisión utilizando modelos CC-CA y técnicas de programación no lineal”, Tesis de doctorado, UNICAMP, São Paulo, 2006.
- [3] GARVER L.L., “Transmission Network Estimation Using Linear Programming”, IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-89, pp.1688-1697, Sep.-Oct., 1970.
- [4] PEREIRA M.V., PINTO M.V., "Application of Sensibility Analysis of Load Supplying Capability to Interactive Transmission Expansion Planning", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. 104, febrero 1985.
- [5] MONTICELLI A., SANTOS A. JR., PEREIRA M.V., CUNHA S., PRAÇA J.G., PARK B., “Interactive Transmission Network Planning Using a Least-Effort Criterion”, IEEE Transactions, Vol. 101, Nº 10, p.p. 3919-3925, 1982.
- [6] GALLEGO R., ROMERO R., ESCOBAR A., “Static Planning of Colombia Transmission System Using Genetics Algorithm”, 16th International Conference on CAD/CAM Robotic & Factories of the Future, Trinidad y Tobago, Junio 2000.
- [7] HAFFNER S.L., “O Planeamento de Expansao dos Sistemas Elétricos no Contexto de um Ambiente Competitivo”, Tesis de Doctorado, FEEC Unicamp, Julio de 2000.
- [8] ROMERO R., MONTICELLI A., “A Hierarchical Decomposition Approach for Transmission Network Expansion Planning”. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, p.p 373-380, 1994.
- [9] DA SILVA E.L., GIL H.A., AREIZA J.M., “Transmission Network Expansion Planning Under an Improved Genetic Algorithm”, IEEE Trans. On Power Systems, Vol. 15, p.p 1168-175, 2000.
- [10] ESCOBAR A., GALLEGO R.A., ROMERO R.L. “Planeamiento Estático y Dinámico de la Transmisión en Ambientes Competitivos”, Jornadas

Internacionales de Energía Eléctrica, Bogotá D. C., Octubre de 2001.

- [11] GALLEGO R.A., "Planeamento a Longo Prazo de Sistemas de Transmissao Usando Técnicas de Otimizacao Combinatorial", Tesis de Doctorado, FEEC DSEE Unicamp, Brasil, Octubre de 1997.
- [12] GALLEGO R.A., ROMERO R., AND MONTICELLI A., "Tabu Search Algorithm for Network Synthesis", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.15, No. 2, p.p. 490-495, Mayo 2000.
- [13] ROMERO R., GALLEGO R.A., MONTICELLI A., "Transmission System Expansion Planning by Simulated Annealing", IEEE Trans. on Power System", Vol. 11, No. 1, p.p.364-369, February 1996.
- [14] VILLANASA R., GARVER L.L., SALON S.J., "Transmission Network Planning Using Linear programming", IEEE Trans. Power App. Systems, Vol 104, No 2, Febrero 1985.
- [15] ROMERO R., MONTICELLI A., "A Zero-One Implicit Enumeration Method for Optimizing Investments in Transmission Expansion Planning", IEEE Trans. on Power Systems, Vol 9, Nº 3, August 1994.
- [16] CORREA A., BOLAÑOS R., GARCES A., "Modelo Multiobjetivo para el Planeamiento de la Transmisión Usando una Técnica Evolutiva y Puntos Interiores", Revista Cientia Et Técnica. Año XIII, Nº 35, 2007, UTP ISSN 0122-1701.
- [17] BOLAÑOS R.A., CORREA C.A., GRANADA E.M., "Planeamiento de la Transmisión Usando Colonia de Hormigas", Revista Energía, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia 2007.
- [18] RIDER M.J., ROMERO R., MANTOVANI J.R.S., "Transmission Expansion Planning Using the DC Model and Nonlinear-Programming Technique". IEE Proc-Gener. Transm. Distrib. Vol. 152, Nov. 2005.
- [19] MONTICELLI A., GALLEGO R.A., ROMERO R., "Comparative Studies on Non-Convex Optimization Methods for transmission Network Expansion Planning", IEEE, Transactions on Power Systems, Vol. 13, 1998.

- [20] N.G. HINGORANI, L. GYUGYI, "Understanding FACTS Concepts and Technology of Flexible AC Transmission System" IEEE Press, 1999.
- [21] T.J. MILLER, "Reactive power control in electric system" John Wiley Interscience, Chichester, 1982.
- [22] IEEE TRANSMISIÓN AND DISTRIBUTION COMITTE 2000, "FACTS Applications", IEEE FACTS Working Group.
- [23] T. ORFANOIANNI, R. BACHER, "Steady-state optimization in power systems with series FACTS devices", IEEE Transactions on Power System, vol 18, 2003.
- [24] L. YUNGIANG, A. ABUR, "Static security enhancement via optimal utilization of thyristor-controlled series capacitors", IEEE Transactions on Power System, vol 17, pp. 324-329, mayo 2002.
- [25] L. YUNGIANG, A. ABUR, "Improving system static security via optimal placement of thyristor controlled series capacitors (TCSC)", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol. 2, pp. 516-521, 28 Jan.-1 Feb. 2001.
- [26] A. VARGAS, "Metodologías para el control de dispositivos FACTS en sistemas eléctricos de potencia". Tesis de grado, Magíster en sistemas de generación de energía eléctrica, Universidad del Valle, Grupo de Investigación en Alta Tensión. Cali (Colombia), pp. 31-77, 2004.
- [27] A.R.M. TENORIO, "Investigation of TCSC as a fault current limiter", IPST'97. International Conference on Power Systems Transients Seattle, June22-26, 1997.
- [28] R. RAJARMAN, F. ALVARADO, A. MANIACI, R. CAMFIELD AND S. JALALI, "Determination of location and amount of series compensation to increase power transfer capability" IEEE Trans.on Power System, vol 13, pp. 294-300, mayo 1998
- [29] S.N. SINGH, AND A.K. DAVID, "A new approach for placement of FACTS devices in open power markets", IEEE Power Engineering Review, Vol. 21, pp. 58-60 Sept. 2001.
- [30] K.S. VERMA, S.N. SINGH, AND H.O. GUPTA, "FACTS devices location for enhancement of total transfer capability", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2001, Vol. 2, pp. 522-527, 28 Jan.-1 Feb. 2001.

- [31] S. GERBEX, R. CHERKAOUQUI, AND A.J. GERMOND, "Optimal Location of FACTS Devices to Enhance Power System Security" Bologna Power Tech Conference, Jun 23-26-2003, Bologna Italy.
- [32] S. GERBEX, R. CHERKAOUQUI, AND A.J. GERMOND, "Optimal Location of Multi-type FACTS Devices in a Power System Security by Means of Genetic Algorithms" IEEE Trans. Power system, Vol. 16, N° 3 Agosto 2001.
- [33] W. FENG, G.B. SHRESTHA, "Allocation of TCSC devices to optimize total transmission capacity in a competitive power market", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2001, Vol. 2 pp. 587-593, 28 Jan. 1 Feb. 2001.
- [34] F. GLOVER AND M. LAGUNA, "Tabu Search", kluver Academic Publishers, 1997
- [35] H. MORI AND Y. GOTO, "A parallel tabu search based method for determining optimal allocation of FACTS in power system", Power System Technology, 2000. Proceedings International Conference on Power Con 2000, Vol. 2, pp. 1077-1082, 4-7 Dec. 2000.
- [36] BOX G.E.P., "Evolutionary Operation: A method for increasing industrial productivity" Journal of the Royal Statistical Society, Vol. 6 , N°.2.
- [37] FRIEDBERG R., "A learning machine I", IBM Journal of Research and Development, Vol. 2, N° 1, 1958.
- [38] CARLOS A. COELLO COELLO, "Introducción a la computación evolutiva".
- [39] BREMERMAN H. J. "Optimization through evolution and recombination".
- [40] RED DE ENERGÍA DEL PERU, "Plan de Expansión del sistema de transmisión de Red de Energía del Perú", Documento TE-2140-915-2006. Lima, Setiembre de 2006.
- [41] OSINERG, "Estudio para la Prepublicación de la Fijación de Tarifas en Barra", Período mayo 2006 – abril 2007, Lima Febrero de 2006.

## ANEXOS

## ANEXO-A



Figura 1.1 Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN)

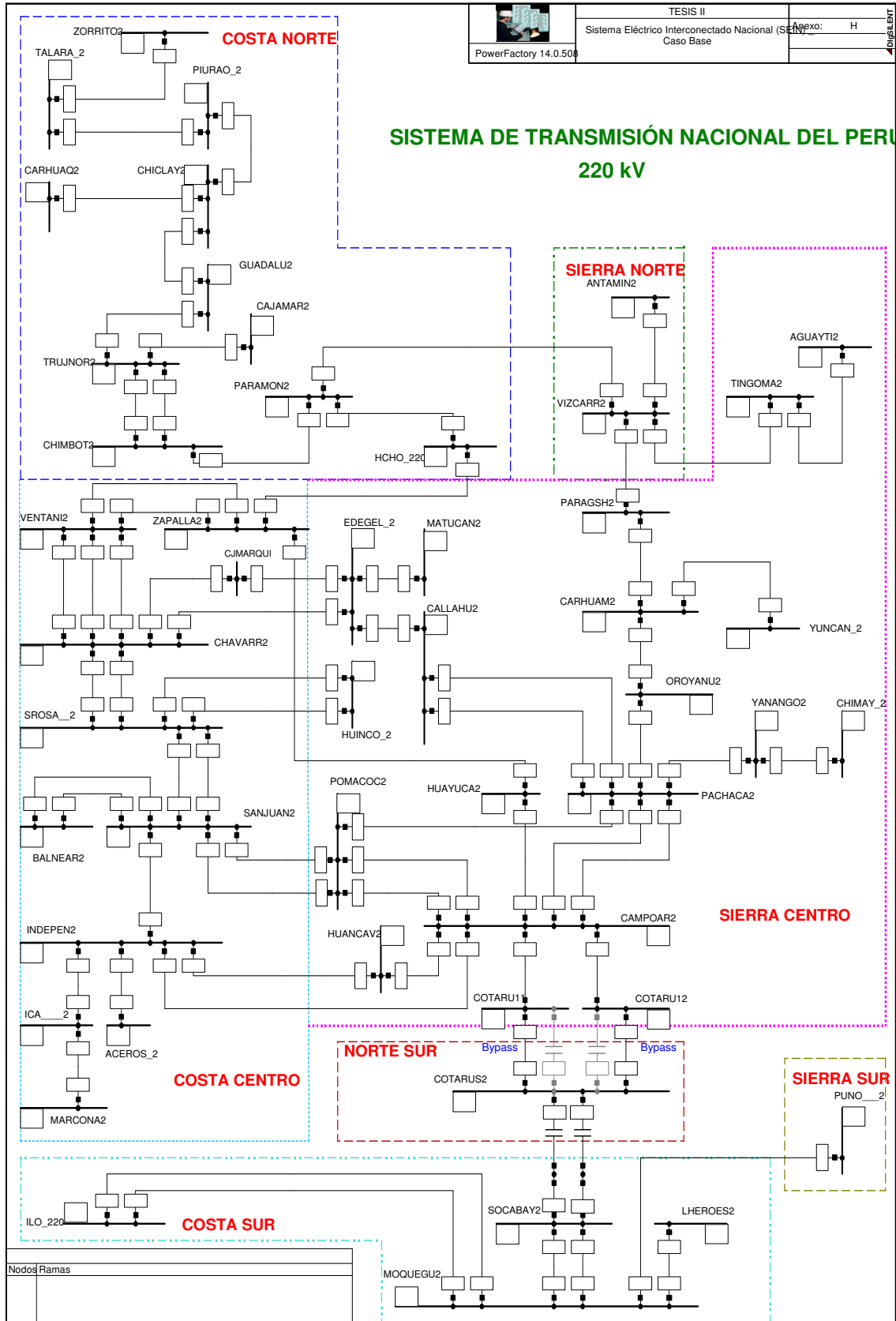


Figura 1.2 Diagrama Unifilar del SEIN



## ANEXO- B

Código fuente del algoritmo genético

```
// *****
// Programa de Generación
// *****

using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Windows.Forms;

namespace WindowsFormsApplication1
{
    public partial class C1 : Form
    {

        public C1()
        {
            InitializeComponent();
        }

        private void ActualizaMatrizSeleccion()
        {

            // Limpiamos la Matriz
            DataTable Matriz;

            // Limpiamos la Matriz
            Matriz = new DataTable();

            // Inicializamos los random
            Random r = new Random();

            if (NUDPoblacion.Value > 0)
            {
                Matriz.Columns.Add("Individuo" , typeof(string));
                // Creamos la Población (columnas)
                for (int n = 0; n < NUDPoblacion.Value; n++)
                {
                    Matriz.Columns.Add("L" + (n + 1).ToString(), typeof(int));
                    //Matriz.Columns[n + 1].ReadOnly = true;
                }
                Matriz.Columns.Add("Función Aptitud", typeof(decimal));
                Matriz.Columns.Add("Prob. Selección", typeof(decimal));
                Matriz.Columns.Add("Prob. Selec, Acum", typeof(decimal));
            }

            if (NUDIndividuos.Value > 0)
            {
                // Creamos los individuos (filas)
            }
        }
    }
}
```

```

        for (int n = 0; n < NUDIndividuos.Value; n++)
        {
            Matriz.Rows.Add();
            Matriz.Rows[n][0]="Individuo "+ (n+1).ToString();
            for (int Individuo=1
            Individuo<Matriz.Columns.Count;Individuo++)
            {
                if (Convert.ToDouble(
                <r.NextDouble())
                FactorProbabilidad.Text)
                    Matriz.Rows[n][Individuo] = 0;
                else
                    Matriz.Rows[n][Individuo] = 1;
            }
        }
        DGMatriz.DataSource = Matriz;
    }
}

```

```

}

private void ProcesaGeneracion()
{
    int ProbabilidadNoCruce= 100-Convert.ToInt16(FactorCruce.Text) ;

    int Puntos = 0;
    int AcumPuntos = 0;

    // *****
    // Generación de Nuevos Individuos
    // *****

    DataTable MatrizNuevosIndividuos = new DataTable(); // Matriz de nuevos
individuos
    // Inicializamos los random
    Random r = new Random();

    if (NUDPoblacion.Value > 0)
    {
        // Creamos la Población (columnas)
        for (int n = 0; n < NUDPoblacion.Value; n++)
        {
            MatrizNuevosIndividuos.Columns.Add("L" + (n + 1).ToString(),
typeof(int));
        }
        MatrizNuevosIndividuos.Columns.Add("NumAleatorio", typeof(int));
    }

    if (NUDIndividuos.Value > 0)
    {
        // Creamos los nuevos individuos (filas)

        for (int n = 0; n < NUDIndividuos.Value; n++)

```

```

        {
            MatrizNuevosIndividuos.Rows.Add();
            for (int Individuo = 0; Individuo <
MatrizNuevosIndividuos.Columns.Count; Individuo++)
            {
                if
(Convert.ToDouble(DGMatriz.Rows[n].Cells[DGMatriz.Columns.Count - 1].Value) >
r.NextDouble() * 100)
                    MatrizNuevosIndividuos.Rows[n][Individuo] = n;
                else
                    MatrizNuevosIndividuos.Rows[n][Individuo] = 0;
            }
        }
    }
    DGVNuevosIndividuos.DataSource = MatrizNuevosIndividuos;

    if (NUDPoblacion.Value > 0)
    {
        // *****
        // Generación de Ruleta de Probabilidad
        // *****

        // Creamos Matriz de probabilidad
        DataTable MatrizProbabilidad =new DataTable(); // Matriz de
Probabilidad
        decimal ProbAcum = 0;
        // Creamos la Población (columnas)
        MatrizProbabilidad.Columns.Add("Individuo", typeof(int));
        MatrizProbabilidad.Columns.Add("Probabilidad", typeof(decimal));
        MatrizProbabilidad.Columns.Add("ProbabilidadAcumulada",
typeof(decimal));
        for (int n = 0; n < NUDIndividuos.Value; n++)
        {
            ProbAcum=ProbAcum+(100 / NUDIndividuos.Value);
            MatrizProbabilidad.Rows.Add(n, 100 / NUDIndividuos.Value,
ProbAcum);
        }

        // *****
        // Creación de Matriz de Generación
        // *****

        DataTable Generacion = new DataTable(); // Matriz de Generación
        // Creamos la Población (columnas)
        for (int n = 0; n < NUDPoblacion.Value; n++)
        {
            Generacion.Columns.Add("L" + (n + 1).ToString(), typeof(int));
        }

        // Tiro del dado !
        // Determinamos Nro. de dardos
        int NroDardos = Convert.ToInt16(NUDIndividuos.Value) / 2;

        // Lanzamiento de Dardos

```

```

for (int i = 0; i < NroDardos; i++)
{
    double Aleatorio1 = r.NextDouble()*100;
    double Aleatorio2 = r.NextDouble()*100;
    double AleatorioCruce = r.NextDouble() * 100;

    // Creamos Matriz del Dardo
    DataTable MatrizDardo = new DataTable(); // Matriz de Dardo
    for (int n = 0; n < NUDPoblacion.Value; n++)
    {
        MatrizDardo.Columns.Add("L" + (n + 1).ToString(),
        typeof(int));
    }
    // llenado de Matriz de dardo
    MatrizDardo.Rows.Add(); //Punto 1
    MatrizDardo.Rows.Add(); //Punto 2
    MatrizDardo.Rows.Add(); // Acumulado Punto 1
    MatrizDardo.Rows.Add(); // Acumulado Punto 2
    for (int n = 0; n < NUDPoblacion.Value; n++)
    {
        // Punto 1
        if (Convert.ToDouble((n > 0 ? MatrizProbabilidad.Rows[n -
1][2] : 0)) < Aleatorio1 &&
            Aleatorio1 <=
Convert.ToDouble(MatrizProbabilidad.Rows[n][2]))
            MatrizDardo.Rows[0][n] = 1;
        else
            MatrizDardo.Rows[0][n] = 0;

        // Punto 2
        if (Convert.ToDouble((n > 0 ? MatrizProbabilidad.Rows[n -
1][2] : 0)) < Aleatorio2 &&
            Aleatorio2 <=
Convert.ToDouble(MatrizProbabilidad.Rows[n][2]))
            MatrizDardo.Rows[1][n] = 2;
        else
            MatrizDardo.Rows[1][n] = 0;
    }
    int CantidadPoblacion = Convert.ToInt16( NUDPoblacion.Value );
    for (int n = CantidadPoblacion; n > 0; n--)
    {
        // Acumulado Punto 1
        MatrizDardo.Rows[2][n - 1] = (Convert.ToInt16
(MatrizDardo.Rows[0][n - 1]) == 1 ? 1 : (n == CantidadPoblacion ? 2 :
(Convert.ToInt16(MatrizDardo.Rows[0][n])==1?1:2)));
        // Acumulado Punto 2
        MatrizDardo.Rows[3][n - 1] =
(Convert.ToInt16(MatrizDardo.Rows[1][n - 1]) == 2 ? 1 : (n == CantidadPoblacion ? 2 :
(Convert.ToInt16(MatrizDardo.Rows[0][n]) == 1 ? 1 : 2)));
    }

    // *****
    // Analisis de cruce
    // *****

    // Analizamos la generación de las filas 2*(i+1)-2 y 2*(i+1) -1
    for (int n = 0; n < NUDPoblacion.Value; n++)
    {

```



```

        // Mostramos la Matriz de Generación
    }
    private void Siguiente()
    {
        if (TCC1.SelectedTab.Text == "INGRESO DE INFORMACIÓN")
        {
            TCC1.SelectedIndex = 1;
            ActualizaMatrizSeleccion();
        }
        else if (TCC1.SelectedTab.Text == "MATRIZ DE POBLACION")
        {
            TCC1.SelectedIndex = 2;
            ProcesaGeneracion();
        }
        else
        {
            TCC1.SelectedIndex = 0;
        }
    }
    private void Anterior()
    {
        if (TCC1.SelectedTab.Text == "INGRESO DE INFORMACIÓN")
        {
            TCC1.SelectedIndex = 0;
        }
        else if (TCC1.SelectedTab.Text == "MATRIZ DE POBLACION")
        {
            TCC1.SelectedIndex = 0;
        }
        else
        {
            TCC1.SelectedIndex = 1;
        }
    }
    private void BSiguiente_Click(object sender, EventArgs e)
    {
        Siguiente();
    }

    private void BAnterior_Click(object sender, EventArgs e)
    {
        Anterior();
    }

    private void BSalir_Click(object sender, EventArgs e)
    {
        this.Close();
    }

    private void BActualizarCalculo_Click(object sender, EventArgs e)
    {
        // Actualizamos valores de cálculo
        double SumAptitud=0;
        double Optimo=0;
        double ProbabilidadAcum = 0;
        for (int n=0 ; n<DGMatriz.Rows.Count;n++)
        {

```

```

SumAptitud=SumAptitud+Convert.ToDouble(DGMatriz.Rows[n].Cells[DGMatriz.Columns.Count-
3].Value);
        if ((Convert.ToDouble(DGMatriz.Rows[n].Cells[DGMatriz.Columns.Count-
3].Value)) > Optimo)
            Optimo=
Convert.ToDouble(DGMatriz.Rows[n].Cells[DGMatriz.Columns.Count-3].Value);
    }
    TBSumAptitud.Text = (SumAptitud*100).ToString();
    TBMedia.Text = (SumAptitud / DGMatriz.Rows.Count).ToString();
    TBOptimo.Text = Optimo.ToString();

    // Actualizamos la probabilidad de selección y probabilidad acumulada
    for (int n = 0; n < DGMatriz.Rows.Count; n++)
    {
        // Actualizamos probabilidad de selección
        DGMatriz.Rows[n].Cells[DGMatriz.Columns.Count - 2].Value =
Convert.ToDouble(DGMatriz.Rows[n].Cells[DGMatriz.Columns.Count - 3].Value)*100 /
SumAptitud;
        ProbabilidadAcum = ProbabilidadAcum +
Convert.ToDouble(DGMatriz.Rows[n].Cells[DGMatriz.Columns.Count - 2].Value);
        // Actualizamos probabilidad de selección acumulada
        DGMatriz.Rows[n].Cells[DGMatriz.Columns.Count - 1].Value =
ProbabilidadAcum;
    }
}
}
}

```

ANEXO C

Maximizar  
Donde:

$$f(x) = \text{Sen}(\pi * X / 256)$$

$$0 \leq X \leq 255, \quad X \in \text{números enteros}$$

Cadena	Evaluación	Valor que representa
00000000	$0x2^7 + 0x2^6 + 0x2^5 + 0x2^4 + 0x2^3 + 0x2^2 + 0x2^1 + 0x2^0$	0
00000001	$0x2^7 + 0x2^6 + 0x2^5 + 0x2^4 + 0x2^3 + 0x2^2 + 0x2^1 + 1x2^0$	1
11111111	$1x2^7 + 1x2^6 + 1x2^5 + 1x2^4 + 1x2^3 + 1x2^2 + 1x2^1 + 1x2^0$	255

Tabla 4.1 Representación de individuos como cadena de ocho bits

Número de Individuos	Población inicial Individuos (fenotipos)	x valor genotipo	f(x) valor función adaptación	f(x)/Σf(x) probabilidad selección	Probabilidad de selección acumulada
1	1 0 1 1 1 1 0 1	189	0.733	14.5%	14.5%
2	1 1 0 1 1 0 0 0	216	0.471	9.4%	23.9%
3	0 1 1 0 0 0 1 1	99	<b>0.937</b>	18.6%	42.5%
4	1 1 1 0 1 1 0 0	236	0.243	4.8%	47.3%
5	1 0 1 0 1 1 1 0	174	0.845	16.8%	64.1%
6	0 1 0 0 1 0 1 0	74	0.788	15.6%	79.7%
7	0 0 1 0 0 0 1 1	35	0.416	8.3%	88.0%
8	0 0 1 1 0 1 0 1	53	0.605	12.0%	100.0%

Tabla 4.2 Población inicial, x, y f(x)

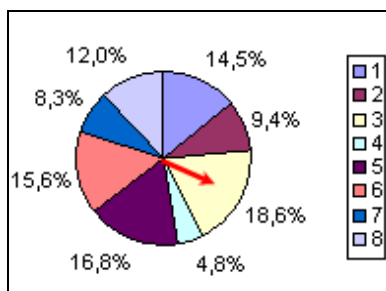


Figura 4.1 Ruleta de selección

Nuevos Individuos	Elementos Elegidos
1a antes 2	1 1 0 1 1 0 0 0
2a antes 3	0 1 1 0 0 0 1 1
3a antes 1	1 0 1 1 1 1 0 1
4a antes 6	0 1 0 0 1 0 1 0
5a antes 5	1 0 1 0 1 1 1 0
6a antes 3	0 1 1 0 0 0 1 1
7a antes 6	0 1 0 0 1 0 1 0
8a antes 3	0 1 1 0 0 0 1 1

Tabla 4.3 Individuos elegidos



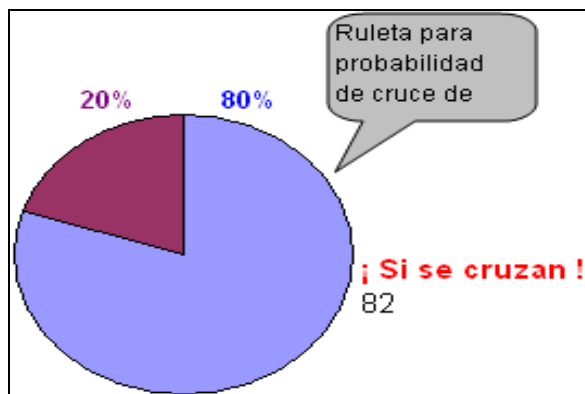


Figura 4.2 Ruleta con 80% de probabilidad de cruce

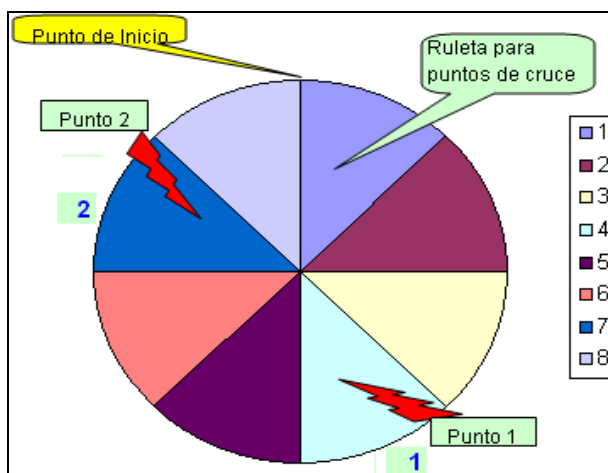


Figura 4.3 Ruleta para puntos de cruce

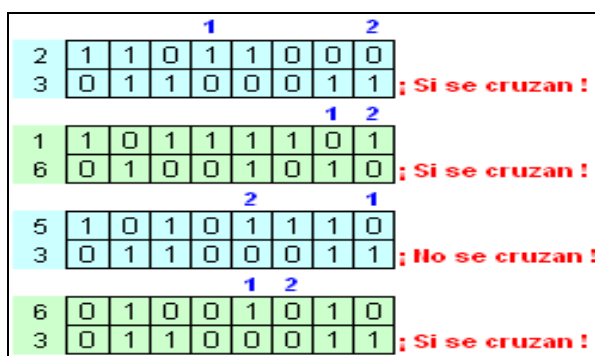


Figura 4.4 Puntos de cruce de cada par de individuos

Generación de Nuevos Individuos	Primera Generación de individuos	x valor	f(x) valor	f(x)/Σf(x) probabilidad selección	Probabilidad de selección acumulada
1'	1 1 0 1 0 0 1 1	211	0.525	8.0%	0.080
2'	0 1 1 0 1 0 0 0	104	0.957	14.7%	0.227
3'	1 0 1 1 1 1 0 0	188	0.741	11.4%	0.341
4'	0 1 0 0 1 0 1 1	75	0.796	12.2%	0.463
5'	1 0 1 0 1 1 1 0	174	0.845	12.9%	0.463
6'	0 1 1 0 0 0 1 1	99	0.937	14.4%	0.736
7'	0 1 0 0 1 0 1 0	74	0.788	12.1%	0.856
8'	0 1 1 0 0 0 1 1	99	0.937	14.4%	1.000

Tabla 4.4 Primera Generación de individuos después del cruce

Generación de Huevos Individuos	Primera Generación de individuos	x valor	f(x) valor	f(x)/Σf(x) probabilidad selección
1'	1 1 0 1 1 1 0 1	221	0,417	7,0%
2'	1 0 1 1 1 0 0 0	184	0,773	13,0%
3'	1 0 1 0 1 1 1 0	174	0,845	14,2%
4'	1 0 1 0 1 1 1 0	174	0,845	14,2%
5'	0 1 0 0 1 0 1 0	74	0,788	13,2%
6'	1 1 0 1 1 0 0 0	216	0,471	7,9%
7'	1 0 1 0 1 0 1 1	171	0,864	14,5%
8'	0 1 1 0 0 1 1 0	102	<b>0,950</b>	16,0%
suma de aptitudes		====>	5,953	100,0%
Media		====>	0,744	
Mejor valor		====>	<b>0,950</b>	

Tabla 4.5 Primera generación de Individuos

Generación de Huevos Individuos	Segunda Generación de individuos	x valor	f(x) valor	f(x)/Σf(x) probabilidad selección
1''	1 1 0 1 1 0 0 0	216	0,471	7,2%
2''	0 1 1 0 0 1 1 0	102	0,950	14,5%
3''	1 0 1 0 0 1 1 0	166	0,893	13,6%
4''	0 1 1 1 1 0 0 0	120	0,995	15,2%
5''	1 0 1 0 1 1 1 0	174	0,845	12,9%
6''	1 0 1 1 1 0 0 0	184	0,773	11,8%
7''	1 0 1 0 1 1 1 0	174	0,845	12,9%
8''	1 0 1 1 1 0 0 0	184	0,773	11,8%
suma de aptitudes		====>	6,545	100,0%
Media		====>	0,818	
Mejor valor		====>	<b>0,995</b>	

Tabla 4.6 Segunda generación de Individuos

Generación de Huevos Individuos	Tercera Generación de individuos	x valor	f(x) valor	f(x)/Σf(x) probabilidad selección
1'''	1 0 1 0 0 1 1 0	166	0,893	12,1%
2'''	1 0 1 0 1 1 1 0	174	0,845	11,5%
3'''	0 1 1 0 0 1 0 0	100	0,942	12,8%
4'''	0 1 1 1 1 0 1 0	122	0,997	13,6%
5'''	0 1 1 1 1 0 0 0	120	0,995	13,5%
6'''	0 1 1 0 0 1 1 0	102	0,950	12,9%
7'''	1 0 1 0 0 1 1 0	166	0,893	12,1%
8'''	1 0 1 0 1 1 1 0	174	0,845	11,5%
suma de aptitudes		====>	7,360	100,0%
Media		====>	0,920	
Mejor valor		====>	<b>0,997</b>	

Tabla 4.7 Tercera generación de Individuos

Generación de Huevos Individuos	Cuarta Generación de individuos	x valor	f(x) valor	f(x)/Σf(x) probabilidad selección
1''''	1 0 1 0 1 0 0 0	168	0,882	11,6%
2''''	0 1 1 1 0 1 1 0	118	0,992	13,1%
3''''	0 1 1 1 1 1 1 0	126	1,000	13,2%
4''''	0 1 1 0 0 0 0 0	96	0,924	12,2%
5''''	0 1 1 1 1 0 1 0	122	0,997	13,2%
6''''	1 0 1 0 1 1 0 0	172	0,858	11,3%
7''''	0 1 1 1 1 1 1 0	126	1,000	13,2%
8''''	1 0 1 0 0 0 0 0	160	0,924	12,2%
suma de aptitudes ==>			7,577	100,0%
Media ==>			0,947	
Mejor valor ==>			<b>1,000</b>	

Tabla 4.8 Cuarta generación de Individuos

Generación de Huevos Individuos	Quinta Generación de individuos	x valor	f(x) valor	f(x)/Σf(x) probabilidad selección
1''''	1 0 1 0 1 0 0 0	168	0,882	11,6%
2''''	0 1 1 1 0 1 1 0	118	0,992	13,1%
3''''	0 1 1 1 1 1 1 0	126	1,000	13,2%
4''''	0 1 1 0 0 0 0 0	96	0,924	12,2%
5''''	0 1 1 1 1 0 1 0	122	0,997	13,2%
6''''	1 0 1 0 1 1 0 0	172	0,858	11,3%
7''''	0 1 1 1 1 1 1 0	126	1,000	13,2%
8''''	1 0 1 0 0 0 0 0	160	0,924	12,2%
suma de aptitudes ==>			7,577	100,0%
Media ==>			0,947	
Mejor valor ==>			<b>1,000</b>	

Tabla 4.9 Quinta generación de Individuos

Generación de Huevos Individuos	Sexta Generación de individuos	x valor	f(x) valor	f(x)/Σf(x) probabilidad selección
1''''	1 0 1 0 1 0 0 0	168	0,882	11,6%
2''''	0 1 1 1 0 1 1 0	118	0,992	13,1%
3''''	0 1 1 1 1 1 1 0	126	1,000	13,2%
4''''	0 1 1 0 0 0 0 0	96	0,924	12,2%
5''''	0 1 1 1 1 0 1 0	122	0,997	13,2%
6''''	1 0 1 0 1 1 0 0	172	0,858	11,3%
7''''	0 1 1 1 1 1 1 0	126	1,000	13,2%
8''''	1 0 1 0 0 0 0 0	160	0,924	12,2%
suma de aptitudes ==>			7,577	100,0%
Media ==>			0,947	
Mejor valor ==>			<b>1,000</b>	

Tabla 4.10 Sexta generación de Individuos

	1era Posible Solución	1er Cruce	2do cruce	3er Cruce	4to Cruce	5to Cruce	6to Cruce	7mo Cruce
X ==>	99	102	120	122	126	122	126	126
f(x)	0.937	0.950	0.995	0.997	1.000	0.997	1.000	1.000

Tabla 4.11 Resultados del proceso de cruce

## ANEXO D

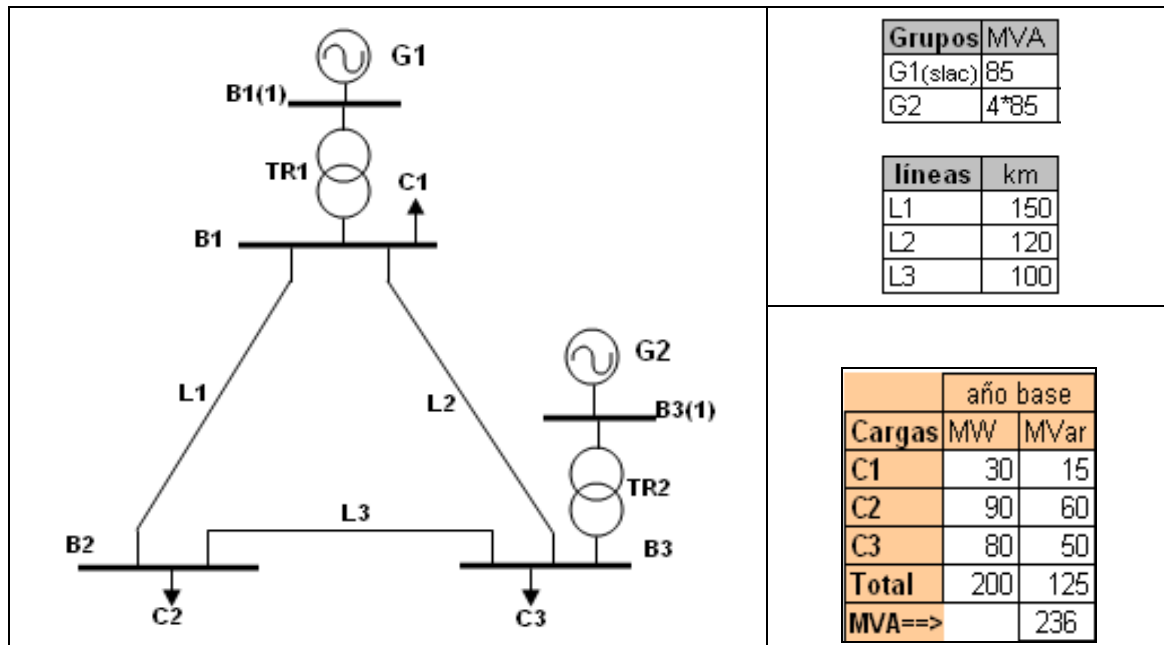


Figura 4.14 Diagrama Unifilar y datos de carga y líneas

	7mo año			9no año	
Cargas	MW	MVar	Cargas	MW	MVar
C1	58,5	25,7	C1	78	32,4
C2	175	103	C2	233	130
C3	156	85,7	C3	207	108
<b>Total</b>	<b>390</b>	<b>214</b>	<b>Total</b>	<b>519</b>	<b>270</b>
<b>MVA==&gt;</b>		<b>445</b>	<b>MVA==&gt;</b>		<b>585</b>

Figura 4.15 Cargas de red de 3 barras, 7mo y 9no año

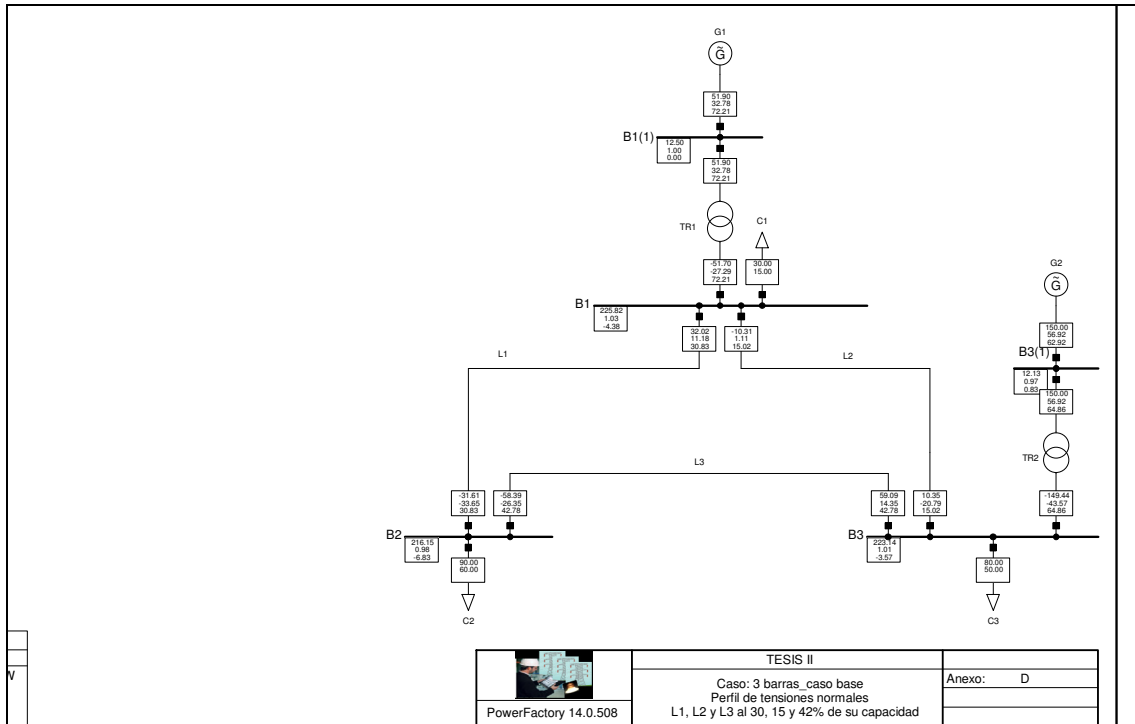


Figura 4.16 Caso base, para red de 3 barras

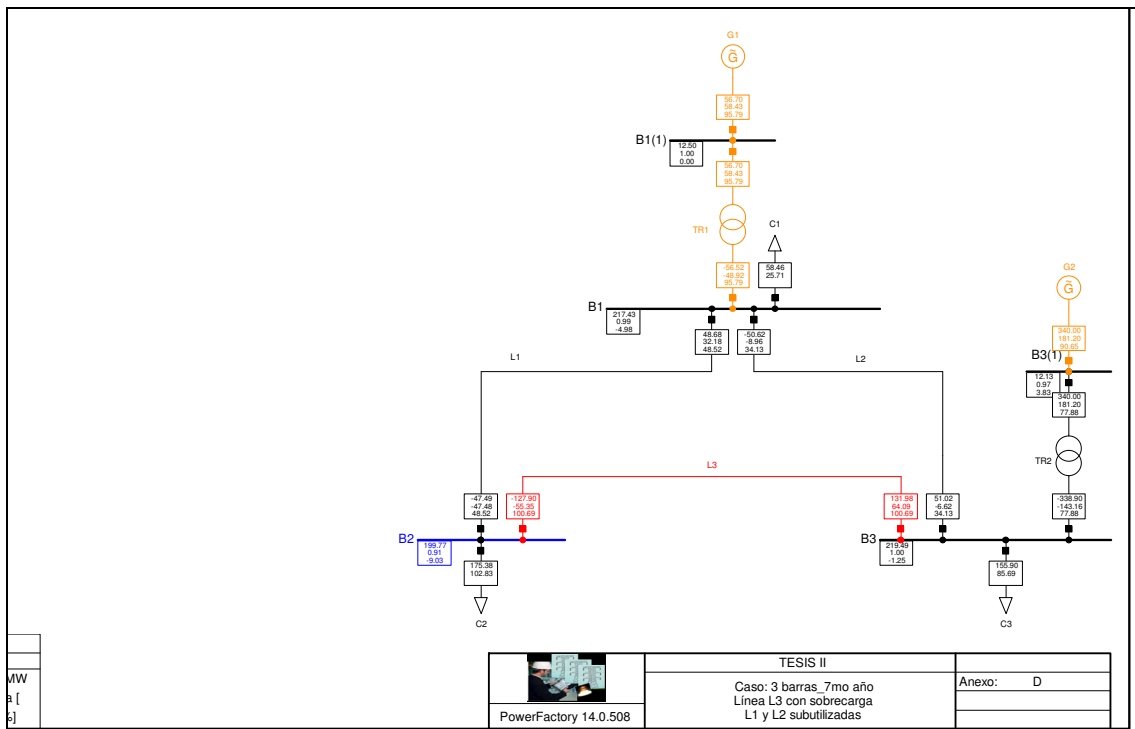


Figura 4.17 Caso séptimo año, sin TCSC

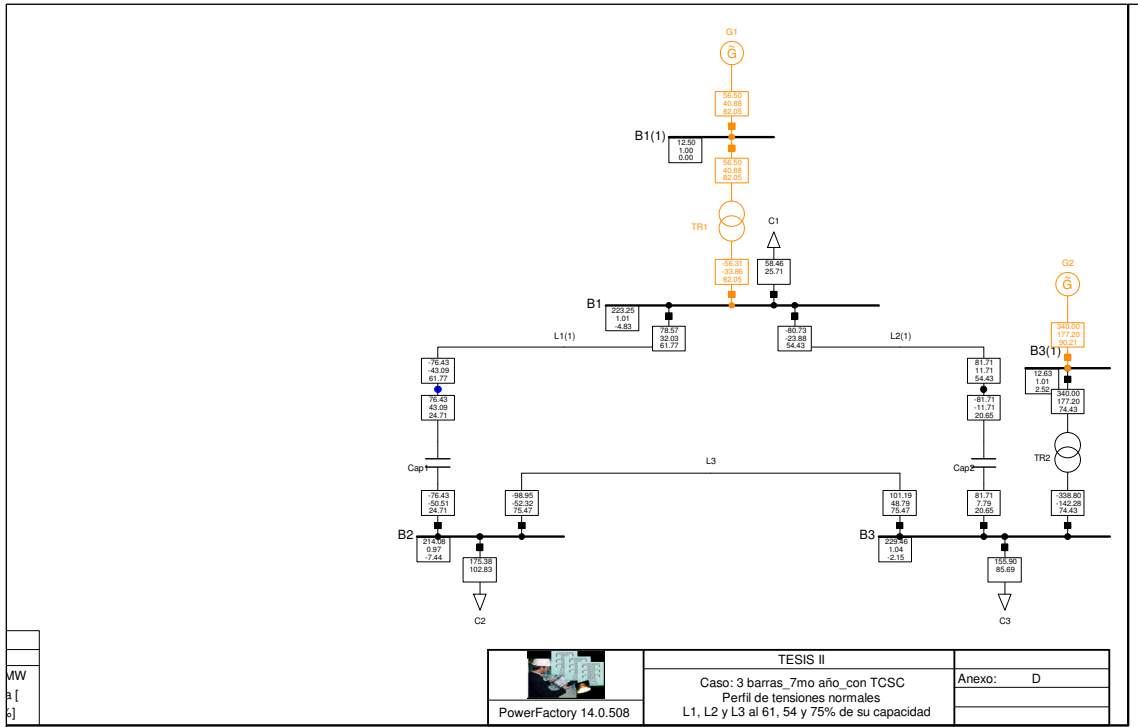


Figura 4.18 Caso séptimo año con TCSC

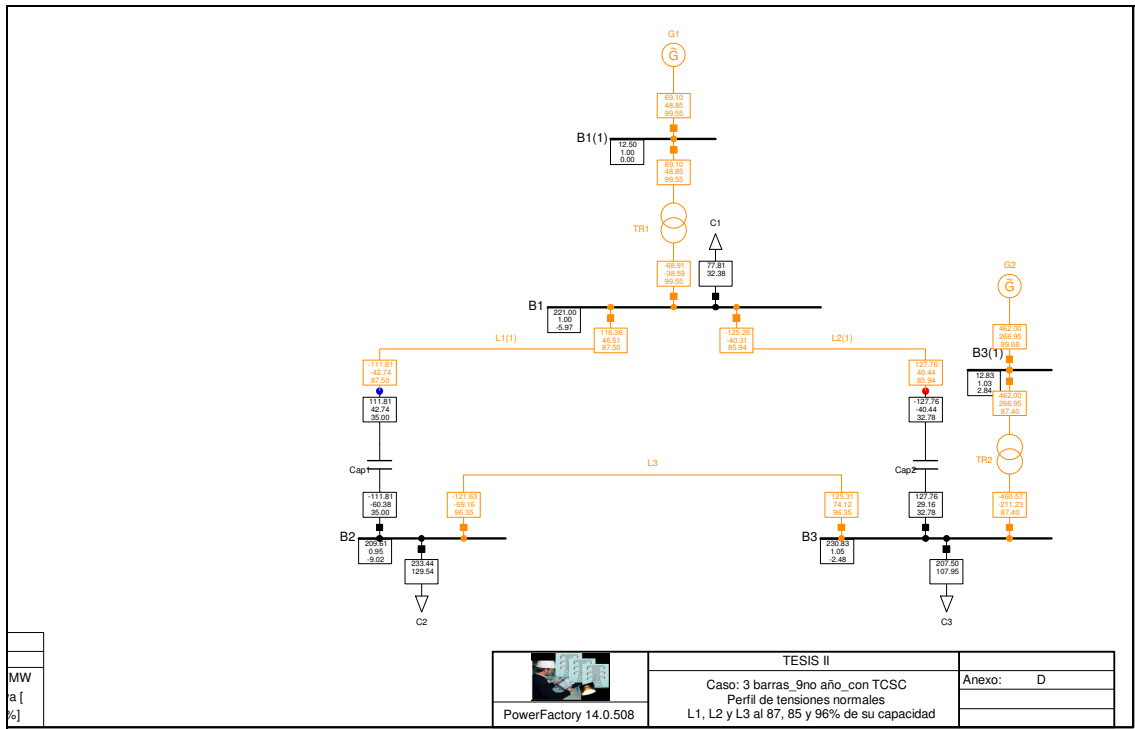


Figura 4.19 Caso noveno año con TCSC

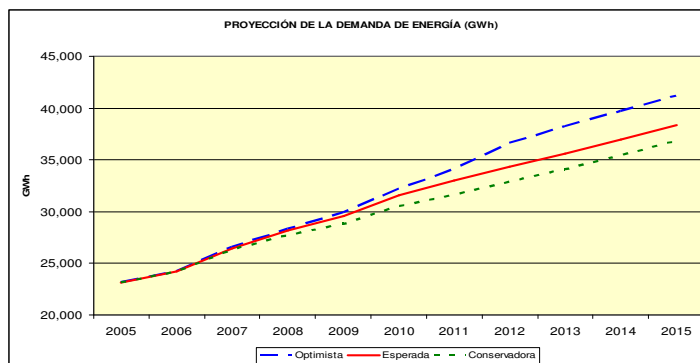
## ANEXO E

Año	Demanda Optimista	Tasa	Demanda Conservadora	Tasa	Demanda Esperada	Tasa
	GWh	%	GWh	%	GWh	%
2005	23,117	2.67%	23,117	2.57%	23,117	2.6%
2006	24,205	4.71%	24,172	4.56%	24,194	4.7%
2007	26,537	9.64%	26,307	8.83%	26,463	9.4%
2008	28,307	6.67%	27,694	5.27%	28,179	6.5%
2009	29,952	5.81%	28,747	3.80%	29,554	4.9%
2010	32,211	7.54%	30,522	6.17%	31,619	7.0%
2011	34,089	5.83%	31,615	3.58%	32,994	4.3%
2012	36,651	7.52%	32,851	3.91%	34,353	4.1%
2013	38,251	4.36%	34,081	3.74%	35,625	3.7%
2014	39,691	3.77%	35,424	3.94%	36,982	3.8%
2015	41,186	3.77%	36,820	3.94%	38,390	3.8%

**Tabla 6.1 Proyección de Demanda de Energía**

Fuente: OSINERG, "Estudio para la Prepublicación de la Fijación de Tarifas en Barra", Período mayo 2006 – abril 2007, Lima Febrero de 2006 [41].

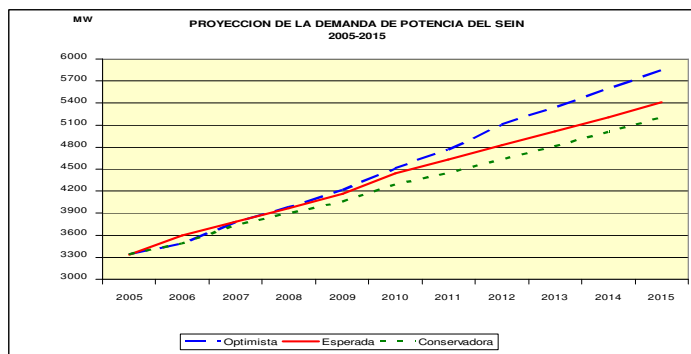
Plan Referencial de Electricidad del Ministerio de Energía y Minas período 2005 – 2014 [1].



**Figura 6.3 Proyección de Demanda de Energía**

Año	Demanda Optimista	Tasa	Demanda Conservadora	Tasa	Demanda Esperada	Tasa
	MW	%	MW	%	MW	%
2005	3,335	3.29%	3,335	3.13%	3,335	
2006	3,487	4.55%	3,485	4.49%	3,598	7.89%
2007	3,770	8.13%	3,735	7.17%	3,781	5.09%
2008	3,980	5.55%	3,891	4.18%	3,971	5.03%
2009	4,212	5.83%	4,056	4.25%	4,162	4.80%
2010	4,511	7.10%	4,284	5.63%	4,440	6.69%
2011	4,764	5.62%	4,445	3.76%	4,632	4.32%
2012	5,106	7.16%	4,626	4.07%	4,825	4.17%
2013	5,339	4.56%	4,807	3.91%	5,012	3.87%
2014	5,586	4.64%	5,000	4.02%	5,207	3.89%
2015	5,845	4.64%	5,201	4.02%	5,409	3.89%

**Tabla 6.2 Proyección de Demanda de Potencia Período 2006 – 2015**



**Figura 6.4 Proyección de Demanda de potencia**

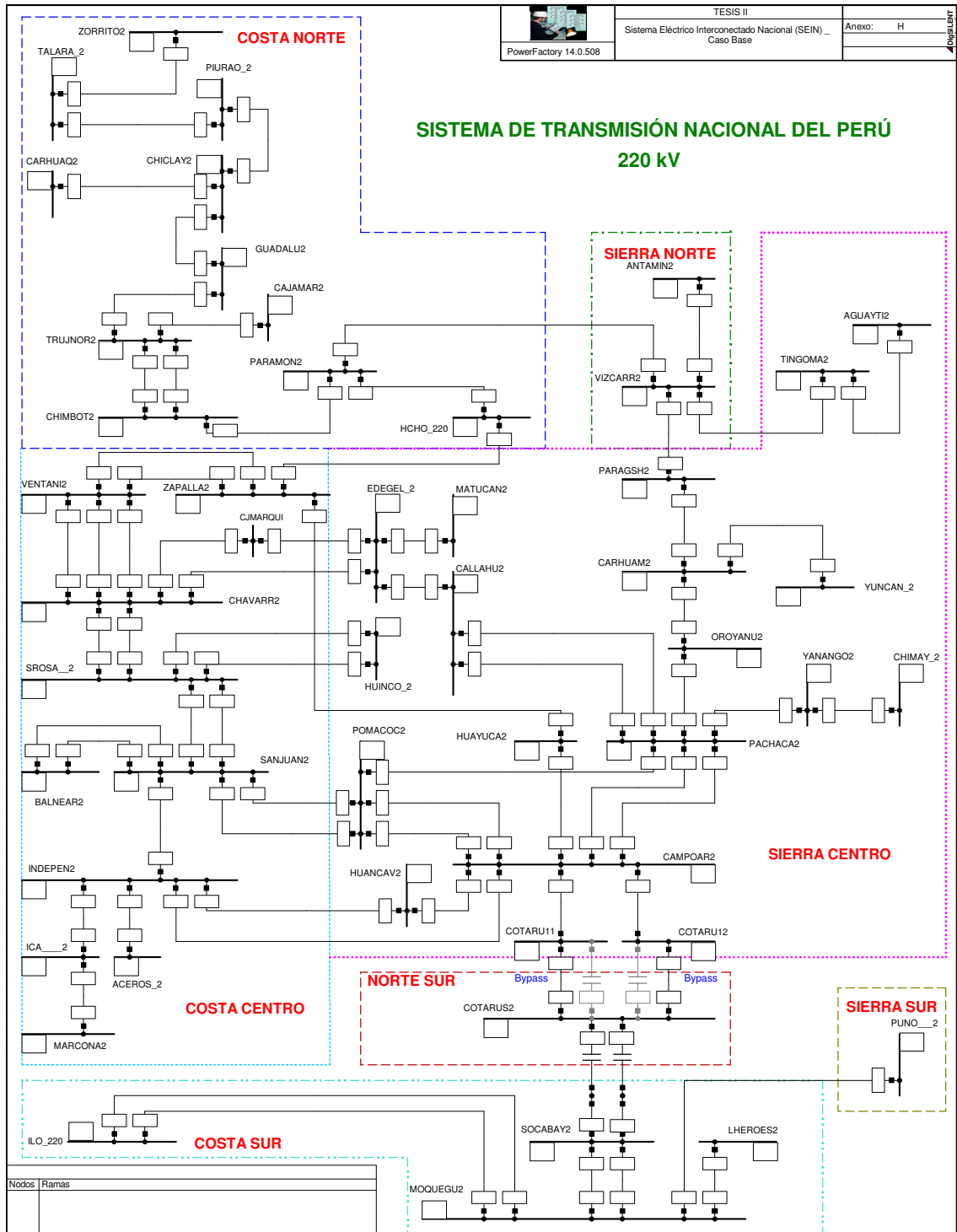


Figura 6.5 Sistema Transmisión Nacional del Perú



Nombre	Terminal i	Terminal j	Long. km	R1 Ohm	X1 Ohm	R0 Ohm	X0 Ohm	Unom kV
Ine ACE IND 21	ACEPOS 2	INDEPEN2	24,6	2,0	12,1	10,6	35,2	220
Ine AGU TIN 21	AGUAYTI2	TINGOMA2	73,27	4,2	37,0	20,9	104,8	220
Ine BAL SAN 21	BALNEAR2	SANJUAN2	9,83	0,7	4,9	3,8	14,9	220
Ine BAL SAN 22	BALNEAR2	SANJUAN2	9,83	0,7	4,9	3,8	14,9	220
Ine BAR CHA 21	BARSI 2	CHAVARR2	8,09	0,6	4,1	3,3	12,4	220
Ine BAR CHA 22	BARSI 2	CHAVARR2	8,56	0,6	4,3	3,5	13,1	220
Ine CAJ TRU 21	CAJAMAR2	TRUJNOR2	137,02	7,5	67,5	39,1	196,0	220
Ine CAL PAC 21	CALLAHU2	PACHACA2	72,64	4,1	35,5	22,6	111,6	220
Ine CAL PAC 22	CALLAHU2	PACHACA2	72,64	4,1	35,5	22,6	111,6	220
Ine CAM COT 21	CAMPOAR2	COTARU1	294	11,6	113,0	62,4	336,0	220
Ine CAM COT 22	CAMPOAR2	COTARU2	294	11,6	113,0	62,4	336,0	220
Ine CAM HCV 21	CAMPOAR2	HUANCAV2	67	4,1	35,5	17,3	107,1	220
Ine CAM HYU 21	HUAYUCA2	CAMPOAR2	79,59	4,4	39,8	20,6	121,2	220
Ine CAM PAC 21	PACHACA2	CAMPOAR2	195,13	11,7	98,0	58,6	317,0	220
Ine CAM PAC 22	PACHACA2	CAMPOAR2	195,13	11,7	98,0	58,6	317,0	220
Ine CAM POM 21	CAMPOAR2	POMACOC2	192,33	11,7	98,0	57,7	312,4	220
Ine CAM POM 22	CAMPOAR2	POMACOC2	192,24	11,7	98,0	57,7	312,3	220
Ine CAM RES 21	CAMPOAR2	RESTITU2	1,62	0,1	0,8	0,5	2,6	220
Ine CAM RES 22	CAMPOAR2	RESTITU2	1,62	0,1	0,8	0,5	2,6	220
Ine CAM RES 23	CAMPOAR2	RESTITU2	1,62	0,1	0,8	0,5	2,6	220
Ine CAR ORQ 21	CARHUAM2	OROYANU2	75,5	4,0	38,4	17,8	111,7	220
Ine CAR PSH 21	CARHUAM2	PARAGSH2	42,2	2,2	20,9	12,0	60,4	220
Ine CAR YUN 21	CARHUAM2	YUNCAN 2	53,2	2,9	27,1	15,2	76,1	220
Ine CCA IND 21	CHILCA 220	INDEPEN2	116,24	9,6	56,6	54,1	166,5	220
Ine CCA SNJ 21	CHILCA 220	SANJUAN2	61	5,0	29,7	28,4	87,4	220
Ine CHA VEN 21	CHAVARR2	VENTANI2	10,56	0,9	5,3	4,2	15,1	220
Ine CHA VEN 22	CHAVARR2	VENTANI2	10,56	0,9	5,3	4,2	15,1	220
Ine CHA VEN 23	CHAVARR2	VENTANI2	11,08	1,0	5,5	4,4	15,9	220
Ine CHI CAR 21	CHICLAY2	CARHUAQ2	83	7,5	40,7	33,3	118,2	220
Ine CHI PAR 21	CHIMBOT2	PARAMON2	221,17	19,9	106,2	79,9	321,5	220
Ine CHI PAR 22	CHIMBOT2	PARAMON2	221,17	19,9	106,2	79,9	321,5	220
Ine CHI TRN 21	CHIMBOT2	TRUJNOR2	134	9,0	64,3	40,2	191,2	220
Ine CHI TRN 22	CHIMBOT2	TRUJNOR2	134	7,7	64,7	40,9	190,4	220
Ine CHI YAN 21	CHIMAY 2	YANANGO2	40	2,0	20,8	8,9	60,5	220
Ine CO1 COT 21	COTARU1	COTARUS2	0,5	0,0	0,2	0,1	0,6	220
Ine CO2 COT 21	COTARU2	COTARUS2	0,5	0,0	0,2	0,1	0,6	220
Ine COT SOC 21	COTARU21	SOCABAY2	315	12,5	121,1	66,8	360,0	220
Ine COT SOC 22	COTARU22	SOCABAY2	315	12,5	121,1	66,8	360,0	220
Ine EDE CAL 21	EDEGEL 2	CALLAHU2	0,58	0,0	0,3	0,2	0,9	220
Ine EDE CHA 21	EDEGEL 2	CHAVARR2	55,4	4,1	27,5	18,5	74,7	220
Ine GUA CHI 21	GUADALU2	CHICLAY2	83,62	7,8	44,5	29,8	129,3	220
Ine GUA TRU 21	GUADALU2	TRUJNOR2	103,21	9,6	55,0	36,4	159,6	220
Ine HCH PAR 21	PARAMON2	HCHO 220	55,63	5,0	27,8	20,3	87,3	220
Ine HCH ZAP 21	HCHO 220	ZAPALLA2	103,86	9,3	51,9	38,0	163,1	220
Ine HCO SRO 21	HUINCO 2	SROSA 2	62	4,6	31,2	24,1	95,4	220
Ine HCO SRO 22	HUINCO 2	SROSA 2	62	4,6	31,2	24,1	95,4	220
Ine HCV IND 21	HUANCAV2	INDEPEN2	180,78	11,0	95,8	46,8	289,1	220
Ine HYU ZAP 21	HUAYUCA2	ZAPALLA2	244,4	14,2	122,2	63,2	390,8	220
Ine ICA IND 21	INDEPEN2	ICA 2	55,19	4,6	27,0	20,4	78,0	220
Ine ICA MAR 21	ICA 2	MARCONA2	155	12,9	76,0	57,4	218,6	220
Ine IND CAM 21	INDEPEN2	CAMPOAR2	248,53	15,2	131,7	64,3	397,4	220
Ine IND SAN 21	SANJUAN2	INDEPEN2	216,24	18,0	106,0	92,9	309,7	220
Ine MAT EDE 21	MATUCAN2	EDEGEL 2	22,5	1,7	11,3	7,5	32,8	220
Ine MOQ ILO 21	MOQUEGU2	ILO 220	72,45	5,2	28,2	32,2	67,0	220
Ine MOQ ILO 22	MOQUEGU2	ILO 220	72,45	5,2	28,2	32,2	67,0	220
Ine MOQ SOC 21	MOQUEGU2	SOCABAY2	106,74	7,1	52,4	35,4	153,8	220
Ine MOQ SOC 22	MOQUEGU2	SOCABAY2	106,74	7,1	52,4	35,4	153,8	220
Ine MOQ TAC 21	MOQUEGU2	LHEROES2	124,33	7,6	63,6	55,3	114,9	220
Ine ORQ PAC 21	OROYANU2	PACHACA2	21,63	1,1	11,0	5,1	32,0	220
Ine PAC POM 21	PACHACA2	POMACOC2	13,46	0,8	6,7	3,5	21,5	220
Ine PAC YAN 21	PACHACA2	YANANGO2	89,4	4,5	46,5	19,9	135,2	220
Ine PAR ZAP 21	PARAMON2	ZAPALLA2	159,5	14,3	79,8	58,3	250,4	220
Ine PIU CHI 21	PIURAO 2	CHICLAY2	211,19	16,2	104,2	79,1	300,2	220
Ine POM SAN 21	POMACOC2	SANJUAN2	113,5	6,9	55,6	35,8	184,4	220
Ine POM SAN 22	POMACOC2	SANJUAN2	113,5	6,9	55,6	35,8	184,4	220
Ine PSH VIZ 21	PARAGSH2	VIZCARR2	123,9	6,5	63,0	29,3	183,3	220
Ine PUN MOQ 21	PUNO 2	MOQUEGU2	196,63	9,2	97,8	65,1	283,4	220
Ine REF CHA 21	CJMARQUI	CHAVARR2	21,42	1,6	10,6	7,2	28,9	220
Ine REF EDE 21	CJMARQUI	EDEGEL 2	36,4	2,7	18,1	12,2	49,1	220
Ine SAN SRO 21	SROSA 2	SANJUAN2	26,28	1,9	12,9	8,2	38,1	220
Ine SAN SRO 22	SANJUAN2	SROSA 2	26,28	1,9	12,9	8,2	38,1	220
Ine SRO CHA 21	SROSA 2	CHAVARR2	8,35	0,6	4,2	2,7	12,1	220
Ine SRO CHA 22	SROSA 2	CHAVARR2	8,35	0,6	4,2	2,7	12,1	220
Ine TAL PIU 21	TALARA 2	PIURAO 2	103,8	7,4	51,9	37,5	160,2	220
Ine TAL ZOR 21	TALARA 2	ZORRITO2	137	8,9	68,5	49,5	200,7	220
Ine TIN VIZ 21	TINGOMA2	VIZCARR2	173,7	10,0	87,7	49,6	248,5	220
Ine VIZ ANT 21	VIZCARR2	ANTAMIN2	52,08	3,0	26,6	13,5	77,2	220
Ine VIZ PAR 21	VIZCARR2	PARAMON2	145,29	8,4	73,4	41,5	207,8	220
Ine ZAP VEN 21	ZAPALLA2	VENTANI2	18	1,6	8,9	7,1	26,6	220
Ine ZAP VEN 22	ZAPALLA2	VENTANI2	18	1,5	9,6	7,1	26,6	220
lr COT MCH 21	COT_mch 21	cot_MCH 21	199,8	12,3	102,2	88,9	184,7	220
lr COT_mch 21	COTARUS2	COT_mch 21	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	220
lr_cot_MCH 21	cot_MCH 21	MACHUPI2	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	220

Tabla 6.6 Datos de Líneas de 220 kV del SEIN

Máxima Demanda									Media Demanda									Mínima Demanda								
Nombre	Nº Uni.	MW	Mvar	MVA	Lím. Inf	Lím. Sup.	Tenr. p.u.	F.p.	Nombre	Nº Uni.	MW	Mvar	MVA	Lím. Inf	Lím. Sup.	Tenr. p.u.	F.p.	Nombre	Nº Uni.	MW	Mvar	MVA	Lím. Inf	Lím. Sup.	Tenr. p.u.	F.p.
zym.aquaytia	2	154,0	16,7	154,9	-20,0	100,0	1,0	1,0	zym.aquaytia	2	156,4	5,3	156,5	-20,0	100,0	1,0	1,0	zym.antamingq1	1	0,0	0,0	0,0	-4,3	8,5	1,0	1,0
zym.antamingq1	1	0,0	4,0	4,0	-4,3	8,5	1,1	0,0	zym.antamingq1	1	0	6,3	6,3	-4,3	8,5	1,1	0,0	zym.aricatq1	1	4,0	3,9	5,6	-4,5	7,5	1,0	0,7
zym.aricatq1	2	20,0	-3,3	20,3	-9,0	15,0	1,0	1,0	zym.aricatq1	1	4	-0,7	4,1	-4,5	7,5	1,0	1,0	zym.aricatq2	1	2,0	4,2	4,6	-4,5	6,9	1,0	0,4
zym.aricatq2	1	10,0	5,1	11,2	-4,5	6,9	1,1	0,9	zym.aricatq2	1	2	0,6	2,1	-4,5	6,9	1,0	1,0	zym.batiflac	1	2,3	0,7	2,4	-0,8	1,5	1,0	1,0
zym.batiflac	1	2,3	1,4	2,7	-0,8	1,5	1,0	0,9	zym.batiflac	1	2,3	0,7	2,4	-0,8	1,5	1,0	1,0	zym.cahua_q1	2	30,0	1,1	30,0	-14,2	28,5	1,0	1,0
zym.cahua_q1	2	40,0	0,2	40,0	-14,2	28,5	1,1	1,0	zym.cahua_q1	2	35	-7,9	35,9	-14,2	28,5	1,0	1,0	zym.callahu4	1	34,0	-4,5	34,3	-5,0	15,0	1,0	1,0
zym.callahu4	1	6,4	-1,0	6,5	-1,2	2,3	1,0	1,0	zym.callahu4	1	35	4,9	35,3	-5,0	15,0	1,1	1,0	zym.callahu4	3	36,6	-5,5	37,0	-12,4	24,8	1,0	1,0
zym.callahu4_2	3	18,9	-3,0	19,1	-6,0	7,5	1,0	1,0	zym.callahu4	3	39	0,7	39,0	-12,4	24,8	1,1	1,0	zym.carhuaqu	3	60,0	24,6	64,8	-31,4	62,9	1,0	0,9
zym.callahu4	1	35,0	15,5	38,3	-5,0	15,0	1,1	0,9	zym.carhuaqu	3	75	5,4	75,2	-31,4	62,9	1,0	1,0	zym.cañdpata	5	180,0	1,2	180,0	-22,0	44,0	1,0	1,0
zym.callahu4	3	39,0	14,2	41,5	-12,4	24,8	1,1	0,9	zym.cañdpata	6	240	18,8	240,7	-26,4	52,7	1,1	1,0	zym.charcall	2	3,8	0,0	3,8	-0,8	1,5	1,0	1,0
zym.callahu4	3	87,0	-3,2	87,1	-31,4	62,9	1,0	1,0	zym.charcall	2	3,8	0,2	3,8	-0,8	1,5	1,0	1,0	zym.charcall	3	0,6	0,2	0,6	-0,1	0,2	1,0	0,9
zym.carhuaqu	3	87,0	-3,2	87,1	-31,4	62,9	1,0	1,0	zym.charcall	3	0,6	0,2	0,6	-0,1	0,2	1,0	0,9	zym.charcallV	2	10,6	2,7	10,9	-2,5	4,9	1,0	1,0
zym.cañdpata	6	240,0	-7,9	240,1	-26,4	52,7	1,1	1,0	zym.charcallV	2	10,6	3,7	11,2	-2,5	4,9	1,0	0,9	zym.charcaVI	1	6,9	1,9	7,2	-1,9	2,9	1,0	1,0
zym.compacar	3	21,0	6,0	21,8	-4,7	9,3	1,0	1,0	zym.charcaVI	1	6,9	2,4	7,3	-1,9	2,9	1,0	0,9	zym.charcaI	2	1,6	1,0	1,9	-0,7	1,4	1,0	0,8
zym.charcall	2	3,8	0,2	3,8	-0,8	1,5	1,0	1,0	zym.charcaI	2	1,6	1,0	1,9	-0,7	1,4	1,0	0,8	zym.charcaV	2	90,0	-0,6	90,0	-35,3	70,7	1,0	1,0
zym.charcall	3	0,6	0,2	0,6	-0,1	0,2	1,0	0,9	zym.charcaV	3	126	8,9	126,3	-53,0	106,0	1,0	1,0	zym.chimayq1	2	110,0	2,5	110,0	-20,0	60,0	1,0	1,0
zym.charcall	3	0,6	0,2	0,6	-0,1	0,2	1,0	0,9	zym.chimayq1	2	150	18,6	151,2	-20,0	60,0	1,0	1,0	zym.gallicia	1	17,0	0,3	17,0	-6,2	10,5	1,0	1,0
zym.charcallV	2	10,6	4,3	11,4	-2,5	4,9	1,0	0,9	zym.charcaV	3	126	8,9	126,3	-53,0	106,0	1,0	1,0	zym.huampani	2	30,0	-1,0	30,0	-11,2	20,0	1,0	1,0
zym.charcaVI	1	6,9	1,9	7,2	-1,9	2,9	1,0	1,0	zym.charcaVI	1	6,9	2,4	7,3	-1,9	2,9	1,0	0,9	zym.huampani	2	18,2	-3,0	18,4	-5,9	11,9	1,1	1,0
zym.charcaI	2	1,6	1,0	1,9	-0,7	1,4	1,0	0,8	zym.charcaI	2	1,6	1,0	1,9	-0,7	1,4	1,0	0,8	zym.huincea_3	4	85,6	57,9	103,4	-89,6	179,2	1,0	0,8
zym.charcaI	2	1,6	1,0	1,9	-0,7	1,4	1,0	0,8	zym.charcaI	2	1,6	1,0	1,9	-0,7	1,4	1,0	0,8	zym.huincea_4	1	60,0	14,5	61,7	-22,4	44,8	1,0	1,0
zym.charcaV	2	90,0	-0,6	90,0	-35,3	70,7	1,0	1,0	zym.charcaI	2	186,4	62,3	196,6	-89,6	179,2	1,0	0,9	zym.ila_tu1	1	10,0	0,0	10,0	-2,8	5,5	1,0	1,0
zym.chimayq1	2	110,0	2,5	110,0	-20,0	60,0	1,0	1,0	zym.charcaI	2	186,4	62,3	196,6	-89,6	179,2	1,0	0,9	zym.ila_tu3	1	20,0	5,9	20,9	-8,1	15,5	1,0	1,0
zym.gallicia	1	17,0	0,3	17,0	-6,2	10,5	1,0	1,0	zym.huampani	2	29	3,8	29,2	-11,2	20,0	1,0	1,0	zym.indecr01	1	0,0	14,6	14,6	-10,0	20,0	1,0	0,0
zym.huampani	2	30,0	-1,0	30,0	-11,2	20,0	1,0	0,8	zym.huampani	2	29	3,8	29,2	-11,2	20,0	1,0	1,0	zym.machupic	3	83,1	12,6	84,1	-24,0	51,0	1,0	1,0
zym.huampani	2	18,2	-3,0	18,4	-5,9	11,9	1,1	1,0	zym.huincea_3	4	186,4	62,3	196,6	-89,6	179,2	1,0	0,9	zym.malparq1	1	15,0	-0,4	15,0	-4,2	8,4	1,0	1,0
zym.huincea_3	4	85,6	57,9	103,4	-89,6	179,2	1,0	0,8	zym.huincea_4	1	60,0	14,5	61,7	-22,4	44,8	1,0	1,0	zym.malparq1	1	15,0	-0,4	15,0	-4,2	8,4	1,0	1,0
zym.huincea_4	1	60,0	14,5	61,7	-22,4	44,8	1,0	1,0	zym.ila_tu1	1	10	0,1	10,0	-2,8	5,5	1,0	1,0	zym.malparq1	1	15,0	-0,4	15,0	-4,2	8,4	1,0	1,0
zym.ila_tu3	1	20,0	5,9	20,9	-8,1	15,5	1,0	1,0	zym.ila_tu3	1	20	5,0	20,6	-8,1	15,5	1,0	1,0	zym.malparq1	1	15,0	-0,4	15,0	-4,2	8,4	1,0	1,0
zym.ila_tu1	1	10,0	0,0	10,0	-2,8	5,5	1,0	1,0	zym.indecr01	1	0	13,2	13,2	-10,0	20,0	1,0	0,0	zym.manta_4	4	400,0	81,7	408,2	-116,2	232,5	1,0	1,0
zym.ila_tu3	1	20,0	5,9	20,9	-8,1	15,5	1,0	1,0	zym.machupic	3	83,1	10,8	83,8	-24,0	51,0	1,0	1,0	zym.manta5_7	3	222,0	22,3	223,1	-87,2	174,4	1,0	1,0
zym.ila_tu1	1	10,0	0,0	10,0	-2,8	5,5	1,0	1,0	zym.malparq1	1	15,0	10,8	83,8	-24,0	51,0	1,0	1,0	zym.matucaq1	1	55	19,2	58,2	-20,0	42,5	1,0	0,9
zym.indecr01	1	0,0	14,6	14,6	-10,0	20,0	1,0	0,0	zym.malparq1	1	15,0	10,8	83,8	-24,0	51,0	1,0	1,0	zym.matucaq1	1	55	19,2	58,2	-20,0	42,5	1,0	0,9
zym.machupic	3	83,1	14,7	84,4	-24,0	51,0	1,0	1,0	zym.manta_4	4	400	27,8	401,0	-116,2	232,5	1,0	1,0	zym.matucaq1	1	55	19,2	58,2	-20,0	42,5	1,0	0,9
zym.malparq1	1	15,0	-0,4	15,0	-4,2	8,4	1,0	1,0	zym.manta5_7	3	222	22,3	223,1	-87,2	174,4	1,0	1,0	zym.matucaq2	1	55	19,3	58,3	-20,0	42,5	1,0	0,9
zym.malparq1	1	15,0	-0,4	15,0	-4,2	8,4	1,0	1,0	zym.matucaq1	1	55	19,2	58,2	-20,0	42,5	1,0	0,9	zym.matucaq2	1	55	19,3	58,3	-20,0	42,5	1,0	0,9
zym.malparq1	1	15,0	-0,4	15,0	-4,2	8,4	1,0	1,0	zym.matucaq2	1	55	19,3	58,3	-20,0	42,5	1,0	0,9	zym.matucaq2	1	55	19,3	58,3	-20,0	42,5	1,0	0,9
zym.malparq1	1	15,0	-0,4	15,0	-4,2	8,4	1,0	1,0	zym.matucaq2	1	55	19,3	58,3	-20,0	42,5	1,0	0,9	zym.matucaq2	1	55	19,3	58,3	-20,0	42,5	1,0	0,9
zym.malparq1	1	15,0	-0,4	15,0	-4,2	8,4	1,0	1,0	zym.matucaq2	1	55	19,3	58,3	-20,0	42,5	1,0	0,9	zym.matucaq2	1	55	19,3	58,3	-20,0	42,5	1,0	0,9
zym.malparq1	1	15,0	-0,4	15,0	-4,2	8,4	1,0	1,0	zym.matucaq2	1	55	19,3	58,3	-20,0	42,5	1,0	0,9	zym.matucaq2	1	55	19,3	58,3	-20,0	42,5	1,0	0,9
zym.malparq1	1	15,0	-0,4	15,0	-4,2	8,4	1,0	1,0	zym.matucaq2	1	55	19,3	58,3	-20,0	42,5	1,0	0,9	zym.matucaq2	1	55	19,3	58,3	-20,0	42,5	1,0	0,9
zym.malparq1	1	15,0	-0,4	15,0	-4,2	8,4	1,0	1,0	zym.matucaq2	1	55	19,3	58,3	-20,0	42,5	1,0	0,9	zym.matucaq2	1	55	19,3	58,3	-20,0	42,5	1,0	0,9
zym.malparq1	1	15,0	-0,4	15,0	-4,2	8,4	1,0	1,0	zym.matucaq2	1	55	19,3	58,3	-20,0	42,5	1,0	0,9	zym.matucaq2	1	55	19,3	58,3	-20,0	42,5	1,0	0,9
zym.malparq1	1	15,0	-0,4	15,0	-4,2	8,4	1,0	1,0	zym.matucaq2	1	55	19,3	58,3	-20,0	42,5	1,0	0,9	zym.matucaq2	1	55	19,3	58,3	-20,0	42,5	1,0	0,9
zym.malparq1	1	15,0	-0,4	15,0	-4,2	8,4	1,0	1,0	zym.matucaq2	1	55	19,3	58,3	-20,0	42,5	1,0	0,9	zym.matucaq2	1	55	19,3	58,3	-20,0	42,5	1,0	0,9
zym.malparq1	1	15,0	-0,4	15,0	-4,2	8,4	1,0	1,0	zym.matucaq2	1	55	19,3	58,3	-20,0	42,5	1,0	0,9	zym.matucaq2	1	55	19,3	58,3	-20,0	42,5	1,0	0,9
zym.malparq1	1	15,0	-0,4	15,0	-4,2	8,4	1,0	1,0	zym.matucaq2	1	55	19,3	58,3	-20,0	42,5	1,0	0,9	zym.matucaq2	1	55	19,3	58,3	-20,0	42,5	1,0	0,9
zym.malparq1	1	15,0	-0,4	15,0	-4,2	8,4	1,0	1,0	zym.matucaq2	1	55	19,3	58,3	-20,0	42,5	1,0	0,9	zym.matucaq2	1	55	19,3	58,3	-20,0	42,5	1,0	0,9
zym.malparq1	1	15,0	-0,4	15,0	-4,2	8,4	1,0	1,0	zym.matucaq2	1	55	19,3	58,3	-20,0	42,5	1,0	0,9	zym.matucaq2	1	55	19,3	58,3	-20,0	42,5	1,0	0,9
zym.malparq1	1	15,0	-0,4	15,0	-4,2	8,4	1,0	1,0	zym.matucaq2	1	55	19,3	58,3	-20,0	42,5	1,0	0,9	zym.matucaq2	1	55	19,3	58,3	-20,0	42,5	1,0	0,9
zym.malparq1	1	15,0	-0,4	15,0	-4,2	8,4	1,0	1,0	zym.matucaq2	1	55	19,3	58,3	-20,0	42,5	1,0	0,9	zym.matucaq2	1	55	19,3	58,3	-20,0	42,5	1,0	0,9
zym.malparq1	1	15,0	-0,4	15,0	-4,2	8,4	1,0	1,0	zym.matucaq2	1	55	19,3	58,3	-20,0	42,5	1,0	0,9	zym.matucaq2	1	55	19,3	58,3	-20,0	42,5	1,0	0,9
zym.malparq1	1	15,0	-0,4	15,0	-4,2	8,4	1,0																			

Máxima Demanda									Media Demanda									Mínima Demanda									
Nombre	Nº Uni.	MW	Mvar	MVA	Lím. Inf Mvar	Lím. Sup. Mvar	Tenr. p.u.	f.p.	Nombre	Nº Uni.	MW	Mvar	MVA	Lím. Inf Mvar	Lím. Sup. Mvar	Tenr. p.u.	f.p.	Nombre	Nº Uni.	MW	Mvar	MVA	Lím. Inf Mvar	Lím. Sup. Mvar	Tenr. p.u.	f.p.	
sym agusytia	2,0	156,4	20,7	157,8	-20,0	100,0	1,1	1,0	sym agusytia	2	156,4	2,7	156,4	-20,0	100,0	1,0	1,0	sym agusytia	2	156,4	14,3	157,1	-20,0	100,0	1,0	1,0	
sym antaming1	1,0	0,0	-4,0	4,0	-4,3	8,5	1,1	0,0	sym antaming1	1	0,0	0,0	0,0	-4,3	8,5	1,1	0,0	sym aricotg1	1	4,0	1,3	4,4	-4,5	7,5	1,0	0,3	
sym aricotg1	2,0	20,0	5,3	20,7	-3,0	15,0	1,1	1,0	sym aricotg1	1	4,0	-1,3	4,4	-4,5	7,5	1,0	0,3	sym aricotg2	1	2,0	1,3	2,4	-4,5	6,3	1,0	0,8	
sym aricotg2	1,0	10,0	4,8	11,1	-4,5	6,3	1,1	0,3	sym aricotg2	1	2,0	0,3	2,0	-4,5	6,3	1,0	1,0	sym botiflac	1	2,3	-0,7	2,4	-0,8	1,5	1,0	1,0	
sym botiflac	1,0	2,3	0,7	2,4	-0,8	1,5	1,0	1,0	sym botiflac	1	2,3	-0,7	2,4	-0,8	1,5	1,0	1,0	sym cahua_g1	2	25,0	-1,2	25,0	-14,2	28,5	1,0	1,0	
sym cahua_g1	2,0	40,0	1,2	40,0	-14,2	28,5	1,1	1,0	sym cahua_g1	2	35,0	-6,2	35,5	-14,2	28,5	1,0	1,0	sym callahu4	1	34,0	-4,8	34,3	-5,0	15,0	1,0	1,0	
sym calanag1	1,0	6,4	0,1	6,4	-1,2	2,3	1,0	1,0	sym callahu4	1	34,0	6,2	34,6	-5,0	15,0	1,1	1,0	sym callahu4	3	34,8	-12,2	36,3	-12,4	24,8	1,0	0,3	
sym calanag2	3,0	18,3	0,3	18,3	-6,0	7,5	1,0	1,0	sym callahu4	3	36,0	2,7	36,1	-12,4	24,8	1,1	1,0	sym carhuasu	2	30,0	5,3	30,5	-20,3	41,3	1,0	1,0	
sym callahu4	1,0	35,0	4,4	35,3	-5,0	15,0	1,1	1,0	sym carhuasu	3	60,0	4,1	60,1	-31,4	62,3	1,0	1,0	sym cañdpato	3	120,0	-3,3	120,1	-13,2	26,4	1,0	1,0	
sym callahu4	3,0	33,0	6,0	33,5	-12,4	24,8	1,1	1,0	sym cañdpato	5	187,5	26,3	183,3	-22,0	44,0	1,0	1,0	sym charcall	2	3,8	0,0	3,8	-0,8	1,5	1,0	1,0	
sym carhuasu	3,0	87,0	-4,1	87,1	-31,4	62,3	1,0	1,0	sym charcall	2	3,8	0,2	3,8	-0,8	1,5	1,0	1,0	sym charcallV	2	10,6	0,4	10,6	-2,5	4,3	1,0	0,3	
sym cañdpato	6,0	225,0	11,3	225,3	-26,4	52,7	1,1	1,0	sym charcallV	3	0,6	0,2	0,6	-0,1	0,2	1,0	0,3	sym charcaVI	1	6,3	0,4	6,3	-1,3	2,3	1,0	1,0	
sym cempasca	3,0	21,0	-1,7	21,1	-4,7	3,3	1,0	1,0	sym charcaVI	2	10,6	4,7	11,6	-2,5	4,3	1,0	0,3	sym charca_V	1	6,3	1,7	7,1	-1,3	2,3	1,0	1,0	
sym charcall	2,0	3,8	0,2	3,8	-0,8	1,5	1,0	1,0	sym charca_V	1	1,6	1,0	1,3	-0,7	1,4	1,0	0,8	sym charca_V	1	48,0	0,6	48,0	-17,7	35,3	1,0	1,0	
sym charcall	3,0	0,6	0,1	0,6	-0,1	0,2	1,0	1,0	sym charca_V	3	33,3	11,3	100,5	-53,0	106,0	1,0	1,0	sym chimayg1	1	65,0	-1,7	65,0	-10,0	30,0	1,0	1,0	
sym charcaV	2,0	10,6	3,3	11,1	-2,5	4,3	1,0	1,0	sym chimayg1	2	120,0	6,3	120,2	-20,0	60,0	1,0	1,0	sym huampani	2	23,0	4,8	23,4	-11,2	20,0	1,0	1,0	
sym charcaVI	1,0	6,3	2,7	7,4	-1,3	2,3	1,0	0,3	sym chimayg1	2	10,0	1,3	10,1	-3,0	6,0	1,0	1,0	sym huanchor	2	18,2	-3,3	18,5	-5,3	11,3	1,1	1,0	
sym charca_V	2,0	1,6	0,4	1,6	-0,7	1,4	1,0	1,0	sym curumuy1	1	17,0	5,4	17,8	-6,2	10,5	1,1	1,0	sym huinco1_3	4	195,5	71,2	208,1	-83,6	173,2	1,0	0,3	
sym charca_V	3,0	126,0	16,7	127,1	-53,0	106,0	1,0	1,0	sym galleg1	1	17,0	5,4	17,8	-6,2	10,5	1,1	1,0	sym huinco_4	1	60,0	17,8	62,6	-22,4	44,8	1,0	1,0	
sym chimayg1	2,0	150,0	20,8	151,4	-20,0	60,0	1,0	1,0	sym galleg1	1	17,0	5,4	17,8	-6,2	10,5	1,1	1,0	sym ilo_tv1	1	20,0	0,1	20,0	-2,8	5,5	1,0	1,0	
sym curumuy1	1,0	10,0	0,1	10,0	-3,0	6,0	1,0	1,0	sym huampani	2	23,0	8,8	30,3	-11,2	20,0	1,0	1,0	sym ilo_tv3	1	56,0	-0,6	56,0	-8,1	15,5	1,0	1,0	
sym galleg1	2,0	34,0	5,3	34,4	-12,3	21,0	1,1	1,0	sym huanchor	2	18,2	-3,3	18,5	-5,3	11,3	1,1	1,0	sym indecs01	1	0,0	-3,5	3,5	-10,0	20,0	1,0	0,0	
sym huampani	2,0	30,0	4,3	30,3	-11,2	20,0	1,0	1,0	sym huinco1_3	4	195,5	71,2	208,1	-83,6	173,2	1,0	0,3	sym machupic	3	83,1	3,6	83,7	-24,0	51,0	1,0	1,0	
sym huanchor	2,0	18,2	-0,8	18,2	-5,3	11,3	1,0	1,0	sym huinco_4	1	60,0	17,8	62,6	-22,4	44,8	1,0	1,0	sym malpacg4	1	73,8	18,7	82,0	-12,0	40,0	1,0	1,0	
sym huinco1_3	3,0	200,2	61,5	203,5	-67,2	134,4	1,0	1,0	sym ilo_tv1	1	20,0	0,1	20,0	-2,8	5,5	1,0	1,0	sym malpacg1	2	25,0	2,0	25,1	-8,4	16,8	1,0	1,0	
sym huinco_4	1,0	66,7	20,5	63,8	-22,4	44,8	1,0	1,0	sym ilo_tv3	1	56,0	-0,6	56,0	-8,1	15,5	1,0	1,0	sym manta1_4	4	388,0	43,7	390,5	-116,2	232,5	1,0	1,0	
sym ilo_tv1	1,0	20,0	4,0	20,4	-2,8	5,5	1,0	1,0	sym indecs01	1	0,0	-3,5	3,5	-10,0	20,0	1,0	0,0	sym manta5_7	2	216,0	23,0	217,2	-58,1	116,2	1,0	1,0	
sym ilo_tv3	1,0	56,0	7,3	56,6	-8,1	15,5	1,0	1,0	sym machupic	3	83,1	3,6	83,7	-24,0	51,0	1,0	1,0	sym moyopam	2	60,0	15,8	62,0	-19,1	38,2	1,0	1,0	
sym indecs01	1,0	0,0	15,5	15,5	-10,0	20,0	1,0	0,0	sym malpacg4	1	73,8	18,7	82,0	-12,0	40,0	1,0	1,0	sym oroya_g1	2	6,8	1,6	7,0	-2,0	4,1	1,0	1,0	
sym machupic	3,0	83,1	15,8	84,6	-24,0	51,0	1,0	1,0	sym malpacg1	2	25,0	2,0	25,1	-8,4	16,8	1,0	1,0	sym pachacha	3	7,8	-1,1	7,3	-3,1	5,4	1,0	1,0	
sym malpacg4	1,0	73,8	19,0	82,0	-12,0	40,0	1,0	1,0	sym manta1_4	4	388,0	43,7	390,5	-116,2	232,5	1,0	1,0	sym pachacha	3	7,8	-1,3	8,0	-3,1	5,4	1,0	1,0	
sym malpacg1	3,0	44,1	1,7	44,1	-12,6	25,1	1,0	1,0	sym manta5_7	2	216,0	23,0	217,2	-58,1	116,2	1,0	1,0	sym paria_g1	1	2,0	1,8	2,7	-1,3	2,0	1,1	0,7	
sym manta1_4	4,0	388,0	40,5	390,1	-116,2	232,5	1,0	1,0	sym matucag1	1	50,0	20,7	54,1	-20,0	42,5	1,0	0,3	sym restituc	3	186,0	-1,3	186,0	-68,5	137,0	1,0	1,0	
sym manta5_7	3,0	216,0	23,5	218,0	-87,2	114,4	1,0	1,0	sym matucag2	1	50,0	20,7	54,1	-20,0	42,5	1,0	0,3	sym zangaban	1	40,0	-8,3	41,0	-19,7	34,5	1,0	1,0	
sym matucag1	1,0	62,5	42,0	75,3	-20,0	42,5	1,0	0,8	sym moyopam	2	60,0	15,8	62,0	-19,1	38,2	1,0	1,0	sym zangaban	1	160,0	5,3	160,1	-36,0	60,0	1,0	1,0	
sym matucag2	1,0	62,5	42,0	75,3	-20,0	42,5	1,0	0,8	sym oroya_g1	2	6,8	1,6	7,0	-2,0	4,1	1,0	1,0	sym yanangg1	1	20,0	-4,2	20,4	-10,0	20,0	1,0	1,0	
sym mollengd	3,0	30,0	0,0	30,0	-6,5	12,3	1,0	1,0	sym pachacha	3	7,8	-1,1	7,3	-3,1	5,4	1,0	1,0	sym ysupi_g1	3	48,0	-15,2	50,3	-18,0	38,3	1,0	1,0	
sym moyopam	2,0	63,0	30,0	63,8	-19,1	38,2	1,0	0,3	sym paria_g1	1	2,0	0,0	2,0	-1,3	2,0	1,0	1,0	sym ysupi_g2	2	32,0	0,2	32,0	-7,3	15,8	1,0	1,0	
sym oroya_g1	2,0	6,8	0,6	6,8	-2,0	4,1	1,0	1,0	sym piura_g5	1	20,0	7,6	21,4	-6,4	12,8	1,1	0,3	sym yuncang1	1	50,0	-10,5	51,1	-25,0	50,0	1,0	1,0	
sym pachacha	3,0	7,8	-0,7	7,8	-3,1	5,4	1,0	1,0	sym restituc	3	207,3	78,8	222,3	-68,5	137,0	1,0	0,3										
sym paria_g1	1,0	2,0	1,9	2,8	-1,3	2,0	1,0	0,7	sym zangaban	2	60,0	0,4	60,0	-39,4	69,0	1,0	1,0										
sym piura_g5	1,0	20,0	8,8	21,3	-6,4	12,8	1,0	0,3	sym ventang1	1	160,0	30,4	162,3	-36,0	60,0	1,0	1,0										
sym restituc	3,0	207,3	110,5	235,5	-68,5	137,0	1,0	0,3	sym ventang2	1	160,0	19,4	161,2	-24,3	48,0	1,0	1,0										
sym zangaban	2,0	100,0	7,5	100,3	-33,4	63,0	1,0	1,0	sym yanangg1	1	20,0	4,4	20,5	-10,0	20,0	1,1	1,0										
sym tumbesg1	2,0	18,0	4,0	18,4	-2,3	4,6	1,0	1,0	sym ysupi_g1	3	60,0	6,6	60,4	-18,0	38,3	1,0	1,0										
sym ventang1	1,0	160,0	53,0	170,5	-36,0	60,0	1,0	0,3	sym ysupi_g2	2	40,0	4,7	40,3	-7,3	15,8	1,0	1,0										
sym ventang2	1,0	160,0	47,0	166,8	-24,3	48,0	1,0	1,0	sym yuncang1	1	40,0	-20,3	44,8	-25,0	50,0	1,0	0,3										
sym yanangg1	1,0	20,0	8,2	21,6	-10,0	20,0	1,1	0,3																			
sym yarinaco	4,0	24,0	-5,2	24,5	-10,6	21,3	1,0	1,0																			
sym ysupi_g1	3,0	60,0	-12,0	61,2	-18,0	38,3	1,0	1,0																			
sym ysupi_g2	2,0	42,0	-0,6	42,0	-7,3	15,8	1,0	1,0																			
sym yuncang1	2,0	130,0	12,5	130,6	-50,0	100,0	1,0	1,0																			

Tabla 6.8 Datos de Generadores del SEIN - Escenario de Estiaje

Nombre	Barra	Máxima		Media		Mínima		Nombre	Barra	Máxima		Media		Mínima		Nombre	Barra	Máxima		Media		Mínima	
		MW	Mvar	MW	Mvar	MW	Mvar			MW	Mvar	MW	Mvar	MW	Mvar			MW	Mvar	MW	Mvar	MW	Mvar
arm-Antamin3-1	ANTAMIN3	39,7	14,4	39,7	14,4	39,7	14,4	lad-challapa	CHALLAPA	8,4	3,6	6,0	2,5	4,3	1,7	lad-juliaca1	TAPARACH	10,2	5,0	5,8	2,8	4,9	2,2
arm-Antamin3-2	ANTAMIN3	23,8	7,2	23,8	7,2	23,8	7,2	lad-charca43	CHARCAIV	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	lad-lafundic	LAFUNDIC	3,7	1,2	3,5	1,2	2,8	0,9
arm-Antamin3-3	ANTAMIN3	8,0	2,4	8,0	2,4	8,0	2,4	lad-charca33	CHARCA33	6,3	2,3	12,1	5,2	12,1	4,0	lad-lima_60	LIMA_60	81,7	38,7	58,7	26,2	20,8	9,0
arm-Antamin3-4	ANTAMIN3	16,5	5,0	16,5	5,0	16,5	5,0	lad-chavar60	CHAVAR60	430,3	195,1	197,1	87,5	188,8	83,0	lad-livixivacion	MILLSL1	26,0	0,0	26,0	3,7	26,0	5,3
lad-abancay1	ABANCAY1	2,2	1,9	1,7	0,7	1,1	0,5	lad-chiclan1	CHICLAN1	22,1	11,1	12,5	5,8	9,3	4,2	lad-machala	MACHALA	97,9	28,6	72,5	21,1	52,7	15,4
lad-acoraz33	ACEROS33	2,5	0,9	5,0	1,8	5,0	1,8	lad-chiclaya	CHICLAYA	6,7	3,0	4,4	1,9	2,8	1,2	lad-machup1	MACHUPI1	2,8	1,3	1,4	0,6	0,9	0,4
lad-alambran	ALAMBRON	10,0	6,6	9,3	6,1	6,6	4,4	lad-chiclgmt	CHICLGMT	17,8	9,1	11,8	5,7	8,6	3,9	lad-machupic	MACHUPIC	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0
lad-antauta	ANTAUTA	0,3	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	lad-chicln60	CHICLN60	6,2	3,0	3,6	1,7	2,8	1,3	lad-malacaz	MALACAZ	17,9	8,8	12,9	5,5	10,3	4,2
lad-antutu24	ANTUTU24	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	lad-chilca_60	CHILCA_60	90,3	22,5	63,1	28,6	60,5	27,9	lad-malpaz50	MALPAZ50	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
lad-antutu50	ANTUTU50	2,8	0,8	2,8	0,8	2,8	0,8	lad-chilin33	CHILIN33	22,6	10,9	15,3	7,4	11,1	5,4	lad-mantaraq	MANTAROG	1,7	0,8	1,0	0,4	0,8	0,3
lad-aricat17	ARICOT17	0,5	0,0	0,5	0,0	0,5	0,0	lad-chimbarr	CHIMBONI	20,1	10,3	13,7	6,4	10,8	4,9	lad-marca60	MARCON60	54,6	22,8	52,3	21,5	51,2	22,0
lad-aricat27	ARICOT27	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	lad-chimbati1	CHIMBATI1	31,9	15,9	26,9	12,3	22,1	10,7	lad-matucac1	MATUCAG1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1
lad-aucayacu	AUCAYACU	0,8	0,4	0,3	0,2	0,2	0,1	lad-chumpo17	CHUMPE17	0,6	0,2	0,6	0,2	0,4	0,1	lad-mayupa50	MAYUPA50	0,7	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1
lad-auduvaz	AUDUVAZ	1,9	0,4	1,4	0,3	0,5	0,1	lad-chumpo27	CHUMPE27	1,8	1,1	1,3	0,8	0,4	0,3	lad-mepza_60	MEPSA_60	4,1	1,3	6,5	2,1	6,5	2,1
lad-ayavir17	AYAVIR17	0,4	0,2	0,2	0,1	0,3	0,1	lad-chimari	CHIMARQUI	34,3	11,3	66,0	21,7	66,0	21,7	lad-millrite	MILLITE	46,2	0,0	45,4	6,5	45,5	9,3
lad-ayavir27	AYAVIR27	0,2	0,2	0,1	0,0	0,2	0,1	lad-colan_60	COLAN_T	0,4	0,2	0,1	0,1	0,1	0,0	lad-milpa_50	MILPA_50	5,5	0,6	4,4	0,4	1,9	0,2
lad-azangar7	AZANGAR7	1,3	0,8	0,4	0,2	0,8	0,4	lad-camba24	COMBA24	1,6	0,9	0,4	0,2	0,6	0,4	lad-miran_60	MIRON_60	80,3	45,9	57,2	30,3	35,2	18,0
lad-balne60	BALNEA60	173,7	49,7	98,9	44,2	91,3	41,4	lad-cpata_66	CPATO_66	1,6	0,8	0,6	0,2	0,4	0,2	lad-mollenda	MOLLENDO	3,5	1,3	3,9	1,3	2,9	0,9
lad-barri_60	BARSI_60	288,1	154,3	148,5	70,1	115,7	53,8	lad-cpata_1	CPATO_1	5,0	1,6	6,7	2,2	6,7	2,2	lad-moly_33	MOLY_33	2,8	1,0	5,5	2,0	5,5	2,0
lad-bellavir	BELLAVIR	0,4	0,2	0,3	0,1	0,1	0,1	lad-curipata	CURIPATA	0,5	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	lad-monterri	MONTERRI	32,4	15,5	19,6	8,7	7,4	3,1
lad-belunion	BELUNION	0,6	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	lad-dolarazp	DOLORESP	21,9	11,9	14,4	6,9	8,4	3,8	lad-moqueca1	MOCUEGUA	2,2	0,9	1,1	0,6	1,0	0,5
lad-botifl13.8	BOTIFL27	34,7	8,7	33,7	8,5	33,9	8,5	lad-elarenal	ELARENAL	2,8	1,4	3,8	1,8	3,8	1,7	lad-moroc2.4	MOROC2.4	2,1	0,7	1,5	0,5	0,5	0,2
lad-botifl6.9	BOTIFL27	31,1	6,3	31,1	7,8	31,1	9,1	lad-excel17	EXCELS17	1,4	0,9	0,6	0,4	0,4	0,3	lad-moroc50	MOROT_50	2,3	0,3	0,6	0,1	0,3	0,0
lad-botifl69	BOTIFL69	8,1	0,0	8,1	0,5	8,1	0,1	lad-excel27	EXCELS27	0,2	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	lad-moyopa60	MOYOPA60	10,2	5,0	7,4	3,5	6,5	2,9
lad-cachim27	CACHIM27	1,5	0,7	0,4	0,3	0,2	0,1	lad-gallit60	GALLIT60	2,1	1,0	2,2	0,9	0,8	0,4	lad-moyopamp	MOYOPAMP	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1
lad-cachima1	CACHIMA1	13,6	7,3	24,5	13,2	24,3	13,1	lad-qaylla50	GOYLLA50	0,3	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	lad-nana_60	NANA_60	20,6	10,7	9,5	4,4	8,3	3,7
lad-cachima3	CACHIMA3	1,2	0,6	0,5	0,2	0,3	0,2	lad-quadal10	GUADAL10	7,9	3,9	5,0	2,4	4,1	1,8	lad-oraya_50	OROYA_50	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
lad-cahua_41	CAHUA_G1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	lad-quadal60	GUADAL60	2,9	0,9	1,4	0,4	0,8	0,2	lad-pacarm60	PACASM60	4,7	2,5	4,9	2,6	5,4	2,9
lad-cajamar	CAJAMAR2	35,1	9,2	40,0	8,1	42,4	7,9	lad-huachipa	HUACHIPA	37,5	17,8	32,1	14,4	20,8	8,8	lad-pachac69	PACHAC69	0,3	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0
lad-callahu6	CALLAHU6	1,0	0,5	0,9	0,5	0,8	0,4	lad-huacha_2	HUACHA_66	17,7	5,9	7,6	3,7	7,2	3,2	lad-pachacha	PACHACHA	8,5	7,0	8,5	7,0	8,5	7,0
lad-callahq1	CALLAHG1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	lad-huana60	HUANACA60	5,4	2,6	3,3	1,6	2,3	1,0	lad-paita_10	PAITA_10	6,0	3,4	6,3	3,0	3,8	1,7
lad-callahq2	CALLAHG2	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	lad-huanuca1	HUANUCO10	10,3	5,0	4,5	2,2	2,2	1,5	lad-paita_60	PAITA_60	13,1	7,4	8,0	3,7	5,9	2,6
lad-callali	CALLALI1	6,4	3,1	5,0	2,4	3,1	1,5	lad-huaraz66	HUARAZ66	5,6	2,3	3,8	1,6	2,7	1,0	lad-panda_60	PANDO_60	57,1	29,2	35,8	16,8	20,0	9,0
lad-campo69	CAMPOA69	25,7	13,1	19,8	9,7	12,0	5,6	lad-huaran50	HUARON50	5,5	1,9	4,7	1,6	2,7	0,9	lad-paraqr21	PARAGS21	19,5	4,4	18,3	3,6	9,6	1,8
lad-caraz_66	CARAZ_66	2,3	1,2	1,3	0,5	0,9	0,4	lad-huayuc60	HUAYUC60	23,9	12,0	12,1	5,9	9,5	4,3	lad-paraqr50	PARAGS50	12,8	4,7	12,8	4,2	8,6	2,7
lad-carhuac66	CARHUAC66	2,1	1,0	1,1	0,4	0,7	0,3	lad-huicra_7	HUICRA_7	0,8	0,2	0,6	0,2	0,2	0,1	lad-paramex1	PARAMER1	20,9	7,6	27,2	9,9	27,2	9,9
lad-carhuama	CARHUAMA	1,6	0,9	0,7	0,3	0,4	0,2	lad-huincog1	HUINCOG1	0,4	0,1	0,4	0,1	0,4	0,1	lad-parama26	PARAMO26	12,0	6,5	11,8	4,9	10,9	4,5
lad-carhuac2	CARHUAC2	0,5	0,2	0,2	0,1	0,1	0,0	lad-ica_10	ICA_10	9,4	3,8	9,1	3,6	5,7	2,3	lad-parque10	PARQUE10	6,2	3,0	2,8	1,3	2,0	0,9
lad-carhuacu	CARHUACU	0,3	0,0	0,3	0,0	0,3	0,0	lad-ica_60	ICA_60	22,3	8,9	30,8	12,3	19,4	7,7	lad-pindur66	PINDUR66	5,0	2,4	3,0	1,4	2,2	1,1
lad-caripa_1	CARIPA_1	13,8	5,5	9,2	3,2	3,9	1,4	lad-ila2_tu1	ILO_G1	10,0	4,0	10,0	4,0	10,0	4,0	lad-piura_tg	PIURA_TG	26,7	13,9	16,5	7,8	12,5	5,7
lad-carof_50	CASAF_50	10,7	4,0	8,5	3,1	3,7	1,4	lad-ila_tq1	ILO_TG1	0,5	0,0	0,5	0,0	0,5	0,0	lad-piura_6	PIURA_6	11,2	5,9	4,9	2,3	3,2	1,4
lad-carapalc	CASAP_50	10,5	4,0	7,4	2,8	5,7	2,1	lad-ila_tq2	ILO_TG2	0,5	0,0	0,5	0,0	0,5	0,0	lad-plantzin	FUNDIC50	42,7	11,8	33,8	12,5	14,9	5,5
lad-carapied	CASAPIED	4,6	3,1	3,7	2,5	1,6	1,1	lad-ila_tu1	ILO_TY1	22,8	0,0	18,6	2,7	19,3	3,9	lad-plasi_50	FLOSL_50	4,0	1,5	3,1	1,2	1,4	0,5
lad-carapna2	CASAPA17	0,5	0,1	0,5	0,1	0,4	0,1	lad-ila_tu2	ILOTW217	1,3	0,4	1,1	0,4	1,2	0,4	lad-paraenir	PORVENH1	4,8	2,8	4,7	2,2	3,8	1,7
lad-carapnar	CASAPNOR	0,4	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	lad-ila_tu3	ILO_TY3	0,5	0,0	0,5	0,0	0,5	0,0	lad-paind_33	PAIND_33	31,9	12,5	20,1	8,2	13,5	5,2
lad-cañdpat1	CPATO_G1	0,5	0,0	0,5	0,0	0,5	0,0	lad-ila_tu4	ILO_TY4	0,5	0,0	0,5	0,0	0,5	0,0	lad-prim_60	PRIM_60	82,7	39,9	53,4	23,8	23,9	10,1
lad-compacar	CEMPACAS	9,6	4,7	7,2	3,7	7,5	3,9	lad-ila_eloc	ILO_13.8	5,8	2,4	3,1	0,4	3,0	0,4	lad-pucalpa	PUCALLPA	11,3	6,0	7,2	3,4	5,6	2,5
lad-corraver	CERROVER	42,6	0,1	41,6	6,0	44,7	9,1	lad-indaop60	INDEPE60	42,5	21,1	32,8	15,6	23,7	10,9	lad-puento60	PUENTE60	110,2	51,7	81,9	36,3	54,8	24,0
lad-corraverur	CERVESUR	2,5	0,9	5,0	1,8	5,0	1,8	lad-indaopn2	INDEPEN2	10,0	5,3	55,0	26,6	55,0	26,6	lad-puna_10	PUNO_10	4,4	2,6	3,2	1,5	2,4	1,1
lad-cfrancu	CFRANCUS	3,6	1,1	3,4	1,1	2,6	0,8	lad-jorur_1	JESUS_33	12,6	7,1	7,4	3,6	5,7	2,8	lad-puna_60	PUNO_60	6,6	3,7	5,2	2,5	3,9	1,7

Tabla 6.9 Datos de Cargas del SEIN - Escenario de Avenida



Nombre	Barra	Máxima		Medio		Mínima		Nombre	Barra	Máxima		Medio		Mínima		Nombre	Barra	Máxima		Medio		Mínima	
		MW	Mvar	MW	Mvar	MW	Mvar			MW	Mvar	MW	Mvar	MW	Mvar			MW	Mvar	MW	Mvar	MW	Mvar
arm-Antamin3-1	ANTAMIN3	39,7	14,4	39,7	14,4	39,7	14,4	ladchallapa	CHALLAPA	8,8	3,7	6,0	2,5	4,3	1,7	ladjuliacq1	TAPARACH	10,6	5,2	6,0	2,9	4,9	2,4
arm-Antamin3-2	ANTAMIN3	23,8	7,2	23,8	7,2	23,8	7,2	ladcharca43	CHARCAIV_3	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	ladlafundic	LAFUNDIC	3,8	1,3	3,7	1,2	3,0	1,0
arm-Antamin3-3	ANTAMIN3	8,0	2,4	8,0	2,4	8,0	2,4	ladcharca_33	CHARCA	6,3	2,3	12,1	5,2	12,1	4,0	ladlima_60	LIMA_60	56,2	26,6	59,9	27,3	21,3	9,7
arm-Antamin3-4	ANTAMIN3	16,5	5,0	16,5	5,0	16,5	5,0	ladchavar60	CHAVAR60	295,9	134,2	200,4	90,9	197,0	89,7	ladlixiviacion	MILLSL1	26,0	19,0	26,0	3,7	26,0	5,3
ladabancay1	ABANCAY1	2,2	2,0	1,7	0,8	1,2	0,5	ladchiclan1	CHICLAN1	23,0	11,6	12,5	6,0	9,5	4,5	ladmachala	MACHALA	97,9	28,6	72,5	21,1	52,7	15,4
ladacoraz33	ACEROS33	2,5	0,9	5,0	1,8	5,0	1,8	ladchiclay6	CHICLAY6	6,9	3,1	4,5	2,0	2,9	1,3	ladmachup1	MACHUP1	2,9	1,3	1,4	0,6	0,9	0,4
ladalambran	ALAMBRON	10,4	6,9	9,6	6,4	7,1	4,7	ladchiclamt	CHICLGMT	18,5	9,5	12,2	5,9	8,7	4,2	ladmachupic	MACHUPIC	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0
ladantauta	ANTAUTA	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0,0	ladchicln60	CHICLN60	6,5	3,1	3,7	1,8	2,9	1,4	ladmalacar	MALACAS	18,7	9,2	13,0	5,7	10,4	4,5
ladantuqu24	ANTUQUIT	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	ladchilca_60	CHILCA_60	93,2	24,9	69,9	32,2	61,6	29,2	ladmalpar50	MALPAS50	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ladantuqu50	ANTUQU50	2,8	0,8	2,8	0,8	2,8	0,8	ladchilin33	CHILIN33	23,6	10,9	15,3	7,4	11,1	5,4	ladmantaraq	MAHTAROG	1,8	0,8	1,0	0,4	0,8	0,3
ladaricat17	ARICOT17	0,5	0,0	0,5	0,0	0,5	0,0	ladchimbnar	CHIMBON1	21,0	10,7	13,8	6,7	10,9	5,3	ladmarcan60	MARCON60	71,3	29,8	52,5	21,6	51,3	22,1
ladaricat27	ARICOT27	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	ladchimbat1	CHIMBOT1	33,2	16,6	26,5	12,8	23,8	11,6	ladmalpar50	MALPAS50	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ladaucayacu	AUCAYAC6	0,9	0,4	0,3	0,2	0,2	0,1	ladchumpe17	CHUMPE17	0,7	0,2	0,6	0,2	0,4	0,1	ladmayupa50	MAYUPA50	0,7	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1
ladaurduvaz	AUSDUVA2	1,9	0,5	1,4	0,3	0,6	0,1	ladchumpe27	CHUMPE27	1,9	1,2	1,4	0,8	0,5	0,3	ladmcpa_60	MEPSA_60	2,7	0,9	6,5	2,1	6,5	2,1
ladayavir17	AYAVIR17	0,4	0,2	0,3	0,2	0,3	0,2	ladcimarqui	CHIMARQUI	34,3	11,3	66,0	21,7	66,0	21,7	ladmillrite	MILLI38	46,2	17,0	45,4	6,5	45,5	9,3
ladayavir27	AYAVIR27	0,3	0,2	0,1	0,0	0,2	0,1	ladcolan_60	COLAN_T	0,4	0,2	0,1	0,1	0,1	0,0	ladmilpa_50	MILPO_50	5,8	0,6	4,5	0,5	2,1	0,2
ladazangar7	AZANGAR7	1,3	0,8	0,5	0,3	0,8	0,4	ladcamba24	COMBA24	1,7	1,0	0,4	0,3	0,6	0,4	ladmiran_60	MIRON_60	55,2	31,6	59,4	31,5	36,0	19,4
ladbalnea60	BALNEA60	119,5	36,2	100,6	45,9	92,9	44,8	ladcpata_66	CPATO_66	1,7	0,8	0,6	0,3	0,4	0,2	ladmollendo	MOLLENDO	3,6	1,4	3,9	1,4	2,9	1,0
ladbarsi_60	BARSI_60	198,1	106,1	151,0	72,9	120,4	58,2	ladcpata_1	CPATO_1	5,0	1,6	6,7	2,2	6,7	2,2	ladmoly_33	MOLV_33	2,8	1,0	5,5	2,0	5,5	2,0
ladbellavir	BELLAVI7	0,4	0,2	0,3	0,1	0,1	0,1	ladcuripata	CURIPATA	0,6	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	ladmonterri	MONTERRI	22,3	10,7	19,8	9,0	7,4	3,4
ladbelunion	BELUNION	0,6	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	laddalarop	DOLORESP	22,4	12,4	14,7	7,1	8,5	4,1	ladmoquegua	MOQUEGUA	2,3	0,9	1,1	0,6	1,0	0,6
ladbotifl_13.8	BOTIFL27	34,7	8,7	33,7	8,5	33,9	8,5	ladelarenal	ELARENAL	2,9	1,4	3,9	1,9	3,8	1,8	ladmoroc2.4	MOROC2.4	2,2	0,7	1,6	0,5	0,5	0,2
ladbotifl_6.9	BOTIFL37	31,1	6,3	31,1	7,8	31,1	9,1	ladexcelr17	EXCELS17	1,5	0,9	0,7	0,4	0,5	0,3	ladmorocach	MOROT_50	2,4	0,3	0,7	0,1	0,4	0,0
ladbotifl_6.9	BOTIFL69	8,1	2,8	8,1	0,5	8,1	0,7	ladexcelr27	EXCELS27	0,2	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	ladmayapa60	MOYOPA60	10,6	5,2	7,4	3,6	6,5	3,2
ladcachim27	CACHIM27	1,6	0,8	0,4	0,2	0,2	0,2	ladgallit60	GALLIT60	2,2	1,0	2,3	0,9	0,8	0,4	ladmayapamp	MOYOPAMP	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1
ladcachima1	CACHIMA1	13,7	7,3	24,5	13,2	24,3	13,1	ladgoylla50	GOYLLA50	0,3	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	ladnana_60	NANA_60	14,1	7,4	9,5	4,6	8,3	4,0
ladcachima2	CACHIMA2	1,3	0,6	0,5	0,2	0,3	0,2	ladquadal10	GUADAL10	8,3	4,0	5,2	2,5	4,1	2,0	ladoraya_50	OROYA_50	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ladcahua_g1	CAHUA_G1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	ladquadal60	GUADAL60	3,0	0,9	1,6	0,5	1,0	0,2	ladpacarm60	PACASM60	4,9	2,6	4,9	2,6	5,4	2,9
ladcajamarca	CAJAMAR2	35,5	9,4	40,2	8,2	42,9	8,2	ladhuachipa	HUACHIPA	39,0	18,6	33,3	15,0	20,9	9,5	ladpachac69	PACHAC69	0,3	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0
ladcallah60	CALLAHU6	1,0	0,5	0,9	0,5	0,8	0,4	ladhuacha_2	HUACHO_66	18,4	6,1	7,9	3,9	7,2	3,5	ladpachacha	PACHACHA	8,5	7,0	8,5	7,0	8,5	7,0
ladcallahq1	CALLAHG1	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	ladhuanca60	HUANCA60	5,7	2,8	3,4	1,7	2,3	1,1	ladpaite_10	PAITA_10	6,2	3,6	6,3	3,1	3,8	1,8
ladcallahq2	CALLAHG2	0,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1	ladhuanuca1	HUANUCO10	10,7	5,2	4,7	2,3	3,2	1,6	ladpaite_60	PAITA_60	13,6	7,7	8,0	3,9	5,9	2,9
ladcallali	CALLALI	6,4	3,1	5,0	2,4	3,1	1,5	ladhuara266	HUARA266	5,8	2,4	3,9	1,6	2,7	1,1	ladpanda_60	PANDO_60	39,3	20,1	36,1	17,5	20,2	9,8
ladcampo69	CAMPOA69	26,7	13,6	20,5	10,1	12,4	6,1	ladhuara50	HUARON50	5,7	2,0	4,9	1,7	2,9	1,0	ladparaq21	PARAGS21	20,3	4,6	18,5	3,8	9,8	2,0
ladcaraz_66	CARAZ_66	2,4	1,2	1,3	0,5	0,9	0,4	ladhuayuc60	HUAYUC60	24,9	12,6	12,6	6,1	9,5	4,6	ladparaq50	PARAGS50	13,3	4,9	12,8	4,3	8,8	2,9
ladcarhua66	CARHUA66	2,2	1,0	1,1	0,4	0,8	0,3	ladhuicra_7	HUICRA_7	0,8	0,3	0,6	0,2	0,2	0,1	ladparamex1	PARAMEX1	20,9	7,6	27,2	9,9	27,2	9,9
ladcarhuama	CARHUAMA	1,6	0,9	0,7	0,3	0,4	0,2	ladhuincag1	HUINCAG1	0,4	0,1	0,4	0,1	0,4	0,1	ladparam26	PARAMO26	12,4	6,8	11,8	5,1	11,2	4,8
ladcarhuaq2	CARHUAQ2	0,5	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	ladica_10	ICA_10	12,7	5,1	9,4	3,8	6,0	2,4	ladparque10	PARQUE10	6,4	3,1	2,9	1,4	2,0	1,0
ladcarhuaq3	CARHUAQ3	0,3	0,0	0,3	0,0	0,3	0,0	ladica_60	ICA_60	38,1	19,9	32,0	12,8	20,1	8,0	ladpinduc66	PINDUC66	5,2	2,5	3,1	1,5	2,4	1,2
ladcaripa_1	CARIPA_1	14,4	5,8	9,5	3,3	4,3	1,5	ladila2_tv1	ILO_G1	10,0	4,0	10,0	4,0	10,0	4,0	ladpiura_tv6	PIURA_TV6	27,8	14,5	16,7	8,1	12,8	6,2
ladcasaf_50	CASAF_50	11,2	4,1	8,8	3,2	4,0	1,5	ladila_tv1	ILO_TV1	0,5	0,0	0,5	0,0	0,5	0,0	ladpiura_6	PIURA_6	11,6	6,1	4,9	2,4	3,2	1,6
ladcasapalc	CASAP_50	10,9	4,2	7,7	2,9	6,0	2,2	ladila_tv2	ILO_TV2	0,5	0,0	0,5	0,0	0,5	0,0	ladplantain	FUNDIC50	44,5	16,5	35,2	13,0	16,1	6,0
ladcasapied	CASAPIED	4,6	3,1	3,7	2,5	1,6	1,1	ladila_tv3	ILO_TV3	0,5	0,0	0,5	0,0	0,5	0,0	ladplox1_50	PLOW_50	4,1	1,5	3,3	1,2	1,5	0,6
ladcasapna2	CASAP17	0,6	0,1	0,5	0,1	0,4	0,1	ladila_tv4	ILO_TV4	0,5	0,0	0,5	0,0	0,5	0,0	ladporvenir	PORVENI	5,0	2,9	4,7	2,3	3,8	1,8
ladcasapnor	CASAPHOR	0,5	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	ladila_tv5	ILO_TV5	0,5	0,0	0,5	0,0	0,5	0,0	ladpquind_33	POIND_33	33,4	13,0	20,9	8,6	14,6	5,6
ladcañdpat1	CPATO_G1	0,5	0,0	0,5	0,0	0,5	0,0	ladila_tv6	ILO_TV6	0,5	0,0	0,5	0,0	0,5	0,0	ladprim_60	PRIM_60	56,9	27,4	54,4	24,8	24,0	10,9
ladcompacar	COMPACAS	9,8	4,8	7,3	3,7	7,6	4,0	ladila_tv8	ILO_TV8	6,1	2,5	3,2	0,5	3,0	0,4	ladpucalpa	PUCALLPA10	11,8	6,2	7,3	3,5	5,6	2,7
ladcerverar	CERROVER	42,6	0,1	41,6	6,0	44,7	9,1	ladindep60	INDEPEN60	44,3	22,0	33,5	16,2	24,4	11,8	ladpuente60	PUNTE60	75,8	35,5	82,9	37,8	56,9	25,9
ladcerverar	CERVESUR	2,5	0,9	5,0	1,8	5,0	1,8	ladindep2	INDEPEN2	10,0	5,3	55,0	26,6	55,0	26,6	ladpuna_10	PUNO_10	4,6	2,7	3,2	1,5	2,4	1,2
ladcfrancir	CFRANCIS	3,8	1,2	3,6	1,1	2,8	0,9	ladjorur_1	JESUS_33	13,1	7,4	7,4	3,6	5,7	2,8	ladpuna_60	PUNO_60	6,9	3,9	5,4	2,6	3,9	1,9

Tabla 6.10 Datos de Cargas del SEIN - Escenario de Estiaje

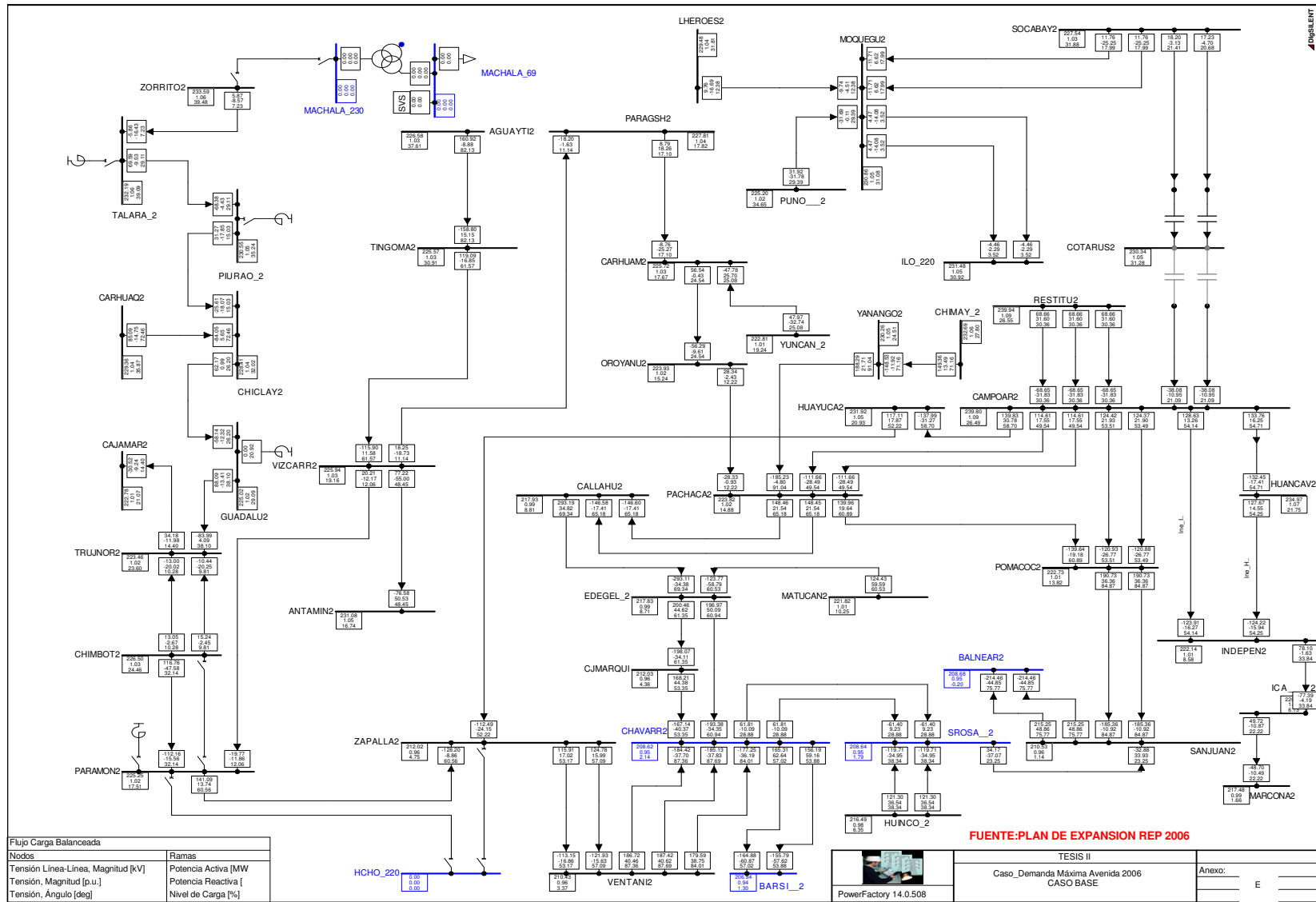


Figura 6.6 Sistema Eléctrico Interconectado Nacional-Demanda Máxima Avenida-2006

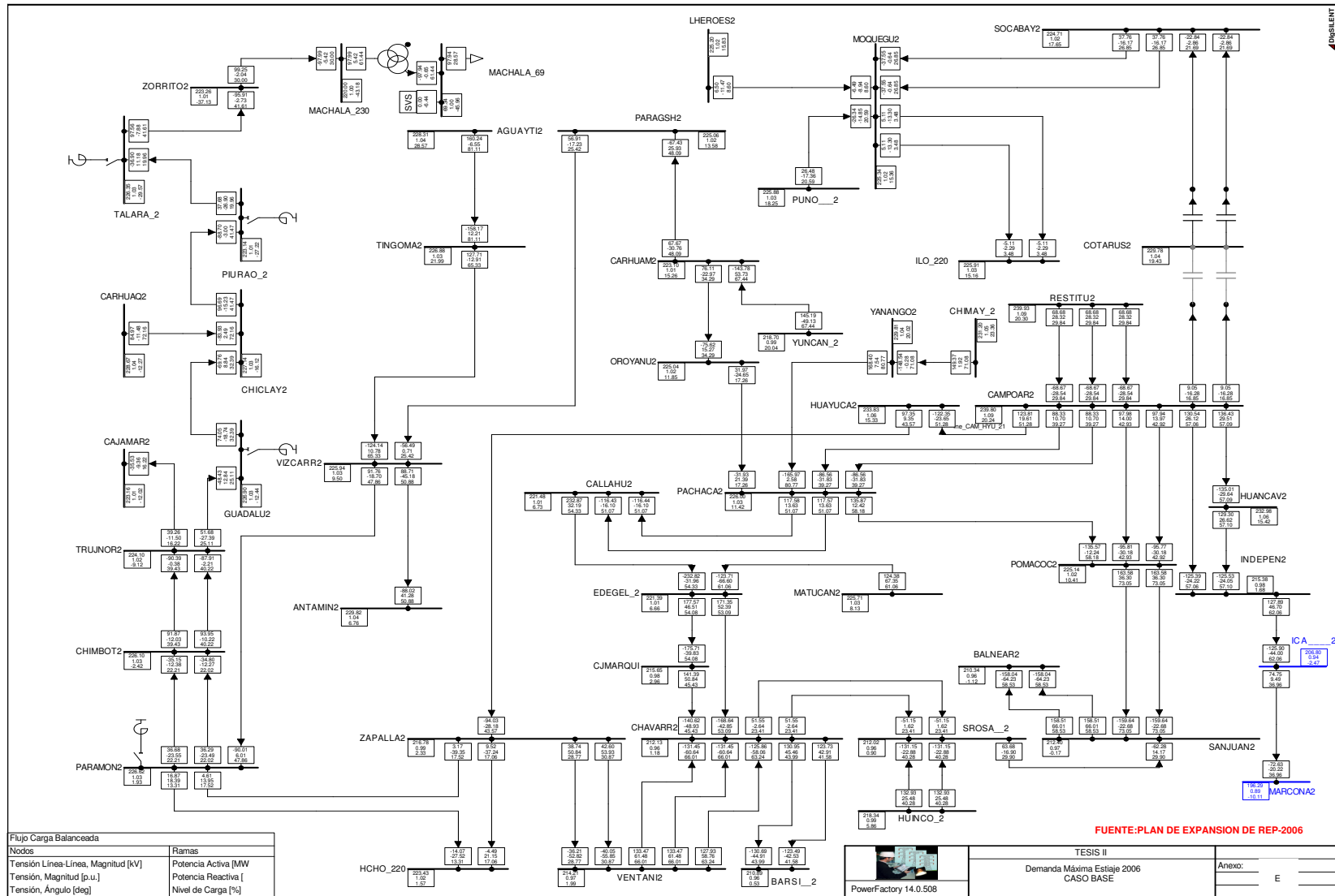


Figura 6.7 Sistema Eléctrico Interconectado Nacional-Demanda Máxima Estiaje-2006

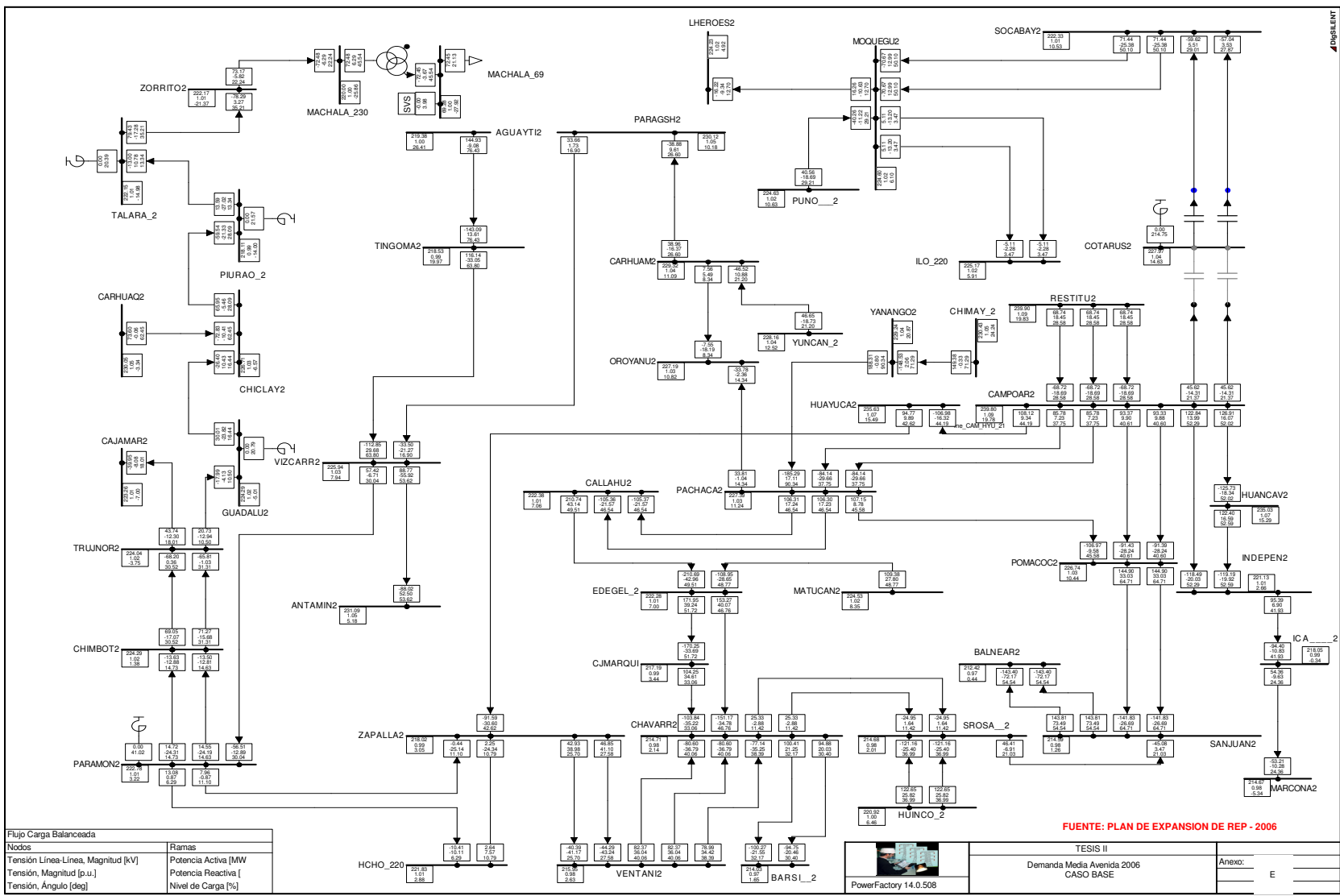


Figura 6.8 Sistema Eléctrico Interconectado Nacional-Demanda Media Avenida-2006



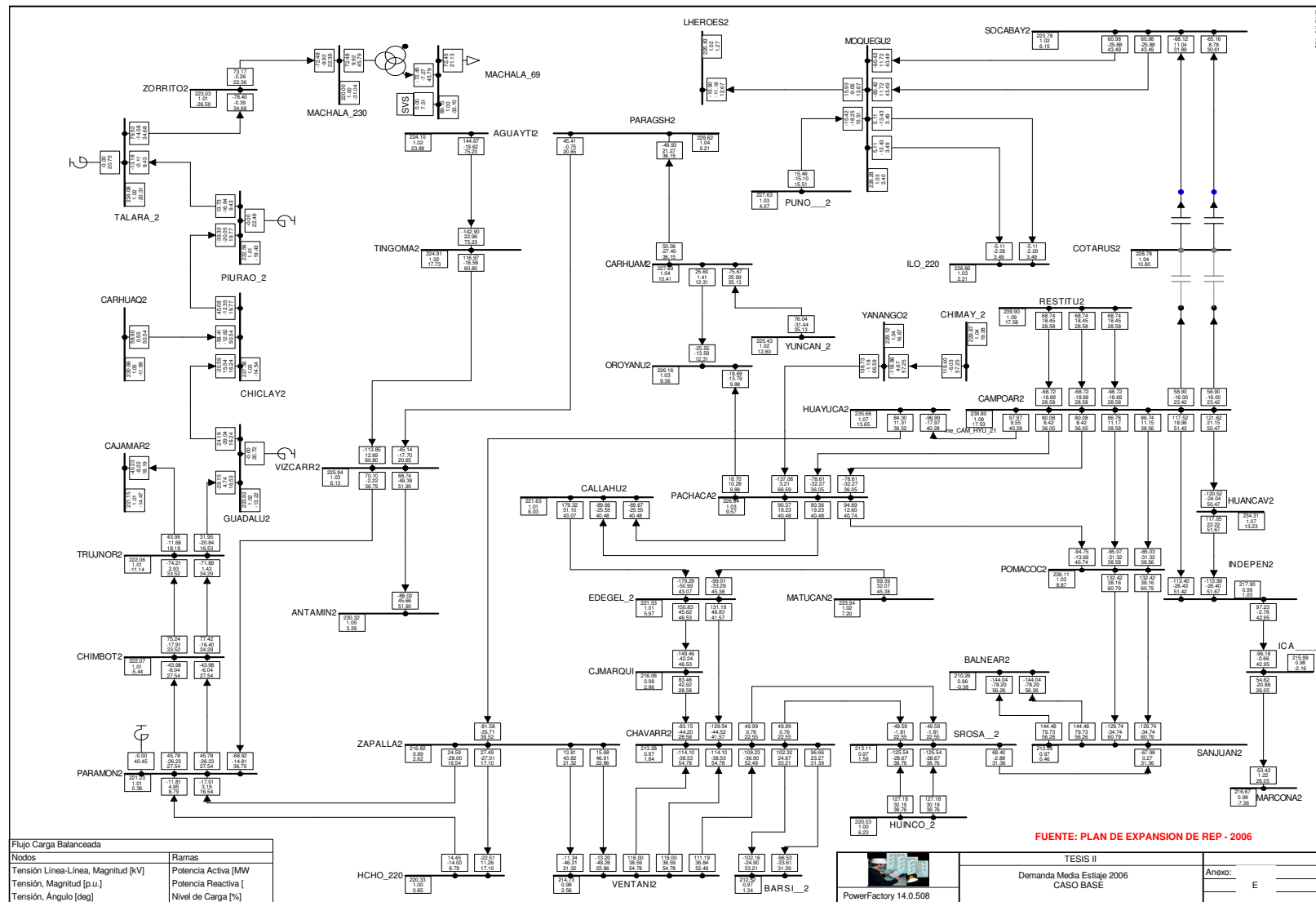


Figura 6.9 Sistema Eléctrico Interconectado Nacional-Demanda Media Estiaje-2006

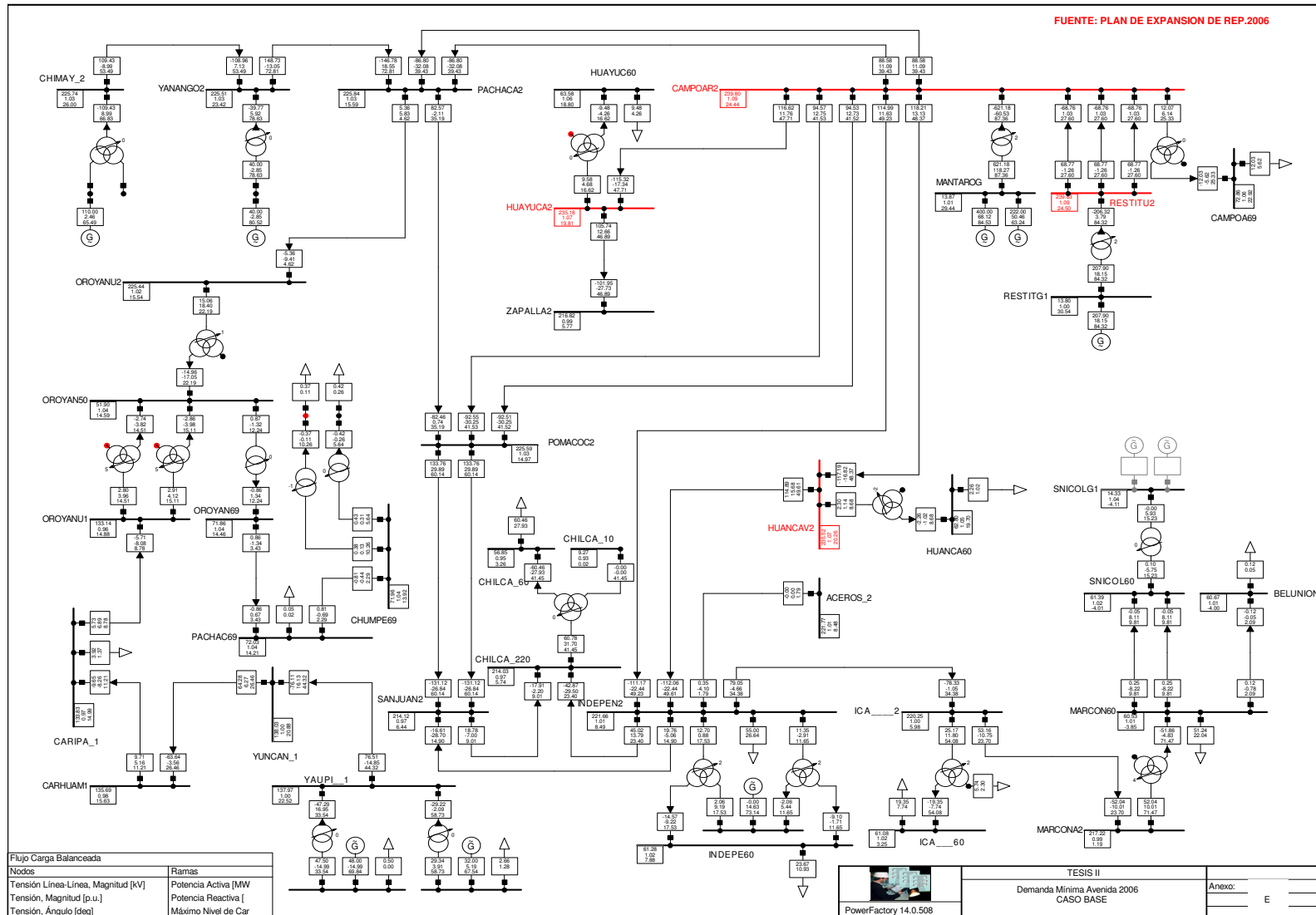


Figura 6.10 Sistema Eléctrico Interconectado Nacional-Demanda Mínima Avenida-2006

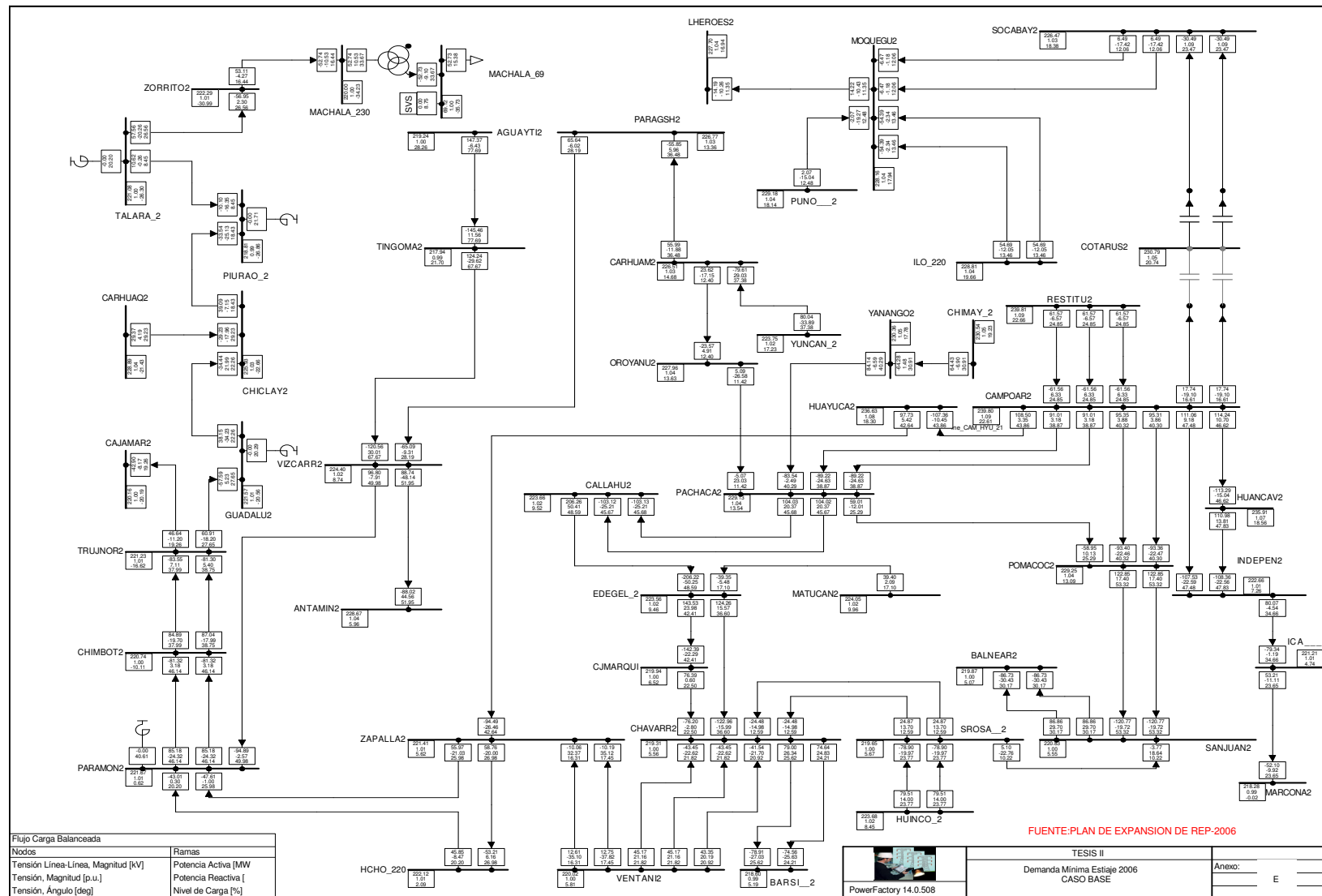


Figura 6.11 Sistema Eléctrico Interconectado Nacional-Demanda Mínima Estiaje-2006

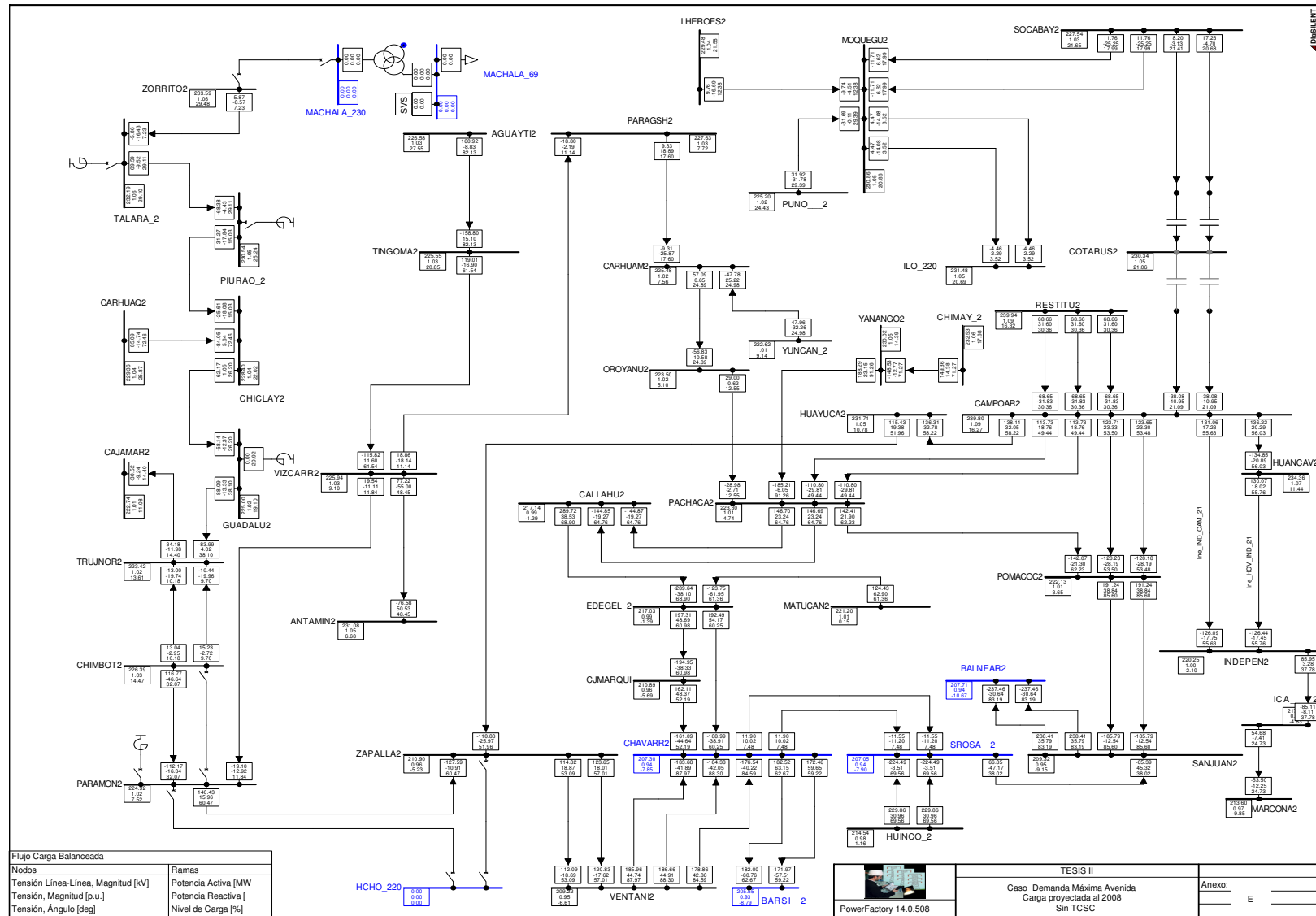


Figura 6.12 SEIN-Demanda Máxima Avenida-Projectada 2008\_Sin TCSC

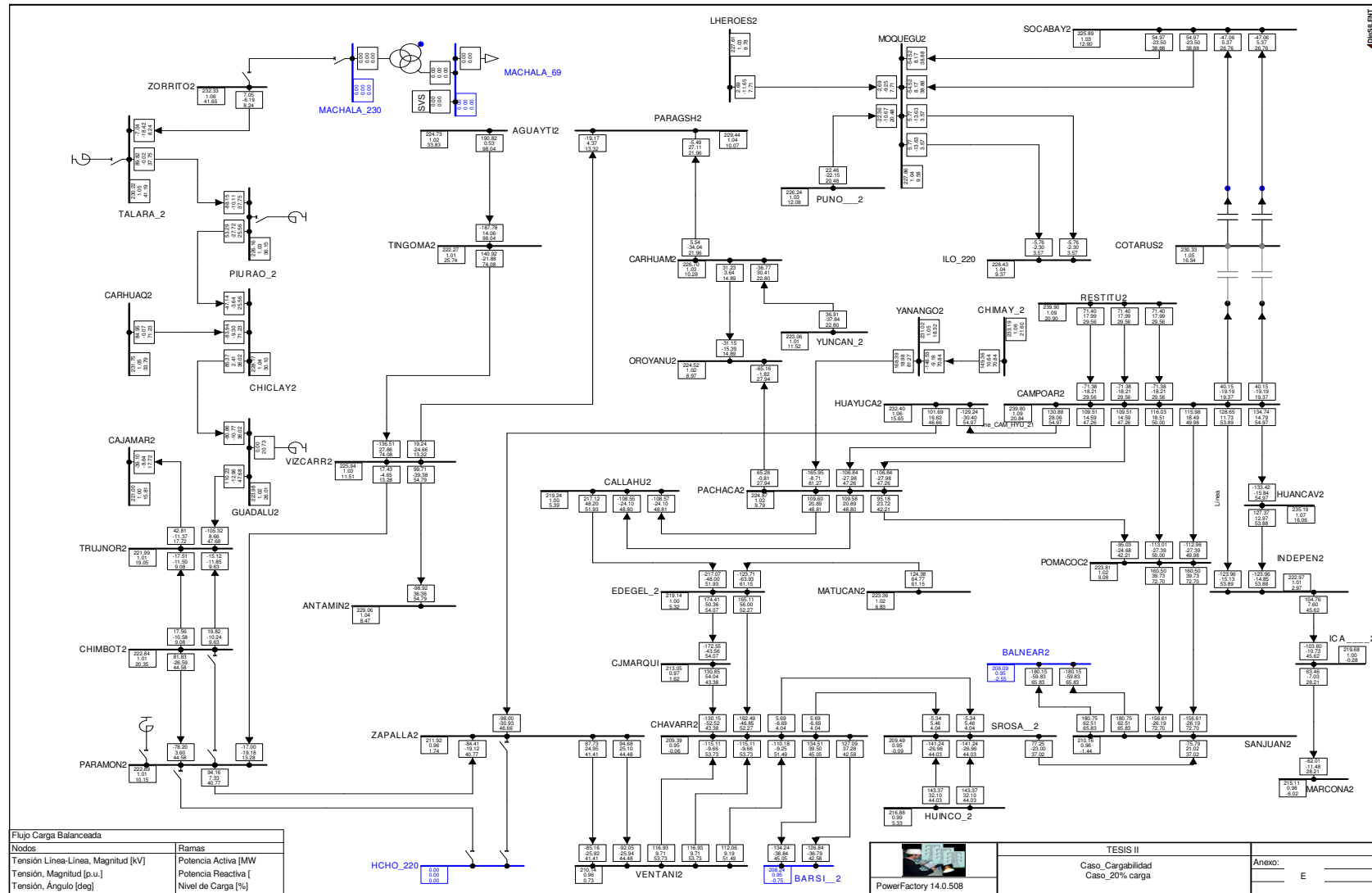


Figura 6.16 SEIN-Demanda 20% de carga base\_Sin TCSC

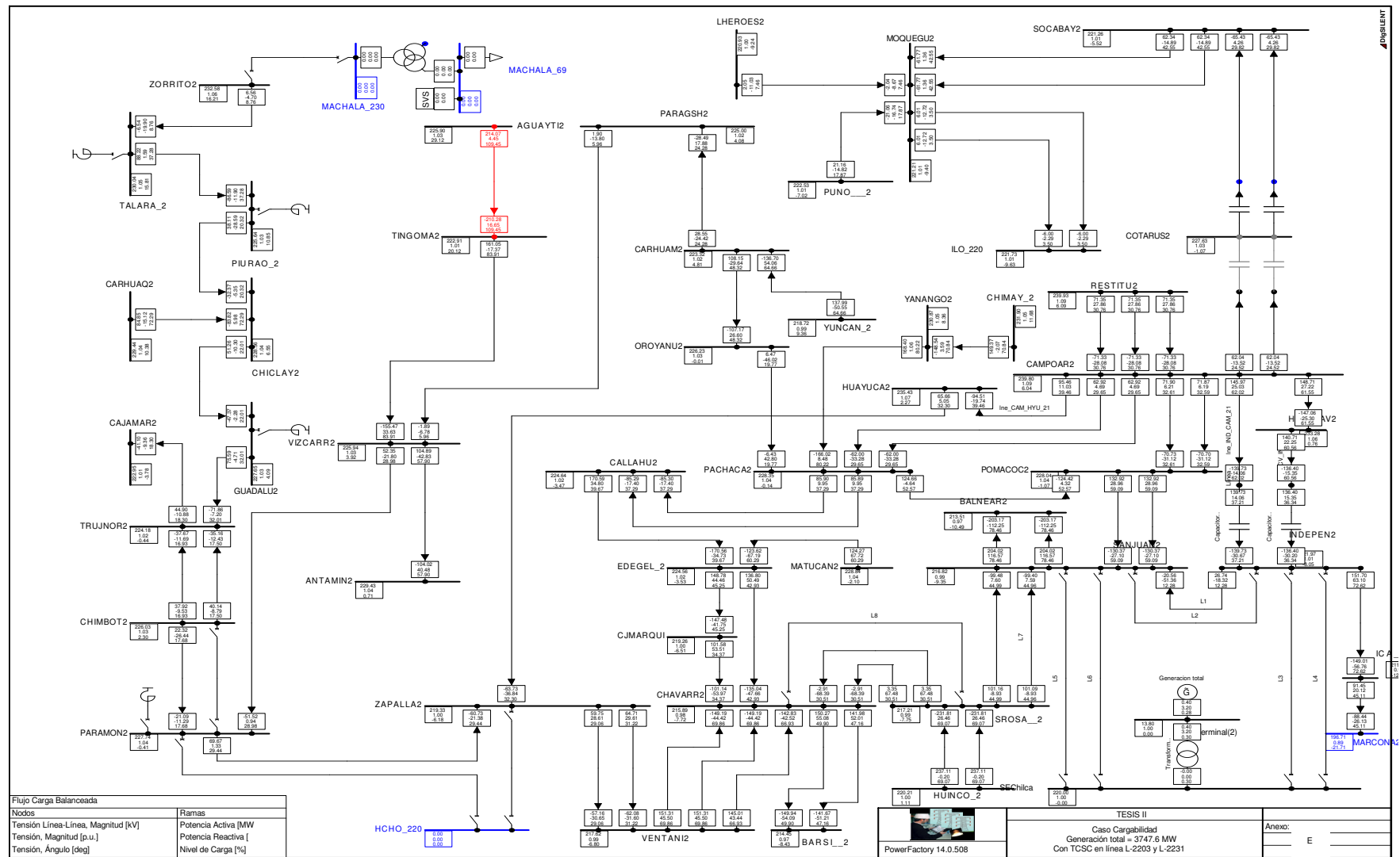


Figura 6.19 SEIN-Demanda 25% de carga base\_con TCSC

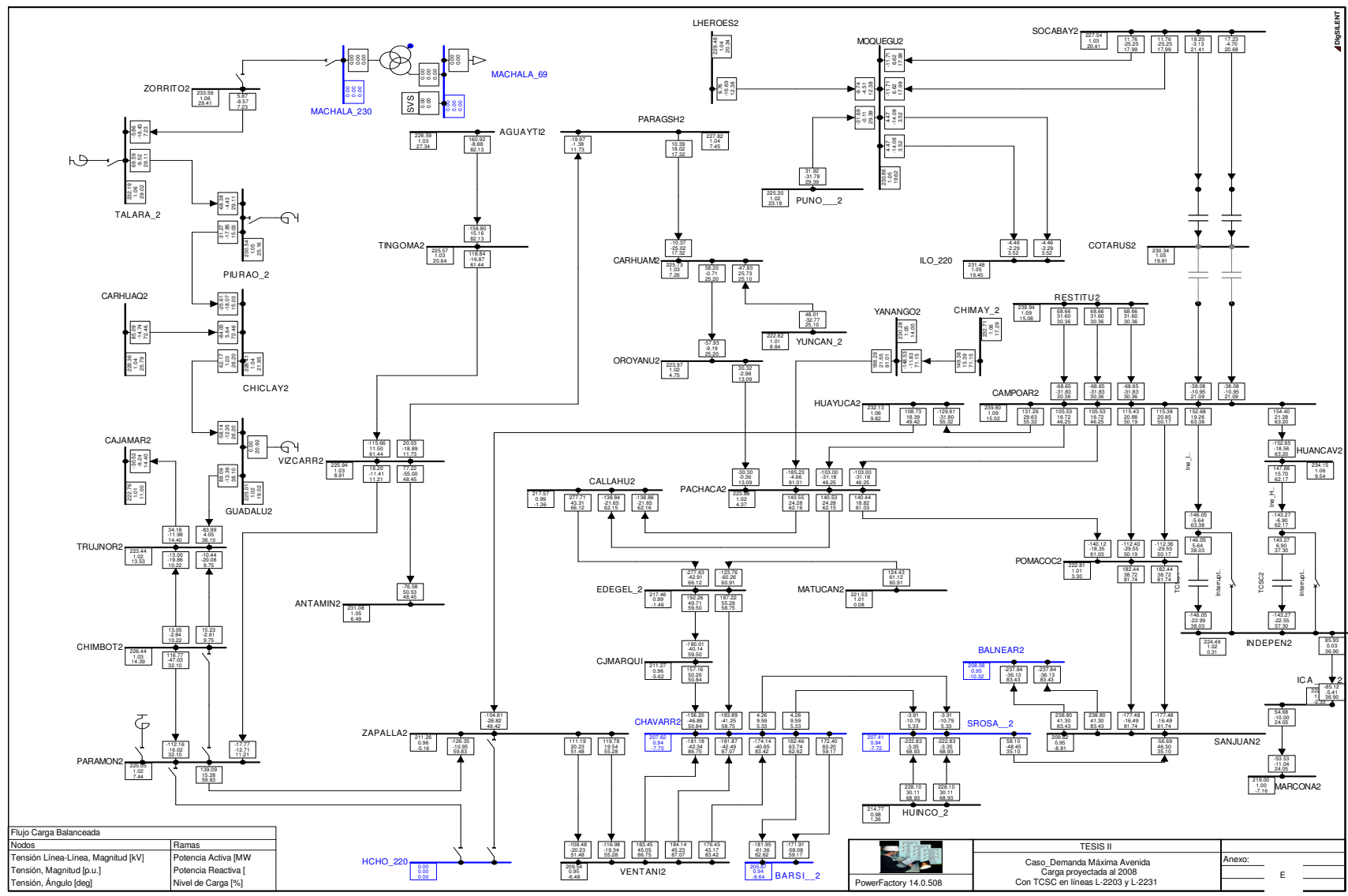


Figura 6.20 SEIN-Demanda Máxima Avenida\_con TCSC

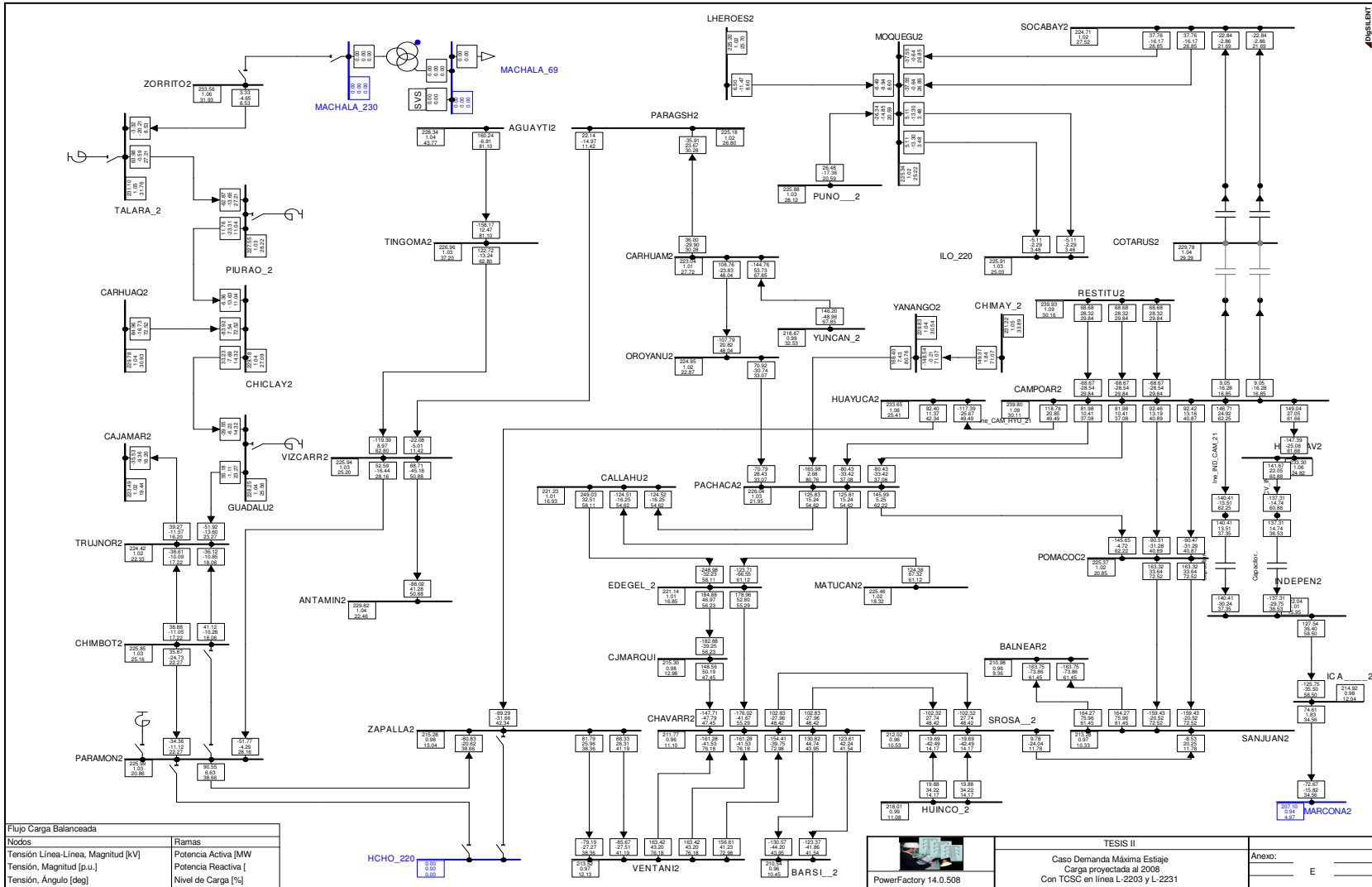


Figura 6.21 SEIN-Demanda Máxima Estiaje\_con TCSC



## ANEXO F

Datos de Líneas

L.T.	R (p.u.)	X (p.u.)	Capacidad Línea (MW)	Longitud Línea (km)
L1e	0,05	0,6	80	60
L2e	0,05	0,4	100	40
L3e	0,05	0,2	100	20
L4e	0,05	0,2	100	20
L5e	0,08	0,2	100	20
L6e	0,08	0,4	100	40

Datos de Generación

Central Grupo	Potencia Máxima (MW)
G1	150
G2	360
G3	340

Datos de Cargas

Cargas	MW
C1	80
C2	240
C3	40
C4	160
C5	240

Tabla 4.14 Datos del Sistema Garver de 6 barras

Número de Individuos	Población inicial de Individuos																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
	L1p	L2p	L3p	L4p	L5p	L6p	L1n1	L1n2	L2n1	L2n2	L3n1	L3n2	L4n1	L4n2	L5n1	L5n2	L6n1	L6n2	L7n1	L7n2	L8n1	L8n2	L9n1	L9n2
1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1
2	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
3	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
4	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1
5	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1
6	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
7	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1
8	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0

Tabla 4.15 Población Inicial de Individuos para el Sistema Garver de 6 barras

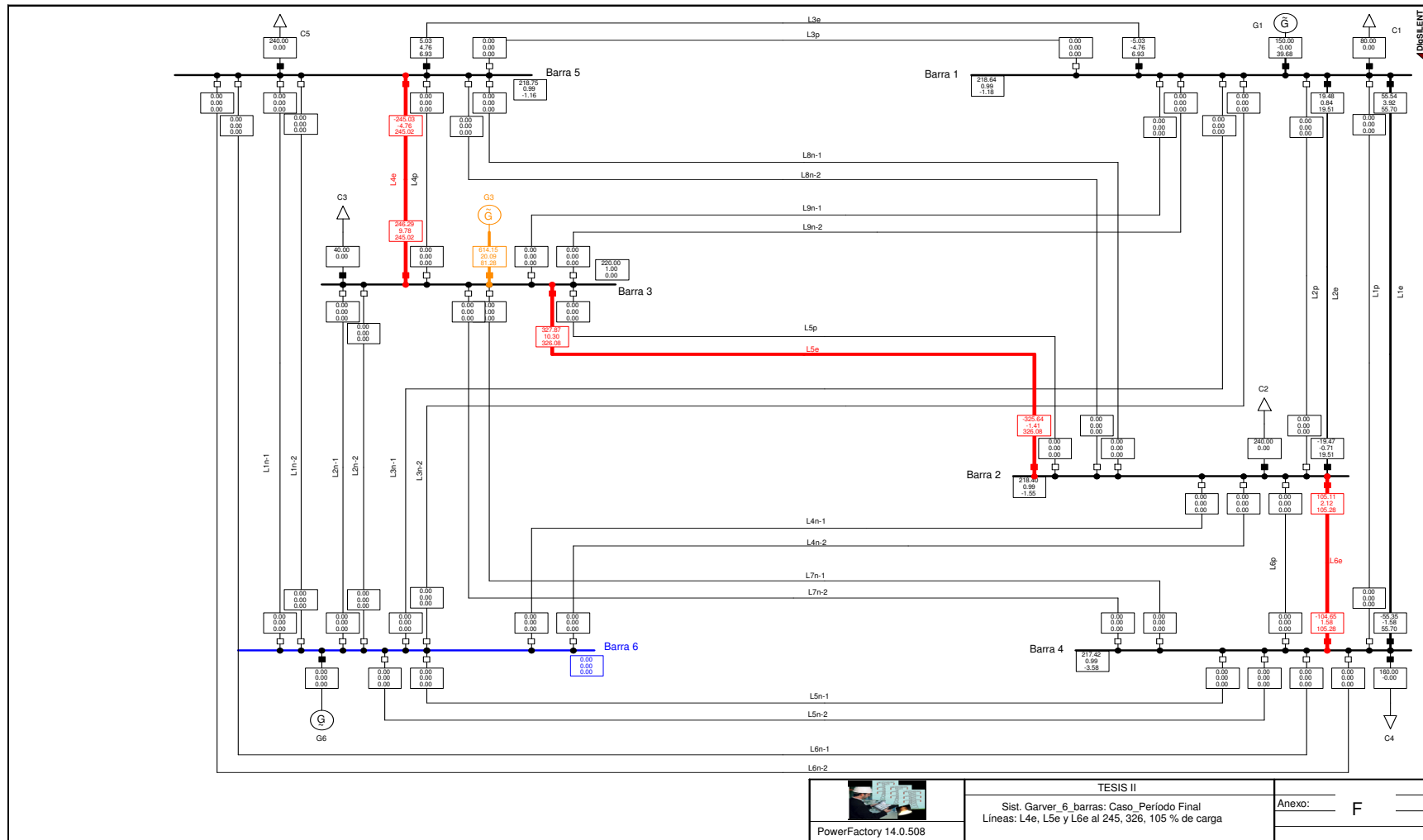


Figura 4.21 Sistema Garver representado en el DigSILENT - Periodo Final

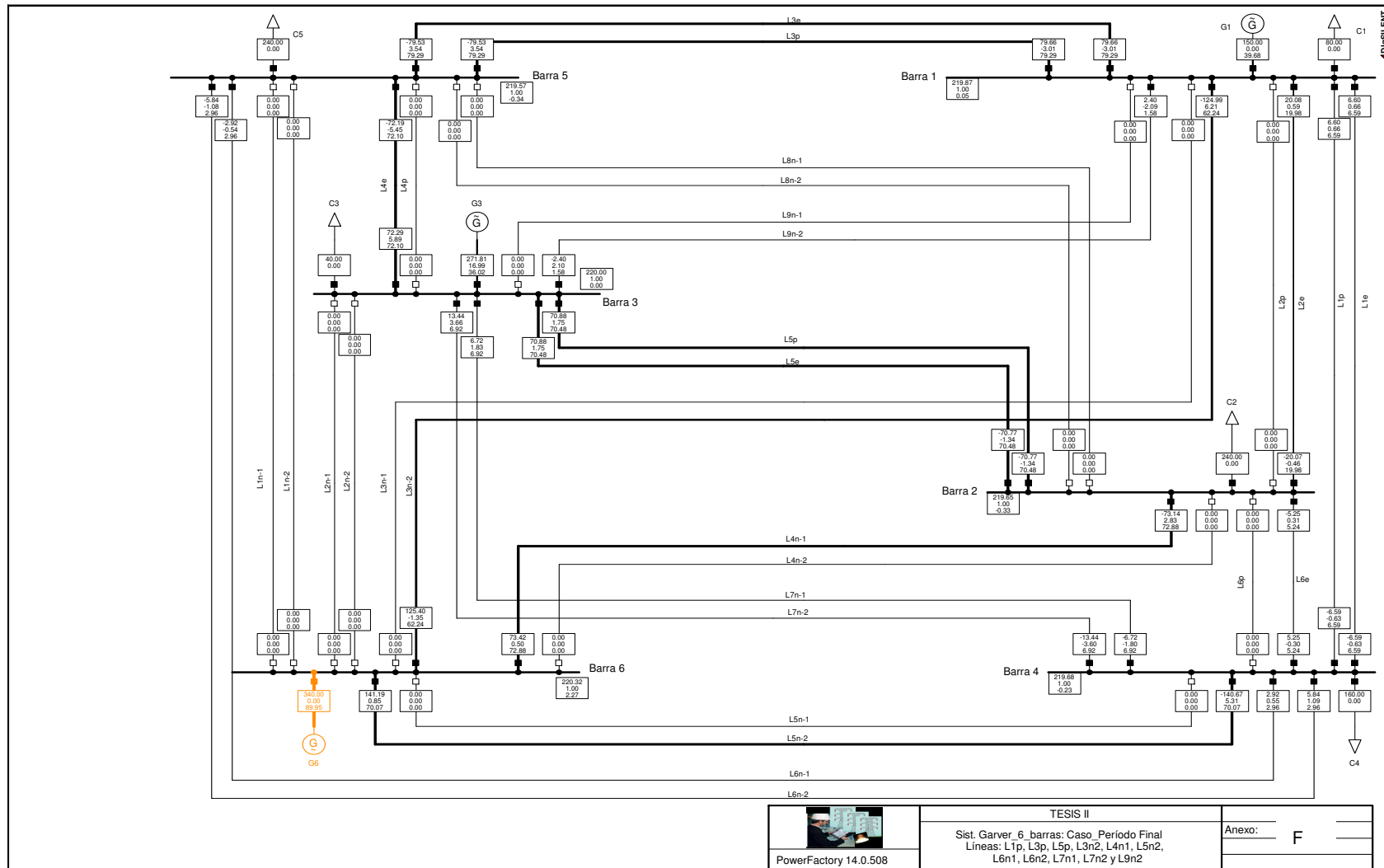


Figura 4.22 Sistema Garver caso Periodo Final, alternativa 1

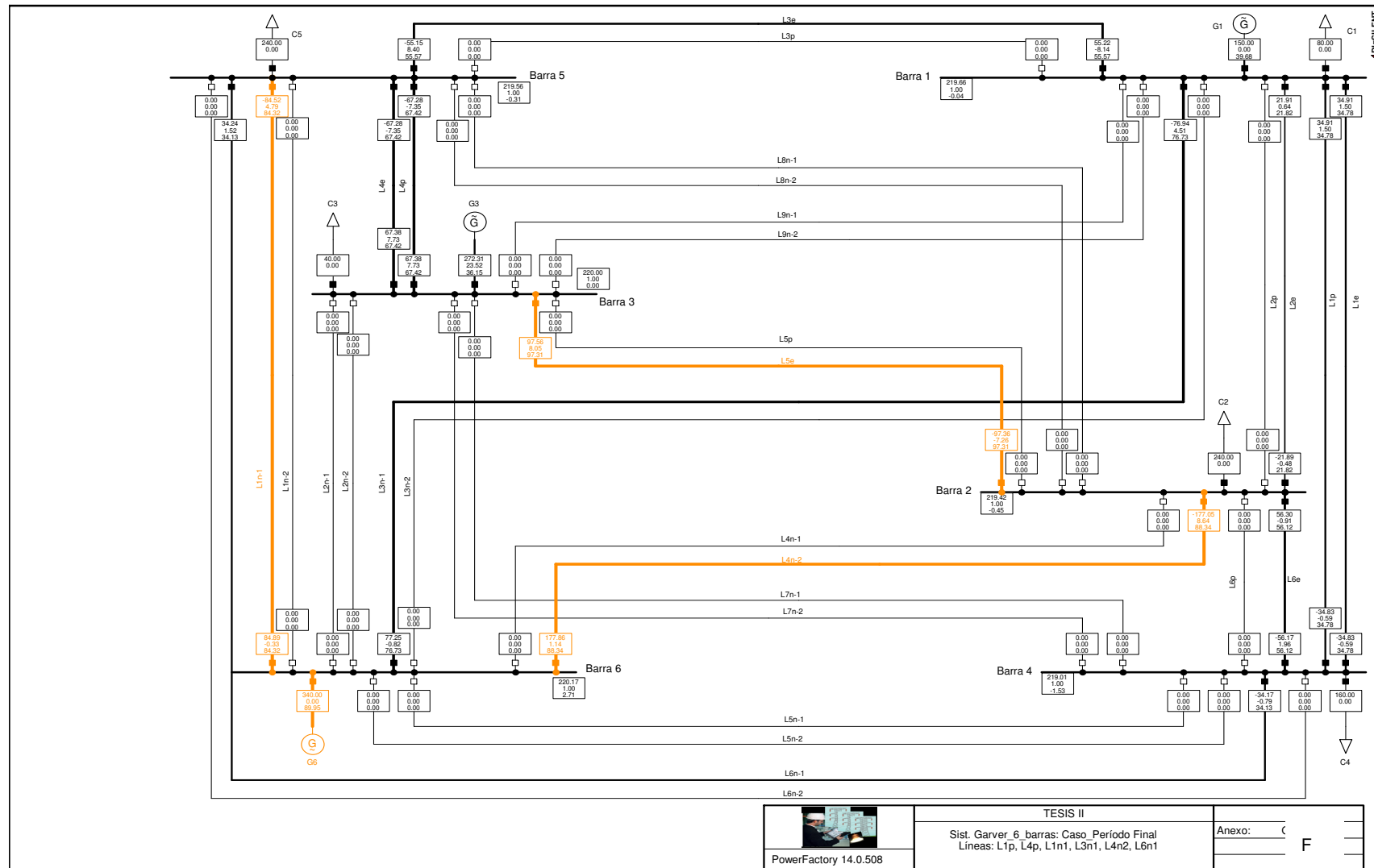


Figura 4.23 Sistema Garver caso Periodo Final, alternativa 2

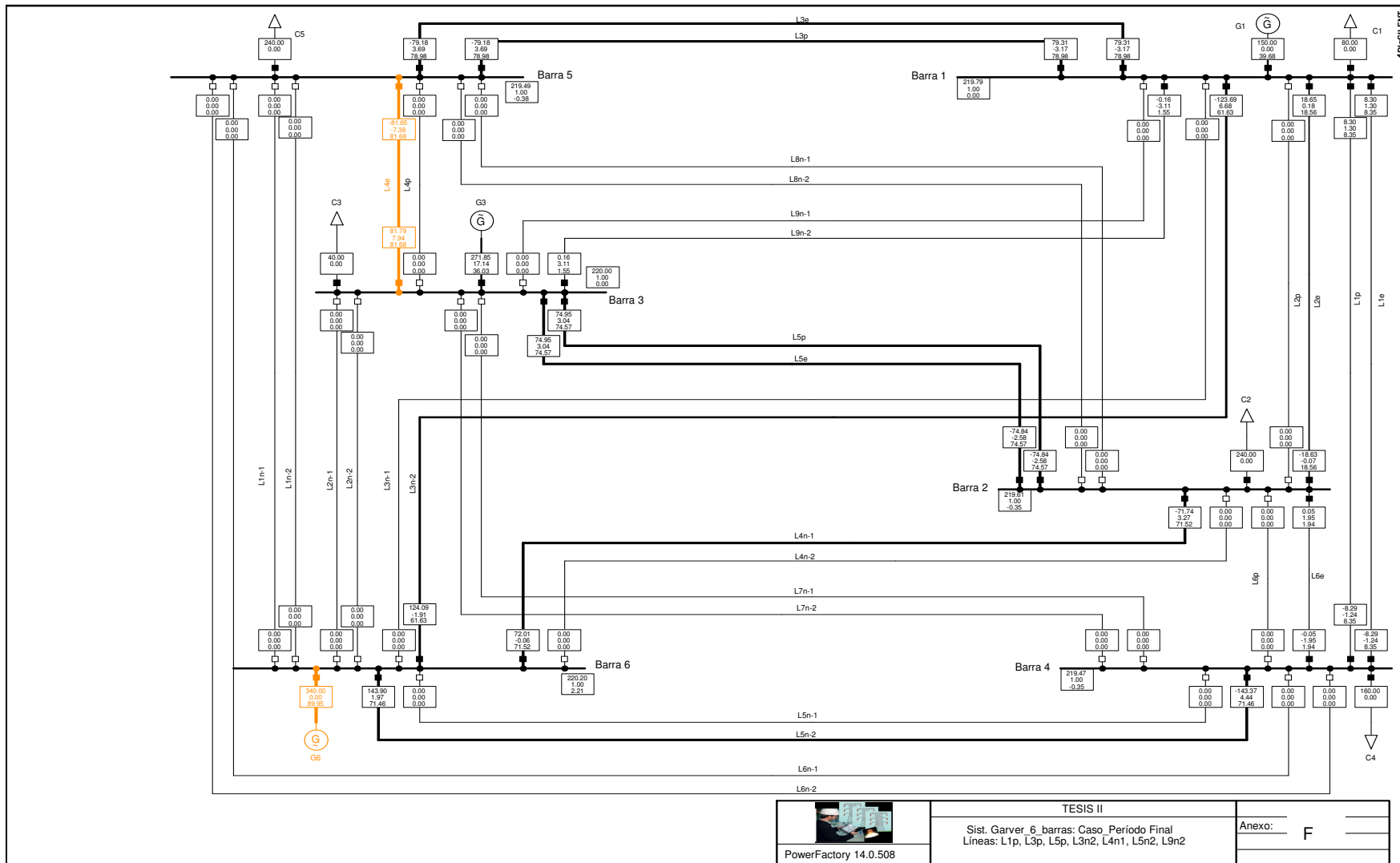


Figura 4.24 Sistema Garver caso Periodo Final, alternativa 3

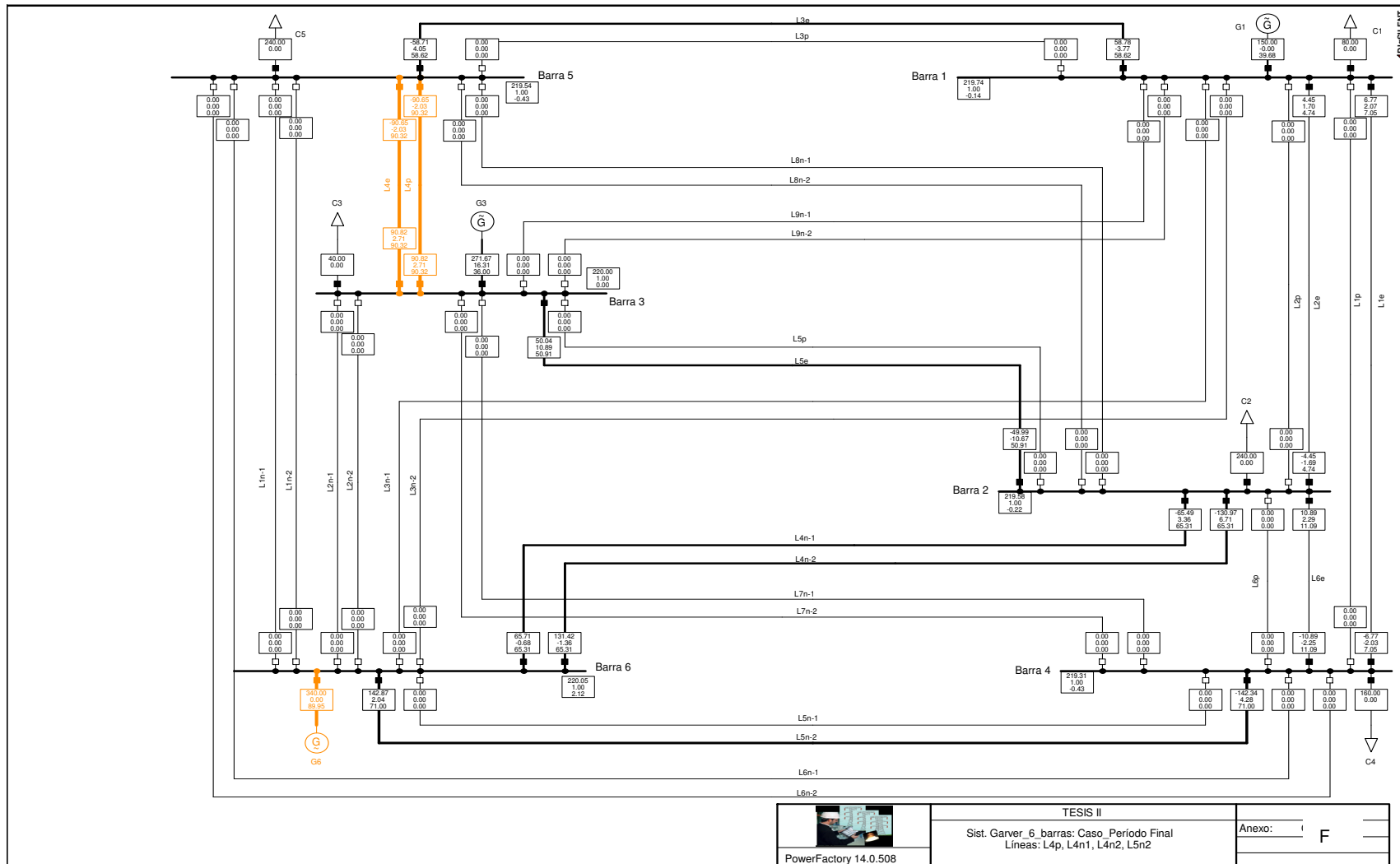


Figura 4.25 Sistema Garver caso Periodo Final, alternativa 4