

## CAPÍTULO 4

### ESTRUCTURA DE LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA EN EL SISTEMA DE EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN E.S.P.

#### 4.1 INTRODUCCIÓN

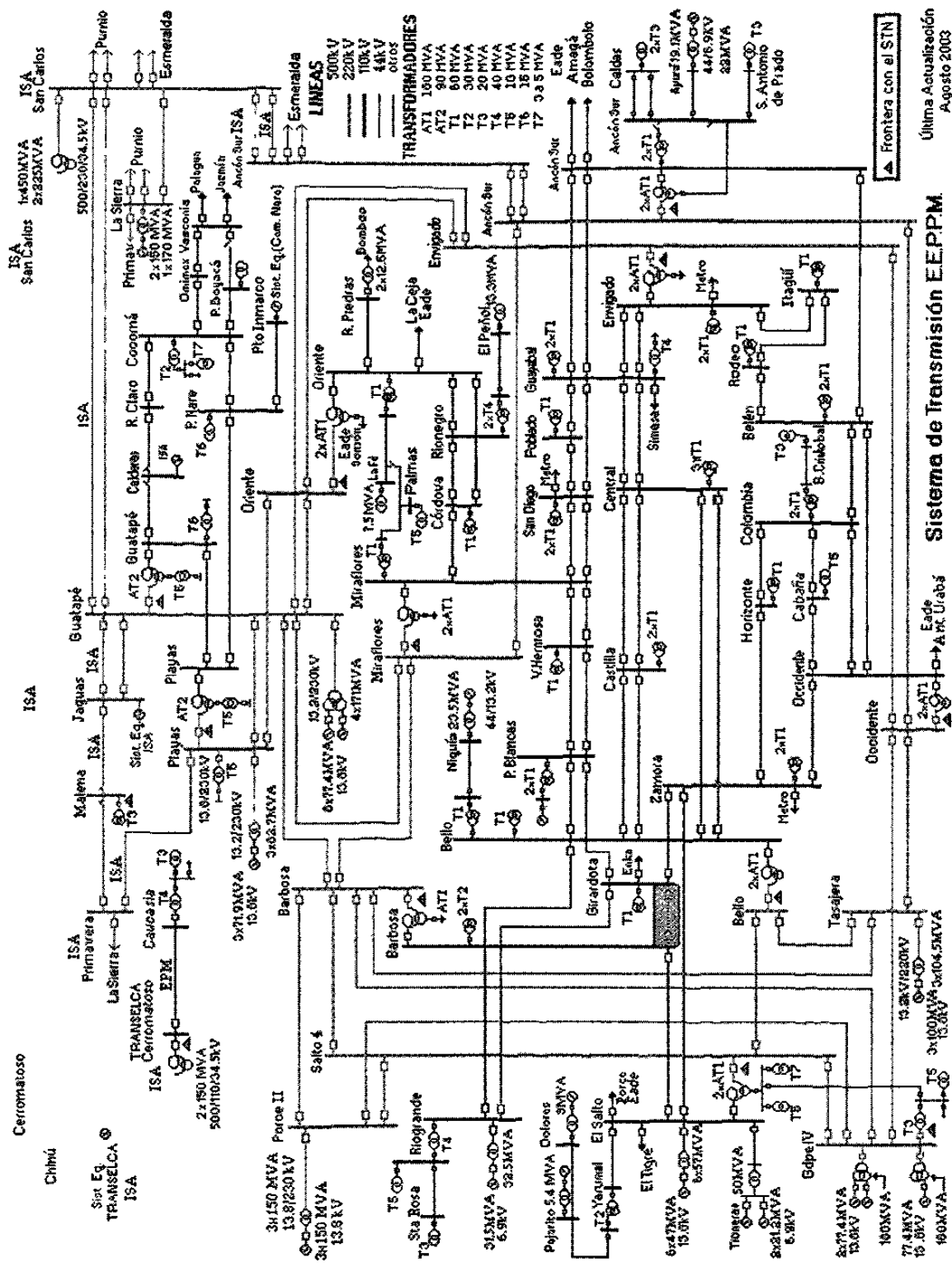
En el capítulo 2 se presentó una visión global de los enfoques que se han considerado hasta el momento para el manejo de la congestión de SEPs. En el capítulo 3 se presentó una propuesta de manejo de la congestión de SEPs, con la cual pueden abordarse muchos de los problemas que antes en la literatura habían sido tratados separadamente. Usando la metodología planteada, en un sistema de prueba se encontraron soluciones para el problema hipotético de congestión.

En este capítulo se presentará la estructura de cinco tipos de soluciones usando la nueva metodología planteada, para un problema real de sobrecarga en el SEP de las Empresas Públicas de Medellín E.S.P. (EPPM). Los resultados obtenidos y su verificación se presentará en el capítulo 5.

#### 4.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El SEP de EPPM forma parte del Sistema Interconectado Nacional (SIN) colombiano. El SIN opera bajo un esquema desregulado con despacho centralizado.

En la Fig. 4.1 se muestra el SEP de EPPM y se resalta con recuadro la línea Barbosa–Girardota 110 kV.



Última Actualización  
Agosto 2003

Sistema de Transmisión E.E.P.M.

Fig. 4.1 Sistema Eléctrico de Potencia de Empresas Públicas de Medellín E.S.P.

La línea Barbosa – Girardota 110 kV, opera actualmente abierta, ya que al cerrarla y aún sin contingencia, se presenta en ella una sobrecarga que restringe la generación de las plantas Guadalupe III, Guadalupe IV, Troneras, Porce y Tasajera lo cual encarecería la operación. Al abrir la línea, ya el despacho de esas plantas no se limita por esa condición. Mediante la metodología planteada para el manejo de la congestión se mostrarán otras alternativas de expansión o de operación para manejar dicha sobrecarga.

### 4.3 ESTRUCTURA DE LA METODOLOGÍA

La metodología propuesta en el capítulo 3, se desarrolló mediante tres softwares:

- **Sistemas de Potencia:** Se utiliza el Power System Toolbox (PST) versión 2., el cual maneja el almacenamiento de datos con matrices dispersas con lo que se tiene un mejor desempeño. Hubo necesidad de modificarlo para poder utilizar la información y para que no detenga el proceso de optimización cuando un caso propuesto no converja
- **Algoritmos Genéticos:** Se usó el software FlexGA el cual permite codificación de cromosomas en variables enteras o decimales, con lo que se tiene mucha facilidad en la codificación de los genes y de la optimización en general
- **Módulo de optimización (MO):** Es un conjunto de subrutinas desarrolladas durante el transcurso de esta tesis y actúa como interfaz entre el PST y FlexGA. Es el núcleo de la estrategia de optimización propuesta. Cumple funciones de interfaz entre el PST y el FlexGA modificando los parámetros eléctricos de entrada al PST con base en los individuos propuestos por FlexGA. Posteriormente evalúa la aptitud de los individuos y le entrega los resultados a FlexGA. Estos tres softwares están hechos en MatLab

## 4.4 CRITERIOS GENERALES ADOPTADOS

Se presentarán cinco tipos de soluciones para el manejo de la sobrecarga de la línea Barbosa - Girardota 110 kV. Para ellas se utilizaron los siguientes criterios:

### 4.4.1 ESPACIO DE BÚSQUEDA

Cuando un gen o grupo de genes de un cromosoma involucra una línea, el espacio de búsqueda para este gen, corresponde a las líneas de 220 kV y 110 kV del sistema de EEPPM, más algunas líneas de 220 kV del resto del SIN, cercanas al área operativa Antioquia-Chocó. No se incluyeron las líneas radiales a 110 kV, pues ellas no tienen influencia en el problema estudiado y por ejemplo en la alternativa de enlaces HVDC, causarían problemas con el flujo DC.

Con esta restricción del espacio solución se mejora el rendimiento del AG, pues se le está orientando hacia soluciones factibles.

### 4.4.2 CRITERIOS OPERATIVOS

- Caso base: Se utilizó el caso suministrado por el Equipo Estudios Eléctricos de EEPPM
- Reactiva Generadores: Se respetan los límites máximos de los generadores
- Taps de transformadores: Se utilizan las posiciones nominales de los taps de los transformadores

- Voltaje: Los niveles de voltaje máximo y mínimo permitidos son los mostrados en la Fig. 4.2. Con la subfunción  $f_{VN}(i)$  se evalúa los resultados obtenidos con las soluciones propuestas por el AG
- Carga de líneas y transformadores: Se vigilan todas las ramas, no solo las del espacio de búsqueda. Los niveles permitidos de carga tanto sin contingencia como con contingencia, para la función de aptitud son mostrados en la Fig. 4.3. así:
  - La subfunción  $f_{CR}(j)$  define la carga máxima permitida en transformadores y líneas sin contingencia en el sistema
  - La subfunción  $f_{CL}(k)$  define la carga máxima permitida en líneas con contingencia en el sistema
  - La subfunción  $f_{CT}(l)$  define la carga máxima permitida en transformadores con contingencia en el sistema

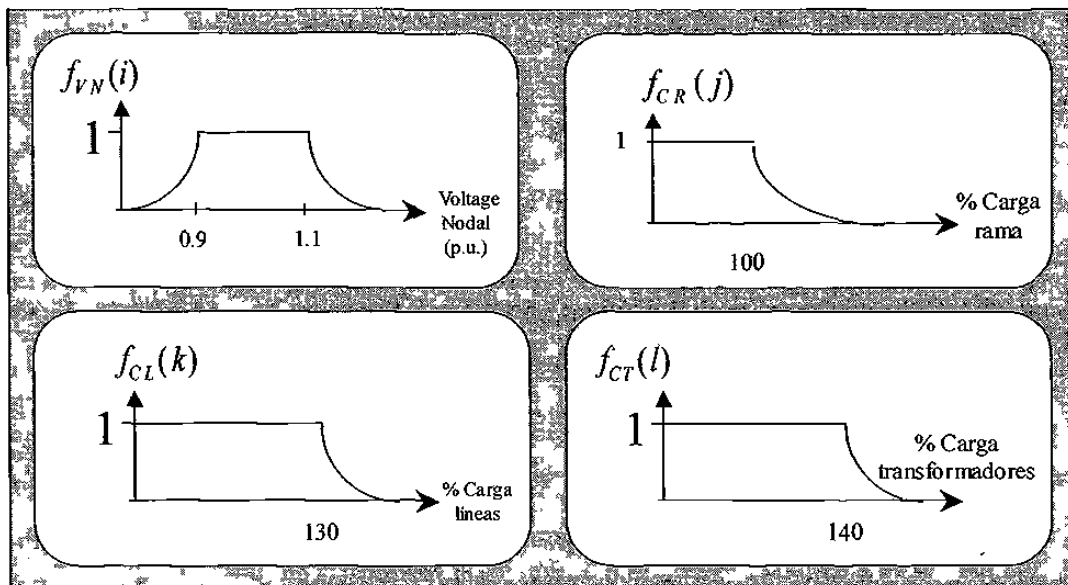


Fig. 4.2. Subfunciones de aptitud para voltajes nodales y carga de líneas y transformadores usadas en las soluciones propuestas.

## 4.5 SOLUCIONES

### 4.5.1 UBICACIÓN DE UN TCSC

La estructura de cromosoma utilizado fue el mostrado por la Fig. 4.3. El número de línea corresponde a la ubicación dentro de la matriz de líneas. Con esta nomenclatura se evita codificar directamente con números de nodos de interconexión, lo cual complicaría la definición de los intervalos de los valores máximos y mínimos de cada gen. A la vez estamos ahorrando un gen en el cromosoma.

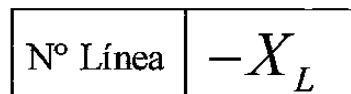


Fig. 4.3. Estructura del cromosoma para determinación de la línea a compensar con un TCSC

La propuesta de manejo de la congestión integra la satisfacción de condiciones operativas, o sea que entrega soluciones que operativamente son viables cumpliendo las restricciones que se deseen.

Existen dos tipos de restricciones:

- Las que se manejan con el PST: Posiciones de taps y límites de reactiva de generadores
- Las que se manejan con la función de aptitud: Según las que se elijan de acuerdo a la Tabla 3.3

Colocando un TCSC pueden existir varias ubicaciones ( y para cada ubicación habrá además varios valores de  $-X_L$  ) que satisfagan las restricciones. Para encontrar esas posiciones posibles del TCSC se puede realizar dos métodos:

Inicialmente la búsqueda se inicia con las funciones de voltaje y carga en las líneas sin contingencia. Se buscó en 84 líneas. Después de encontrar una solución, tratando de encontrar otras posibles soluciones, a la línea solución encontrada se le desplazó su ubicación en la matriz de líneas y se cerró el intervalo de búsqueda a 83 líneas. Y este proceso de reducción del espacio de búsqueda se realiza hasta que no se encuentran más ubicaciones.

Pero es posible realizar otro método más automatizado y el cual consiste en modificar el software, de tal modo que se almacenen todos los individuos cuyo desempeño sea igual a uno.

Con este procedimiento para la ubicación de un TCSC se encontraron tres posibles ubicaciones en tres líneas diferentes. Se hizo más estricta la función de optimización y se le programó que los individuos propuestos, además de las funciones de voltaje nodal y carga sin contingencia, cumpliera para ocho contingencias programadas, de nuevo los niveles de voltaje y además los niveles de sobrecarga en líneas y transformadores bajo contingencia. Las contingencias n-1 programadas se muestran en la Tabla 4.1.

TABLA 4.1. CONTINGENCIAS CONSIDERADAS PARA LA UBICACIÓN DE UN TCSC

N° Contingencia	Voltaje	Línea
1	110	Salto - Barbosa
2	110	Salto - Zamora
3	110	Barbosa - Girardota
4	110	Girardota - Zamora
5	220	Guadalupe IV - Barbosa
6	220	Guadalupe IV - Occidente
7	220	Barbosa - Tasajera
8	220	Tasajera - Occidente

El resultado fue un depuramiento por variaciones en reactancia, pero las ubicaciones de TCSC siguieron siendo las mismas.

Entonces, las soluciones halladas, para un TCSC satisfacen:

- El despacho del caso base
- Las restricciones manejadas por el PST de posiciones de taps y límites de reactiva de generadores
- Las condiciones de estado estacionario sin contingencia  $f_{VN}(i)$  y  $f_{CR}(j)$
- Las condiciones de estado estacionario con contingencia  $f_{VN}(i)$ ,  $f_{CL}(k)$  y  $f_{CT}(l)$

#### 4.5.2 UBICACIÓN DE DOS TCSC

Pensando en que puede ser más económico instalar dos TCSC, dependiendo de su ubicación y su reactancia, e incluso pudiendo obtener una mejor distribución de flujos en el sistema, se plantea la alternativa de solucionar la sobrecarga con dos TCSC. La estructura del cromosoma para esta opción se muestra en la Fig. 4.4.

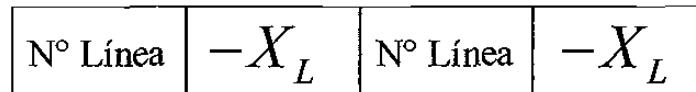


Fig. 4.4. Estructura de cromosoma para dos TCSC

La diversidad en soluciones es muy importante, ya que no basta con tener un valor pequeño de reactancia, pues eso no dice nada, como se explicó en el capítulo dos. La dimensión del TCSC será función de:

- La reactancia que entregue el procedimiento de optimización
- La longitud total de la línea donde se colocaría el TCSC
- La capacidad de carga de la línea donde se instalará el TCSC pues es un elemento serie y el amperaje máximo permitido en la línea será el amperaje máximo admisible en el TCSC



La propuesta de un solo TCSC del numeral 4.3.1., entregó soluciones únicamente en líneas de 220 kV, las cuales son líneas muy largas y de mayor capacidad de carga que las líneas de 110 kV. Esta propuesta de dos TCSC entregó combinaciones que incluyen una línea de 110 kV.

### 4.5.3 APERTURA DE LÍNEAS

Actualmente la sobrecarga de la línea Barbosa–Girardota 110 kV se maneja operativamente con la apertura de dicha línea. Se exploró esta posibilidad buscando aperturas de líneas que cumplieran con uno o ambos de los siguientes objetivos:

- Que la línea al abrir, enlace subestaciones con más confiabilidad que la subestación Giradota la cual posee cuatro líneas
- Tener otras alternativas, aunque se tuviese la misma confiabilidad en cuanto a número de líneas

Debido a las estructura manejada hasta el momento para el número de línea, no cabría dentro de la concepción de los AGs tener un cromosoma con un solo gen, para poder efectuar las operaciones de cruce y mutación.

Para solventar este problema el cromosoma se planteó como un número en representación binaria como se presenta en la Fig. 4.5.

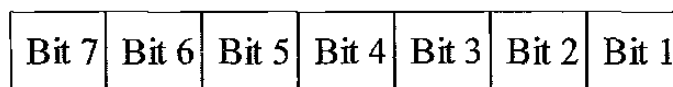


Fig. 4.5. Estructura de cromosoma para la opción de apertura de línea.

Debido a que con 6 bits el máximo decimal que se puede representar es 63 y existen 84 líneas factibles, se requiere el uso de 7 bits. Con esta estructura de 7 bits se pueden representar decimales desde cero hasta 127, por lo que se penalizan con un desempeño

igual a cero aquellos individuos que el AGs propone en binario cuya representación decimal sea mayor a 84 o también cuando el individuo sea igual a cero.

#### 4.5.4 ENLACE HVDC BACK-TO-BACK

Una posibilidad para el control de flujo es abrir un extremo de una línea existente y colocar en la mitad un enlace HVDC. La estructura de cromosoma es la mostrada por la Fig. 4.6.

Línea	MW	% Pérdidas	Sentido	MVar1	MVar2	Ang Enc 1	Ang Apag 1	Ang Enc 2	Ang Apag 2
-------	----	---------------	---------	-------	-------	--------------	---------------	--------------	---------------

Fig. 4.6. Estructura de cromosoma para la opción de enlace HVDC back-to-back.

Cada gen representa lo siguiente:

- Línea: Número de línea que se abrirá en un extremo y en la mitad se colocará el enlace back-to-back
- MW: Megavatios en el lado del rectificador para el modelo de flujo de carga de enlaces HVDC. Define la capacidad del enlace
- % Pérdidas: Es el coeficiente de pérdidas activas en el enlace HVDC
- Sentido: Define el tipo de conexión al abrir en un extremo la línea propuesta por el AG. En la Fig. 4.7. se muestra esquemáticamente la conexión original de la línea entre los nodos 1 y 2 y las dos posibles configuraciones del enlace HVDC back-to-back. Cuando el gen *Sentido* es igual a cero, la conexión es como en la Fig. 4.7.b) y cuando el gen *Sentido* es igual a uno la conexión es como en la Fig. 4.7.c)
- MVar1 y MVar2 es el porcentaje de pérdidas reactivas en el lado del rectificador y del inversor respectivamente como proporción de la potencia activa
- Ang Enc y Ang Apag son los ángulos de encendido y apagado de los elementos semiconductores. El 1 denota el lado del rectificador y 2 denota el lado del inversor

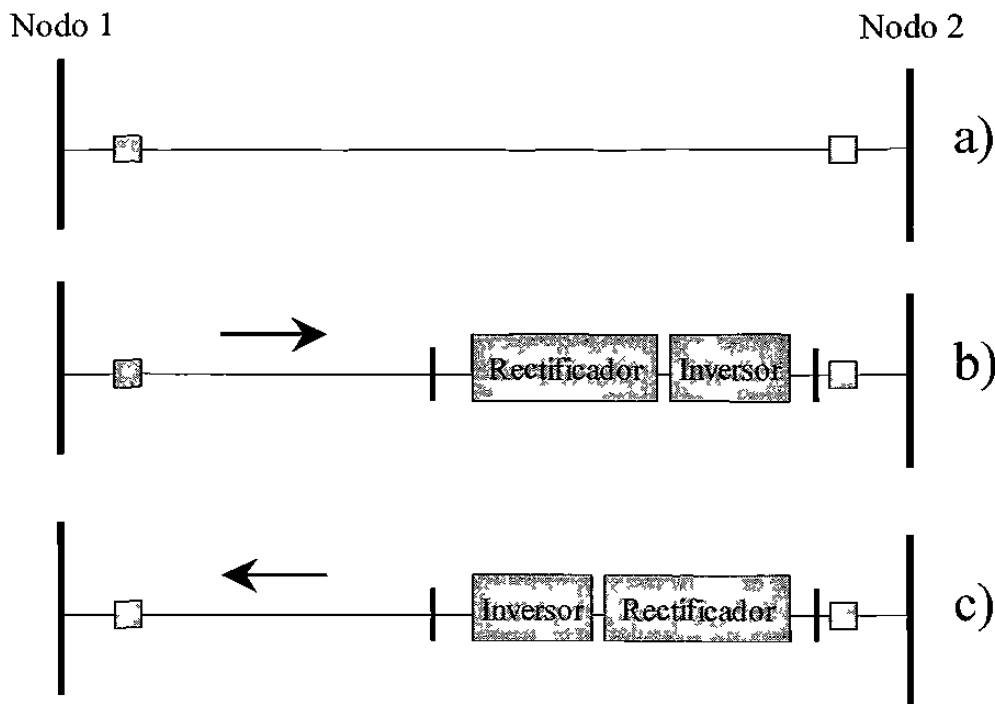


Fig. 4.7. Conexión original de la línea y posibles conexiones del enlace HVDC back-to-back.

En la Tabla 4.2. se presentan los valores máximos y mínimos usados en cada uno de los genes.

TABLA 4.2. VALORES MÍNIMOS Y MÁXIMOS DE LOS GENES PARA EL CROMOSOMA DEL ENLACE HVDC BACK-TO-BACK

	Línea	MW	% Pérdidas	Sentido	MVar1	MVar2	Ang Enc 1	Ang Apag 1	Ang Enc 2	Ang Apag 2
Mínimo	1	10	0	0	30	0	1	1	1	1
Máximo	84	150	10	1	50	10	180	180	180	180

#### 4.5.5 CONSTRUCCIÓN DE LÍNEA HVDC

Como alternativa adicional se considera construir un enlace HVDC en paralelo con alguna de las líneas existentes. Su construcción sería aprovechando los derechos de vía existentes.

La estructura del cromosoma es la misma que la del enlace HVDC back-to-back, como se muestra en la Fig. 4.6. La modificación eléctrica se hace colocando en paralelo el enlace con la línea pero sin abrir la línea.

El gen *Signo* determina el sentido del flujo en el enlace de HVDC. La Fig. 4.8 muestra la conexión según el valor del gen *Signo* propuesto por el AG.

Para los genes se utilizaron los mismos valores máximos y mínimos de la Tabla 4.2

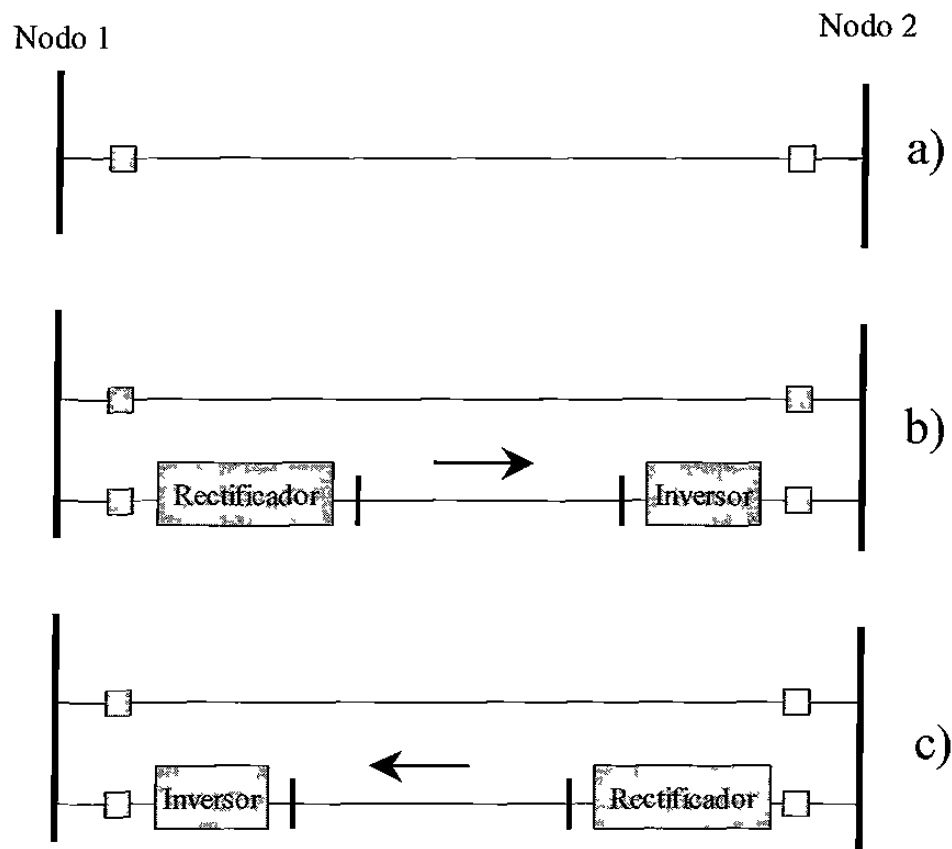


Fig. 4.8. Conexión del enlace HVDC en paralelo con línea existente.  
a) Línea original    b)  $Signo = 0$     c)  $Signo = 1$

## 4.6 OBSERVACIONES SOBRE EL USO DE LOS AG EN LA MÉTODOLÓGÍA PROPUESTA

- Es deseable un tamaño de población grande, con lo que se gana diversidad. La diversidad es básica para la evolución
- Se observó que el proceso de selección de torneo permite la convergencia más rápidamente que la selección por ruleta
- La mutación ayuda a escapar de máximos locales pero una alta probabilidad de mutación podría hacer perder material genético valioso. Para salvar esto y cuando el proceso lo permite, en lugar de detener el proceso de optimización cuando llegue al valor de uno, se puede permitir que se cumplan más generaciones e ir almacenando todos aquellos valores que tienen un desempeño igual a uno, como se explicó en el numeral 4.3.1 Este tipo de búsqueda de conjuntos o nichos de soluciones es muy importante para la planeación de la expansión
- La función de penalización no puede ser muy fuerte, pues esto es una presión negativa sobre la población. Para un mismo conjunto de parámetros, se observó que reiterativamente no convergía, pero al disminuir la constante de la función exponencial decreciente, esto le permitió converger

## CAPÍTULO 5

### RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA EN EL SISTEMA DE EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN E.S.P.

#### 5.1 INTRODUCCIÓN

**E**n el capítulo 4 se presentó la estructura de cinco tipos de soluciones usando la nueva metodología planteada, para un problema real de sobrecarga en el SEP de las Empresas Públicas de Medellín E.S.P. (EPPM). Se consideraron soluciones tanto operativas como desde la planeación de la expansión.

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos aplicando la estructura del capítulo 4 con la metodología de manejo de la congestión propuesta. La verificación eléctrica de los resultados de la optimización, se realiza implementando cada caso, incluyendo el caso base, en el software de SEPs DIgSILENT, que es la herramienta que usa la mayor parte de agentes del sector eléctrico en Colombia incluyendo el Centro Nacional de Despacho (CND), el operador central del SIN.

#### 5.2 SOLUCIONES ENCONTRADAS

Por simplicidad en la presentación de resultados no se mostrará todo el sistema colombiano por lo que se mostrarán los diagramas de la red de 110 kV y 220 kV donde se encuentra inmersa la línea de interés Barbosa-Girardota 110 kV. En la Fig 5.1. y en la Fig. 5.2. se presenta el caso base para la red de 110 kV y 220 kV respectivamente. En la red de 110 kV se puede observar la sobrecarga en estudio. La línea tiene una carga de 105.79 %.



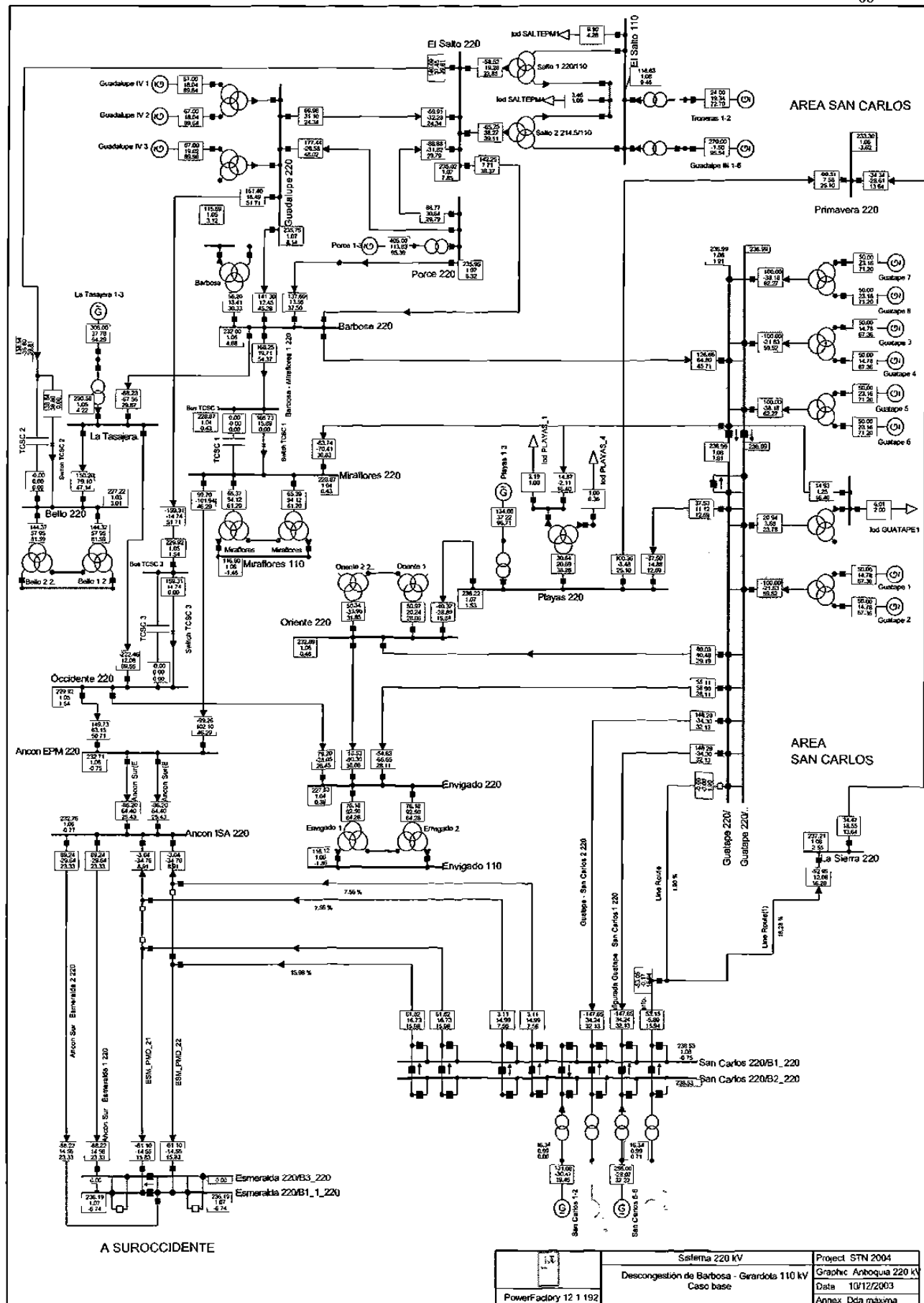


Fig. 5.2. Caso Base. Sistema 220 kV.



### 5.2.1 UBICACIÓN DE UN TCSC

Se encontraron tres líneas como factibles ubicaciones para solucionar el problema de sobrecarga ubicando un solo TCSC. En la Tabla 5.1. se presentan las líneas, sus reactancias y corriente nominal máxima sin contingencia, los valores en p.u. del TCSC asociado, entregados por la optimización con su respectivo valor en ohmios y los valores de MVA del TCSC operando a corriente nominal.

TABLA 5.1. PARÁMETROS DE LÍNEAS Y TCSC PARA DESCONGESTIÓN CON UN TCSC

<i>Línea</i>	$X_{LINEA}$ ( $\Omega$ )	$I_{MAX}$ (A)	$X_{TCSC}$ (pu)	$X_{TCSC}$ ( $\Omega$ )	$MVA_{TCSC}^{I_{max}}$
Barbosa-Miraflores 220 kV	23.86	777	-0.57	-13.60	8.21
Salto-Bello 220 kV	33.38	915	-0.79	-26.27	21.99
Guadalupe IV-Occidente 220 kV	39.32	777	-0.61	-23.87	14.41

Nótese que el valor en p.u. del TCSC sea grande o pequeño, por si solo, no es un argumento de decisión para elegir una opción. Además del valor en ohmios de reactancia de un TCSC, los MVA que representa una reactancia y el amperaje máximo, pueden ser valores decisivos en el momento de elección de un proyecto.

En las Fig. 5.3 a 5.8 se presentan los diagramas en DIgSILENT con los resultados de las redes de 110 kV y 220 kV para cada ubicación y valor del TCSC

En la Fig. 5.9. se muestra el perfil de voltajes nodales y en las Fig.5.10 y 5.11. se muestra el perfil de carga de la líneas de 110 kV y 220 kV respectivamente para el caso base y los tres posibles ubicaciones planteadas para un TCSC.

En la Fig. 5.12 se presenta un diagrama unifilar con la línea sobrecargada resaltada y las tres posibles ubicaciones del TCSC.

Puede verse que las tres alternativas mantienen el perfil de voltaje adecuado y logran descargar la línea Barbosa-Girardota 110 kV. Ya se mencionó en el capítulo 4 que además soportan las ocho contingencias sencillas de la Tabla 4.1. Todas mueven el perfil de carga de las líneas de diferente modo:

- El TCSC en Barbosa - Miraflores 220 kV, aumenta el uso del corredor Barbosa-Miraflores-Ancón 220 kV y del corredor Miraflores-San Diego-Poblado 110 kV. Esto lleva a una disminución del uso del corredor Barbosa-Tasajera-Occidente-Ancón 220 kV y del corredor Bello-Castilla-Central-Guayabal-Poblado 110 kV.
  
- El TCSC en la línea Salto-Bello 220 kV además de aumentar el nivel de carga en el propio Salto- Bello 220 kV, con esta inyección aumenta la carga en el corredor de Bello-Castilla-Central-Guayabal 110 kV, lo cual lleva a descargar los enlaces a 220 kV de Barbosa, la línea Tasajera-Bello 220 kV, el corredor Bello-Piedras Blancas-Villa Hermosa 110 kV y las líneas a 110 kV Salto-Barbosa, Salto-Zamora, Miraflores-San Diego 1 y 2 y ligeramente el enlace doble Envigado-Guayabal 110 kV.
  
- El TCSC en Guadalupe IV-Occidente 220 kV disminuye también el uso del corredor Bello-Castilla-Central-Guayabal 110 kV, de los enlaces a 220 kV de Barbosa y del corredor Occidente-Tasajera-Barbosa-Miraflores-Ancón 220 kV a partir de un aumento en el uso del corredor Guadalupe IV-Occidente- Ancón 220 kV.

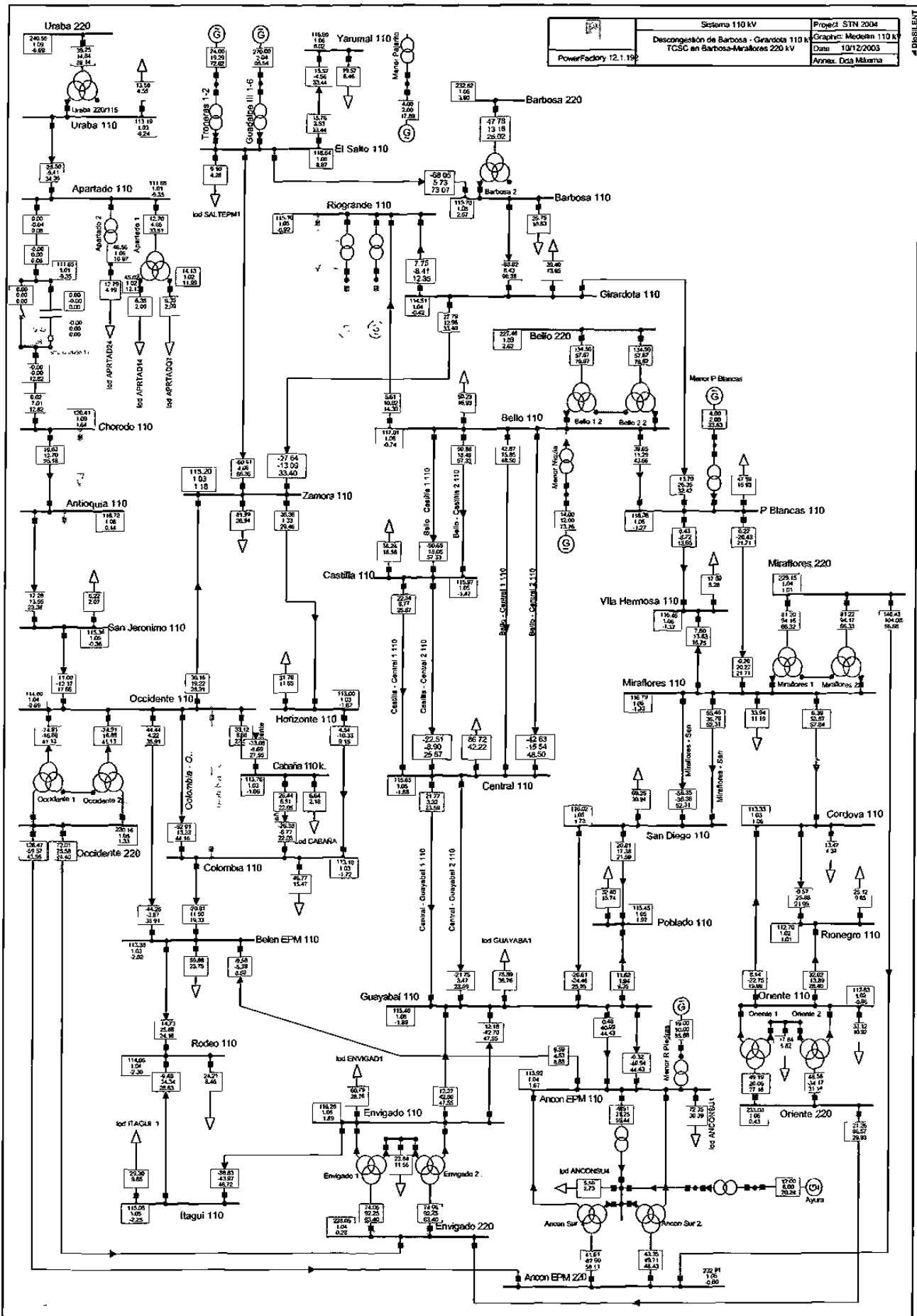


Fig. 5.3. TCSC en línea Barbosa-Miraflores 220 kV. Red de 110 kV.

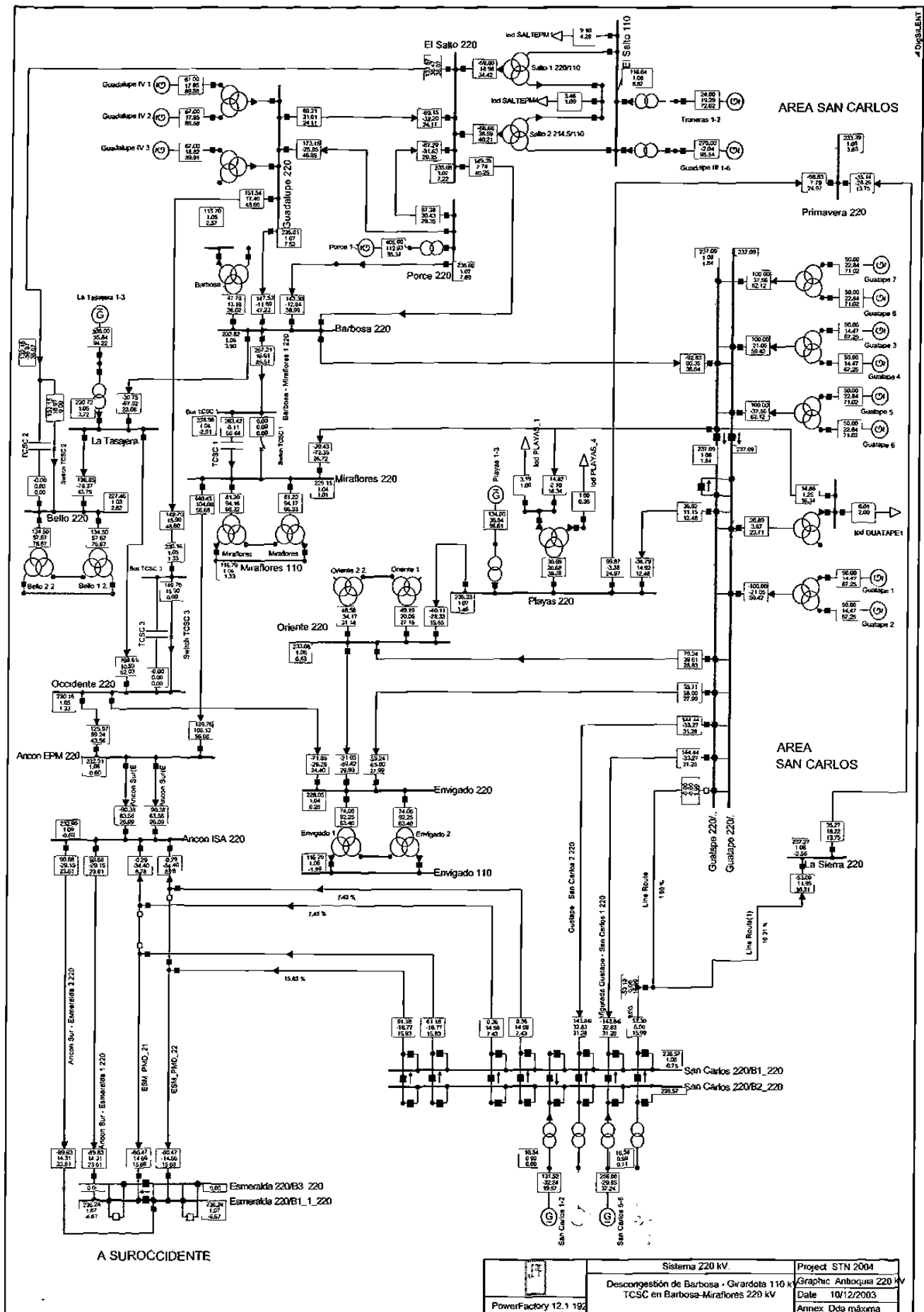


Fig. 5.4. TCSC en línea Barbosa-Miraflores 220 kV. Red de 220 kV.

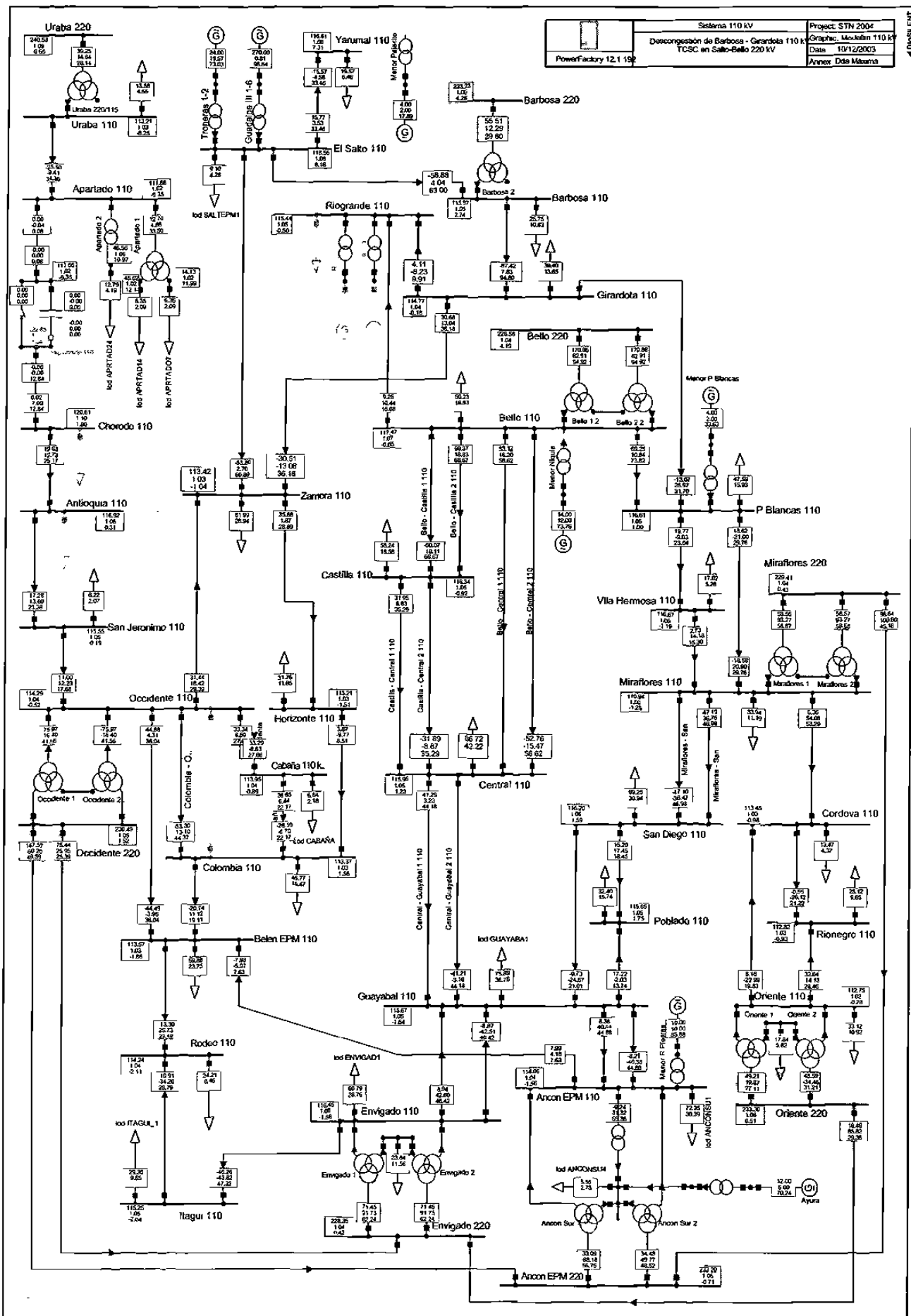


Fig. 5.5. TCSC en línea Salto-Bello 220 kV. Red de 110 kV.

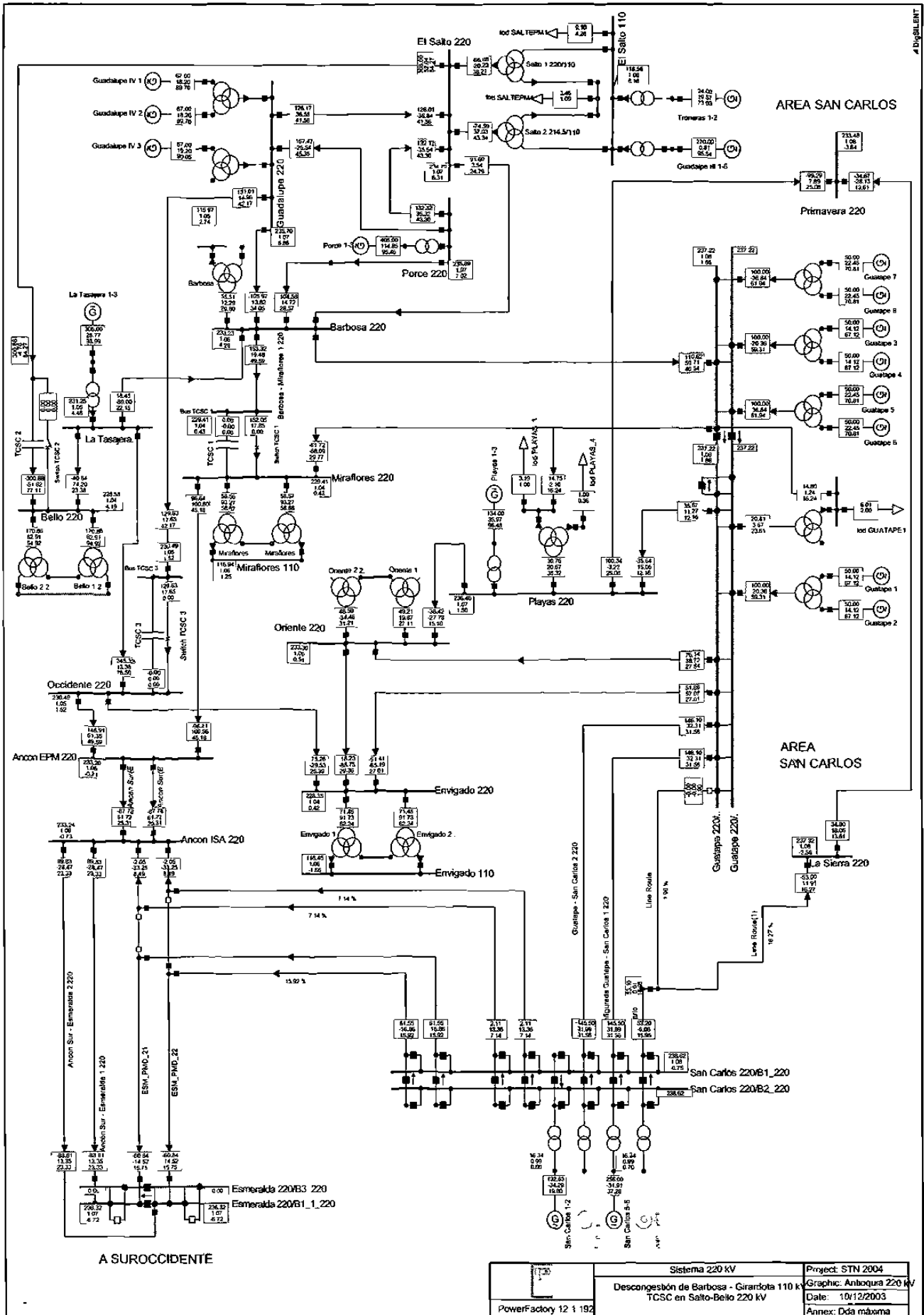


Fig. 5.6. TCSC en línea Salto-Bello 220 kV. Red de 220 kV.

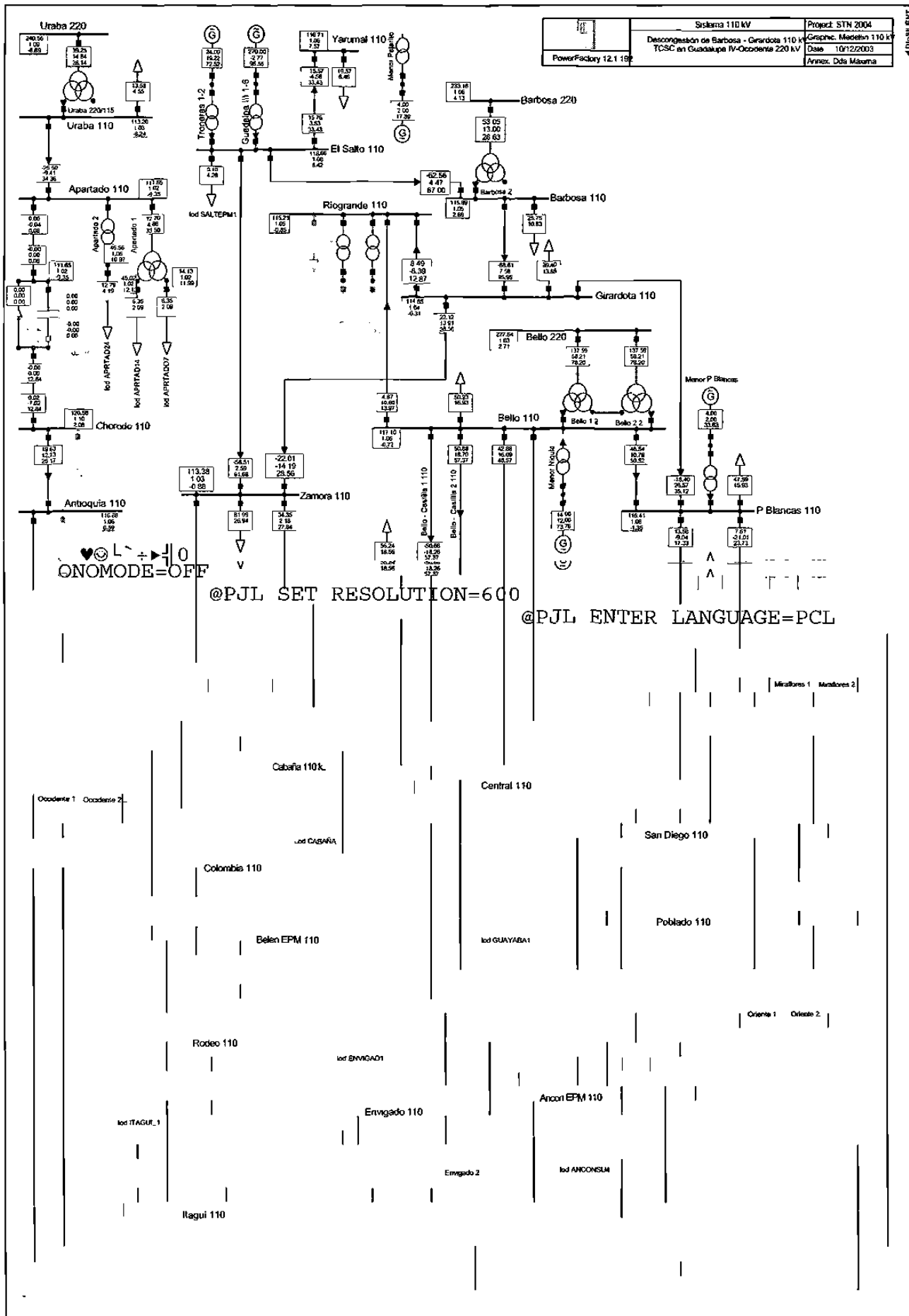


Fig. 5.7. TCSC en línea Guadalupe IV - Occidente 220 kV. Red de 110 kV.

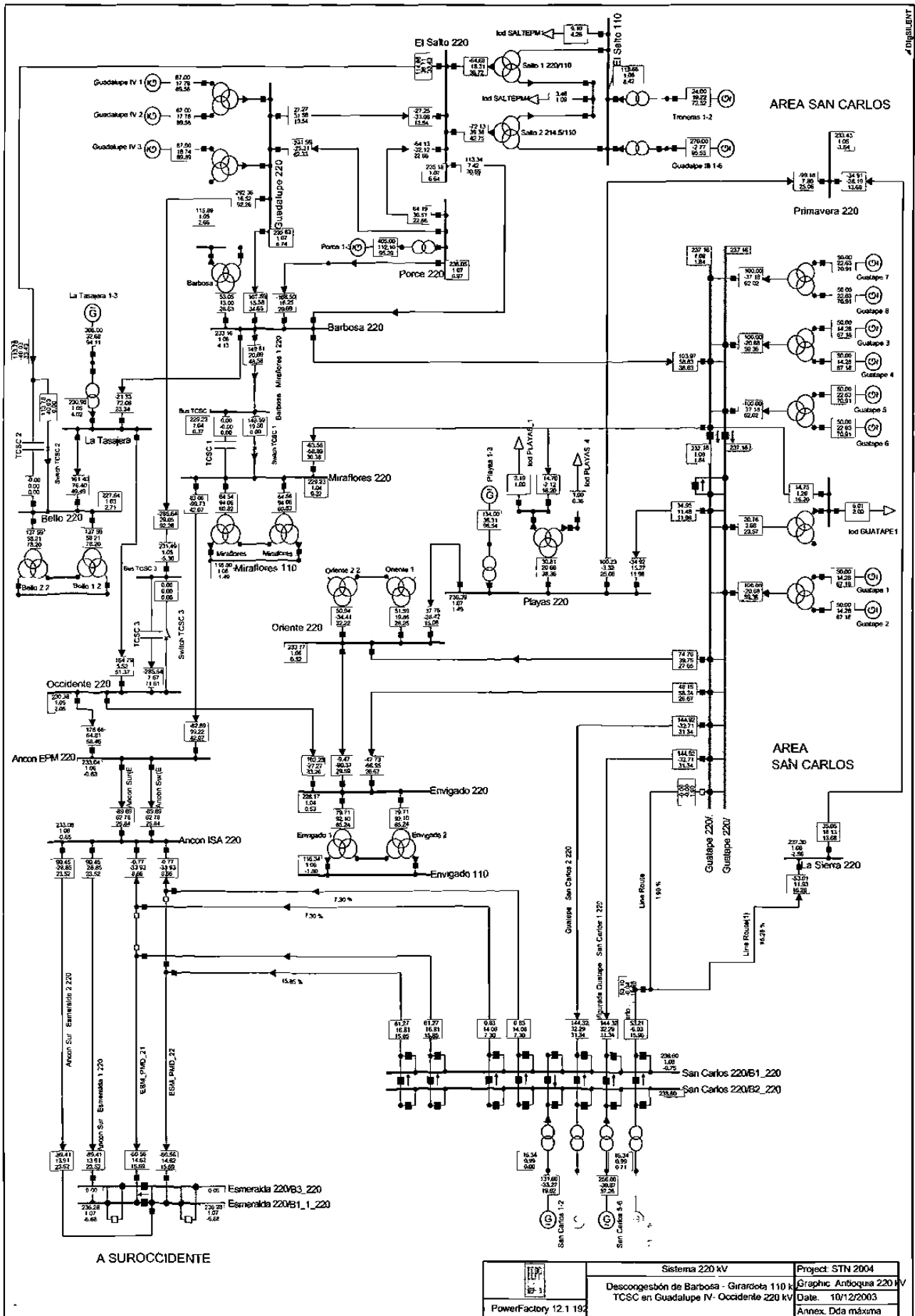


Fig. 5.8. TCSC en línea Guadalupe IV - Occidente 220 kV. Red de 220 kV.

	Sistema 220 kV Desconexión de Barbosa - Girarota 110 kV TCSC en Guadalupe IV - Occidente 220 kV	Project: STN 2004 Graphic: Antioquia 220 kV Date: 10/12/2003 Annex: Dda máxima
	PowerFactory 12.1.19	



### Perfil de voltajes con un TCSC

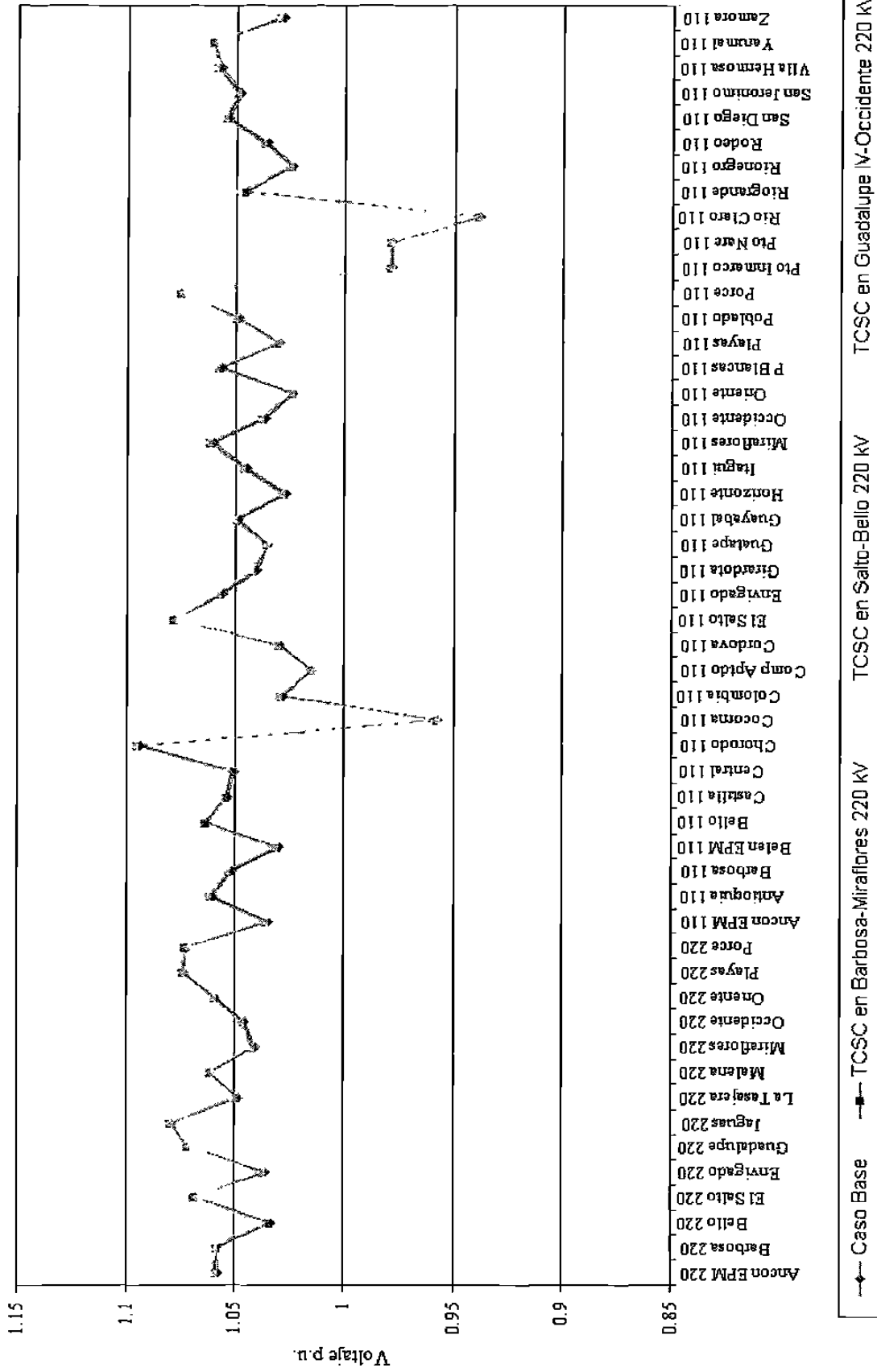


Fig. 5.9. Perfil de voltajes nodales para las diferentes alternativas de ubicación de un TCSC

### Nivel de Carga en Líneas 110 kV con un TCSC

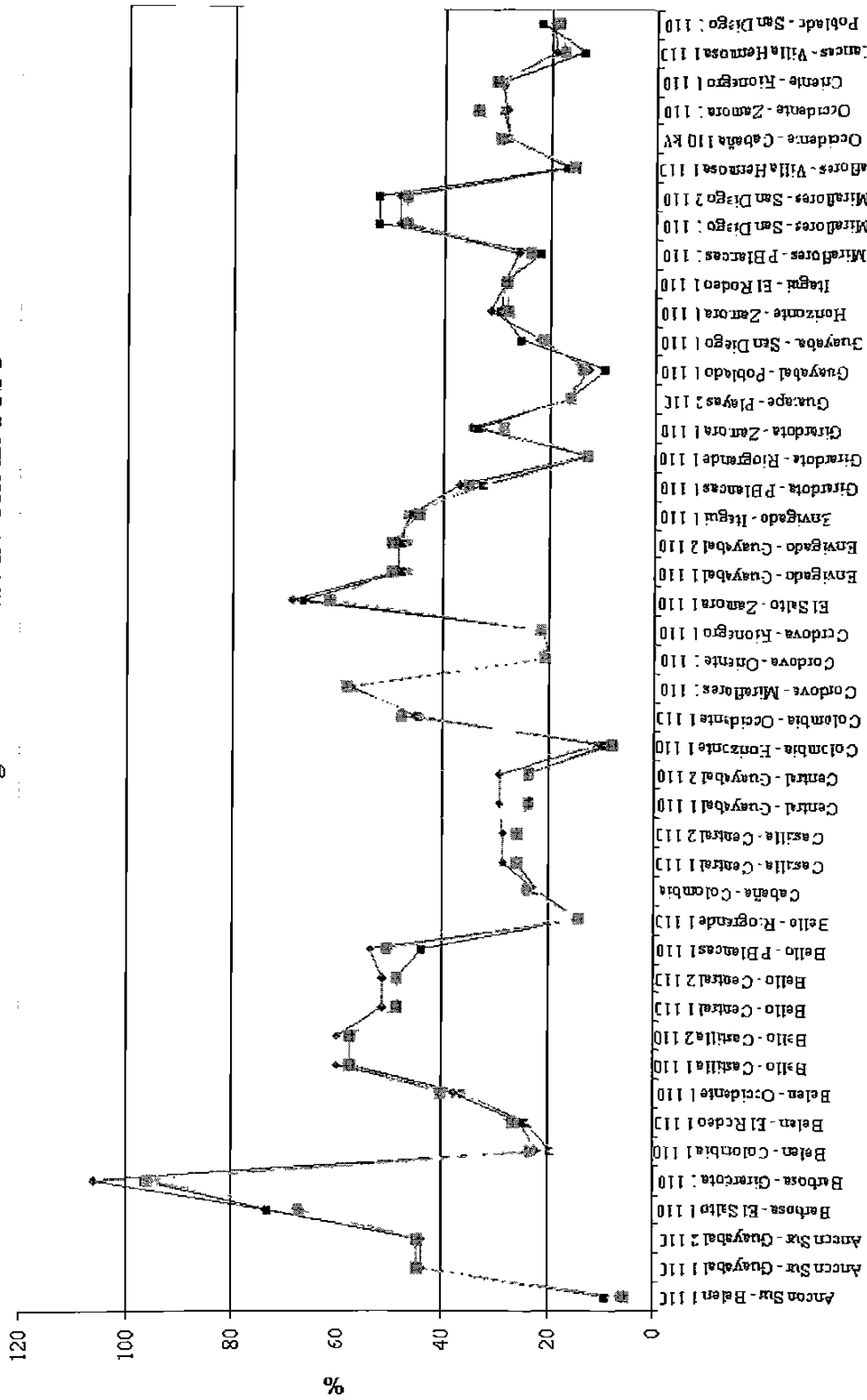


Fig. 5.10. Nivel de carga en líneas de 110 kV para las tres alternativas de ubicación de un TCSC

### Nivel de Carga en Líneas de 220 kV con un TCSC

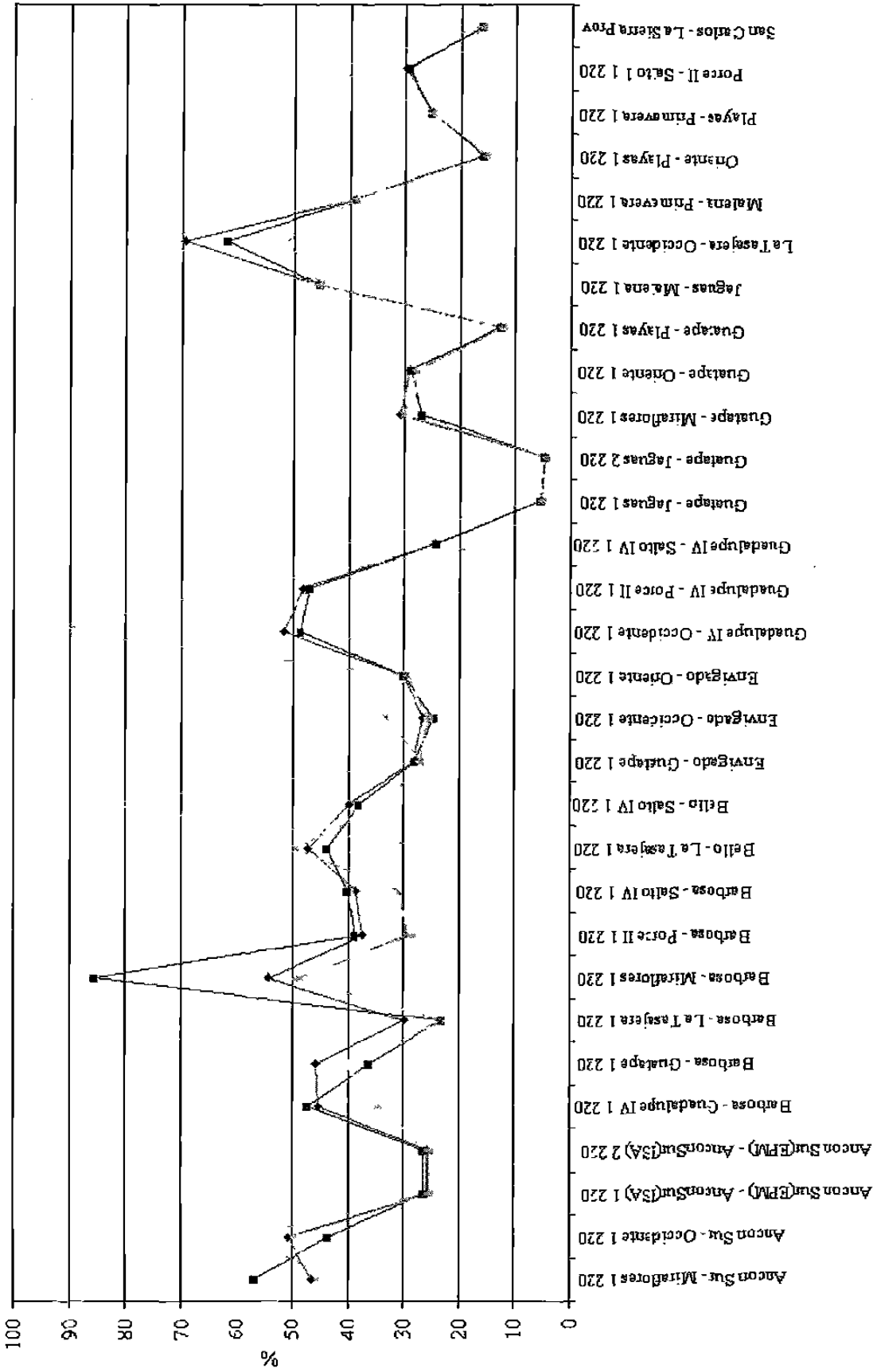


Fig. 5.11. Nivel de carga en líneas de 220 kV para las tres alternativas de ubicación de un TCSC



## 5.2.2 UBICACIÓN DE DOS TCSC

Se encontraron cuatro ubicaciones posibles formando tres combinaciones que solucionan la sobrecarga de la línea Barbosa-Girardota 110 kV. En la Tabla 5.2. se muestran las cuatro líneas con sus valores de reactancia y la corriente máxima de línea, la reactancia del TCSC en p.u entregada por la optimización, la reactancia del TCSC en Ohms y los MVA del TCSC a la corriente máxima de línea

TABLA 5.2. PARÁMETROS DE LÍNEAS Y TCSC PARA DESCONGESTIÓN CON DOS TCSC

<i>Línea</i>	$X_{LÍNEA}$ ( $\Omega$ )	$I_{MAX}$ (A)	$X_{TCSC}$ (pu)	$X_{TCSC}$ ( $\Omega$ )	$MVA_{TCSC}^{Imax}$
Barbosa - Miraflores 220 kV	23.86	777	0.40	9.55	5.76
Tasajera - Occidente 220 kV	11.08	805	0.50	5.54	3.59
Guadalupe IV - Occidente 220 kV	39.32	777	0.50	19.66	11.87
Salto - Zamora 110 kV	37.70	467	0.27	10.05	2.19

En la Tabla 5.3 se presentan las tres alternativas para ubicación de dos TCSC. Los valores del TCSC son los presentados en la Tabla 5.2.

TABLA 5.3. COMBINACIONES DE LINEAS PARA DESCONGESTIÓN CON DOS TCSC

<i>Opción</i>	<i>Línea TCSC 1</i>	<i>Línea TCSC 2</i>
1	Guadalupe IV - Occidente 220 kV	Salto - Zamora 110 kV
2	Guadalupe IV - Occidente 220 kV	Tasajera-Occidente 220 kV
3	Tasajera-Occidente 220 kV	Barbosa-Miraflores 220 kV

En las Fig. 5.13 a 5.18 se presentan los diagramas en DIGSILENT con los resultados de las redes de 110 kV y 220 kV para cada ubicación y valor de los dos TCSC

En la Fig. 5.19. se muestra el perfil de voltajes nodales y en las Fig.5.20 y 5.21. se muestra el perfil de carga de las líneas de 110 kV y 220 kV respectivamente para el caso base y las tres posibles ubicaciones planteadas para dos TCSC.

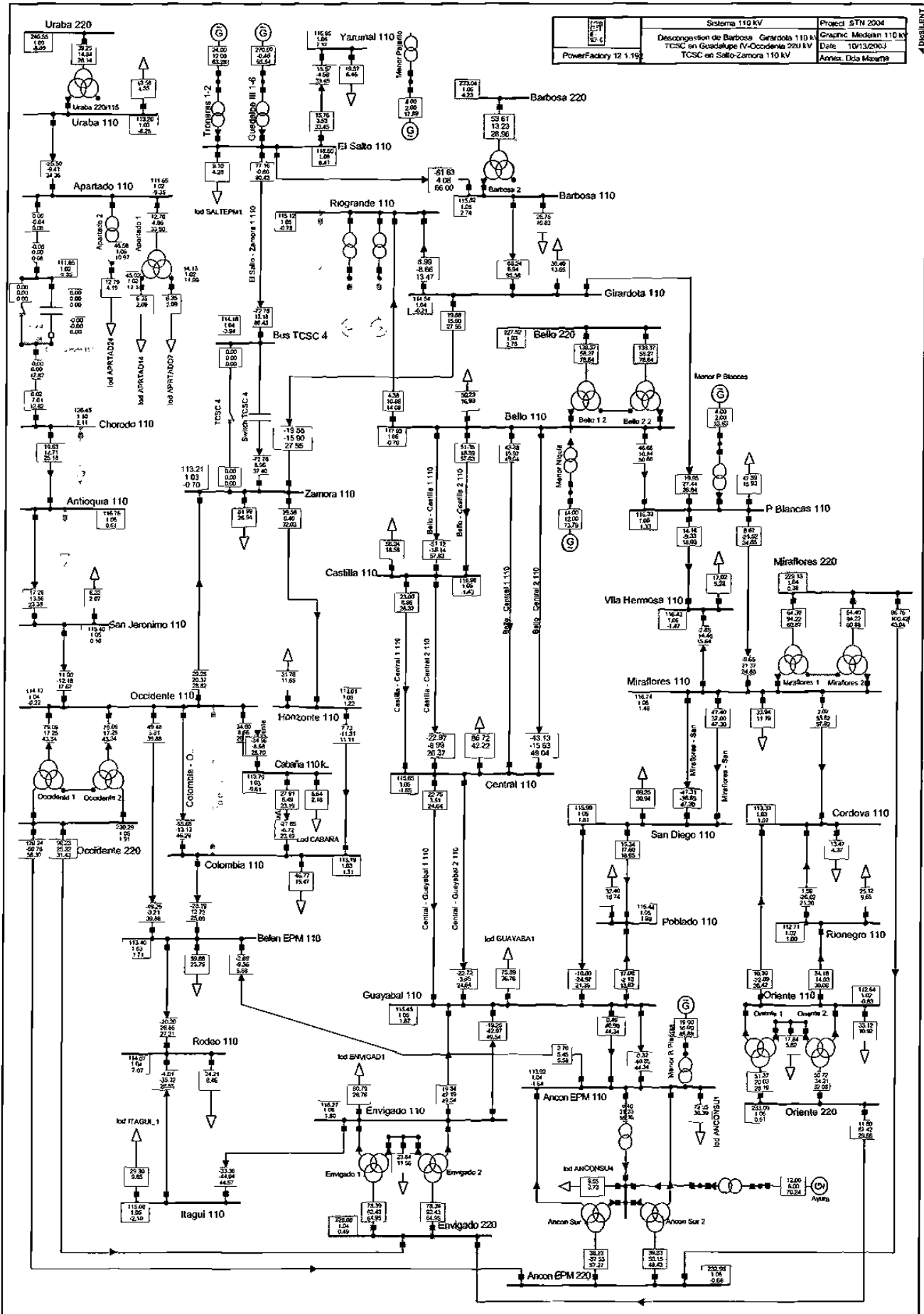


Fig. 5.13. TCSC en líneas Guadalupe IV - Occidente 220 kV y Salto - Zamora 110 kV. Red 110 kV

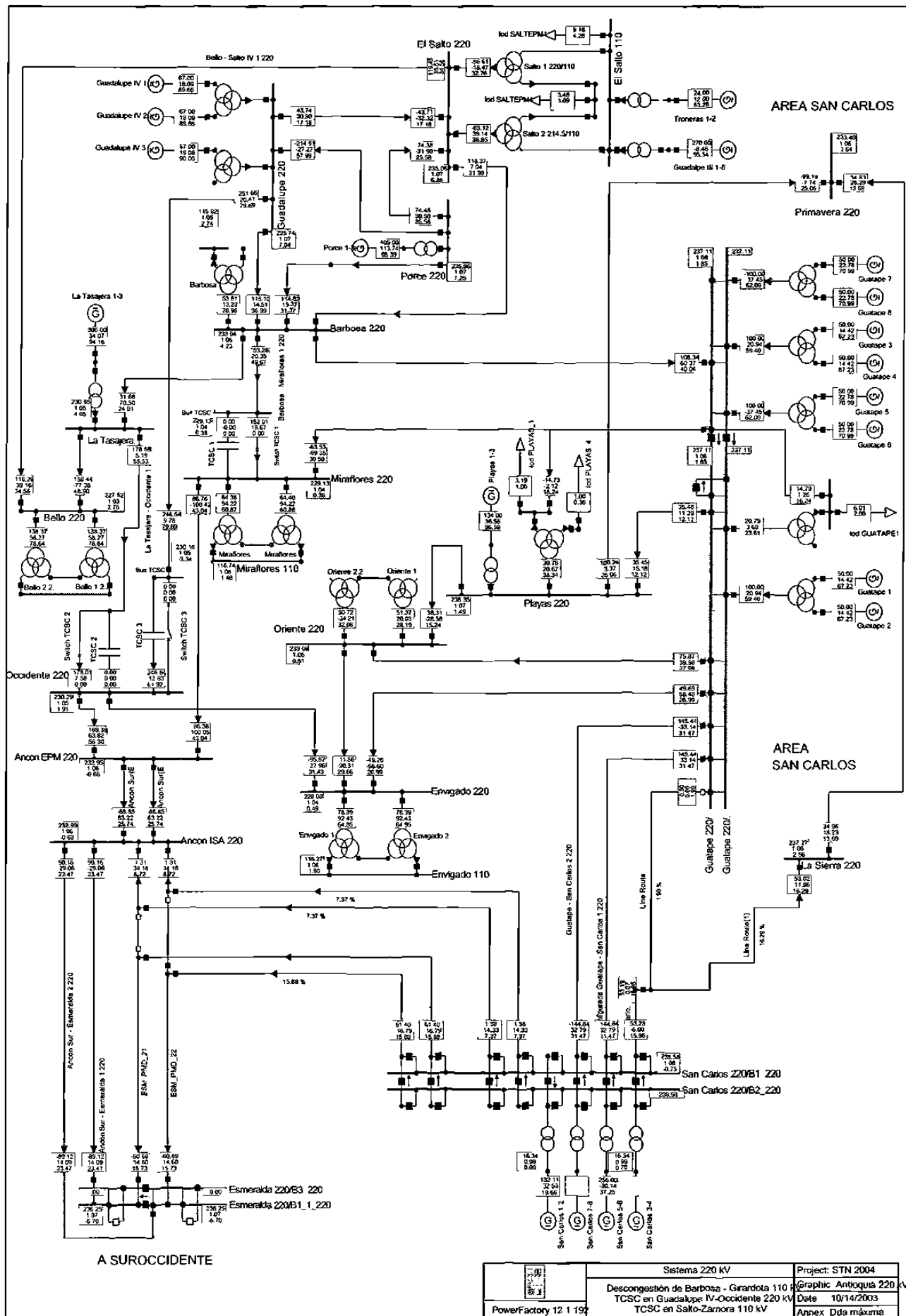


Fig. 5.14. TCSC en líneas Guadalupe IV - Occidente 220 kV y Salto - Zamora 110 kV. Red 220 kV

	Sistema 220 kV Descongestión de Barboza - Grandota 110 TCSC en Guadalupe IV-Occidente 220 kV TCSC en Salto-Zamora 110 kV	Project: STN 2004 Graphic: Antioquia 220 Date: 10/14/2003 Annex: Dda máxima
	PowerFactory 12.1.19	kV
	220	kV
	110	kV

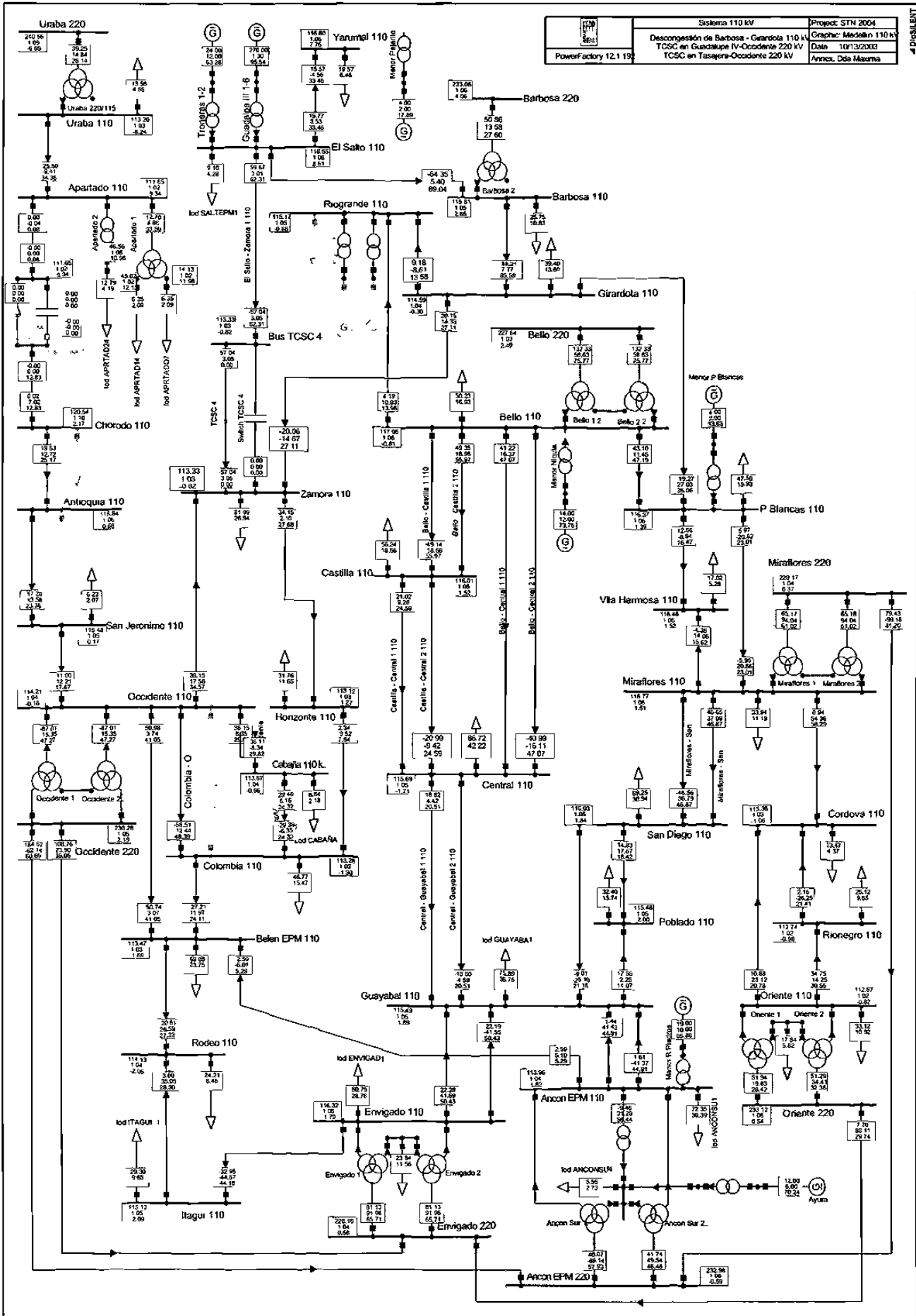


Fig. 5.15. TCSC en líneas Guadalupe IV-Occidente 220 kV y Tasajera-Occidente 220 kV. Red 110 kV.



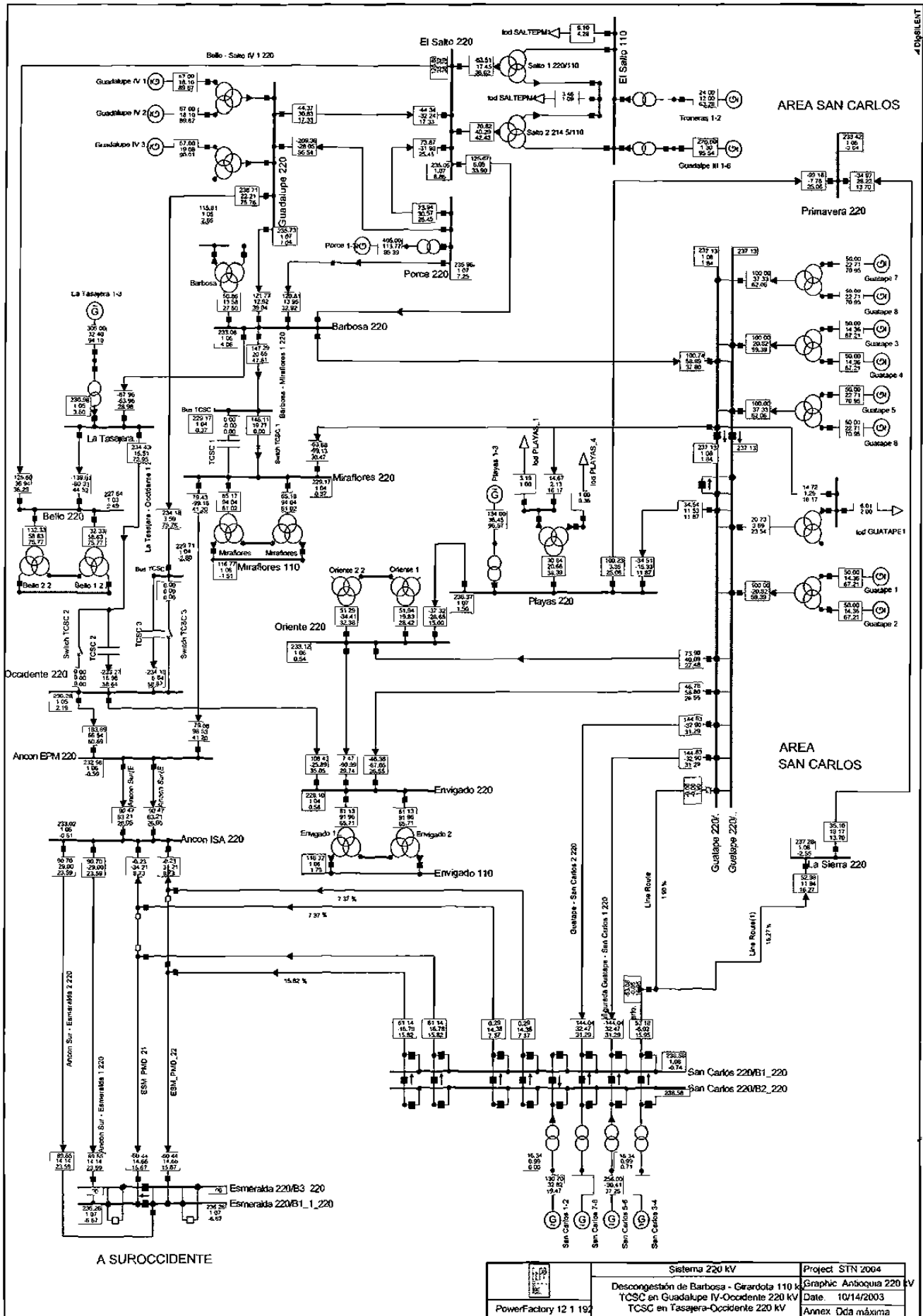


Fig. 5.16. TCSC en líneas Guadalupe IV - Occidente 220 kV y Tasajera-Occidente 220 kV. Red de 220 kV

	Sistema 220 kV Descongestión de Barbosa - Girardota 110 kV TCSC en Guadalupe IV-Occidente 220 kV TCSC en Tasajera-Occidente 220 kV	Project: STN 2004 Graphic: Anboquia 220 kV Date: 10/14/2003 Annex: Dda máxima
	PowerFactory 12.1.192	

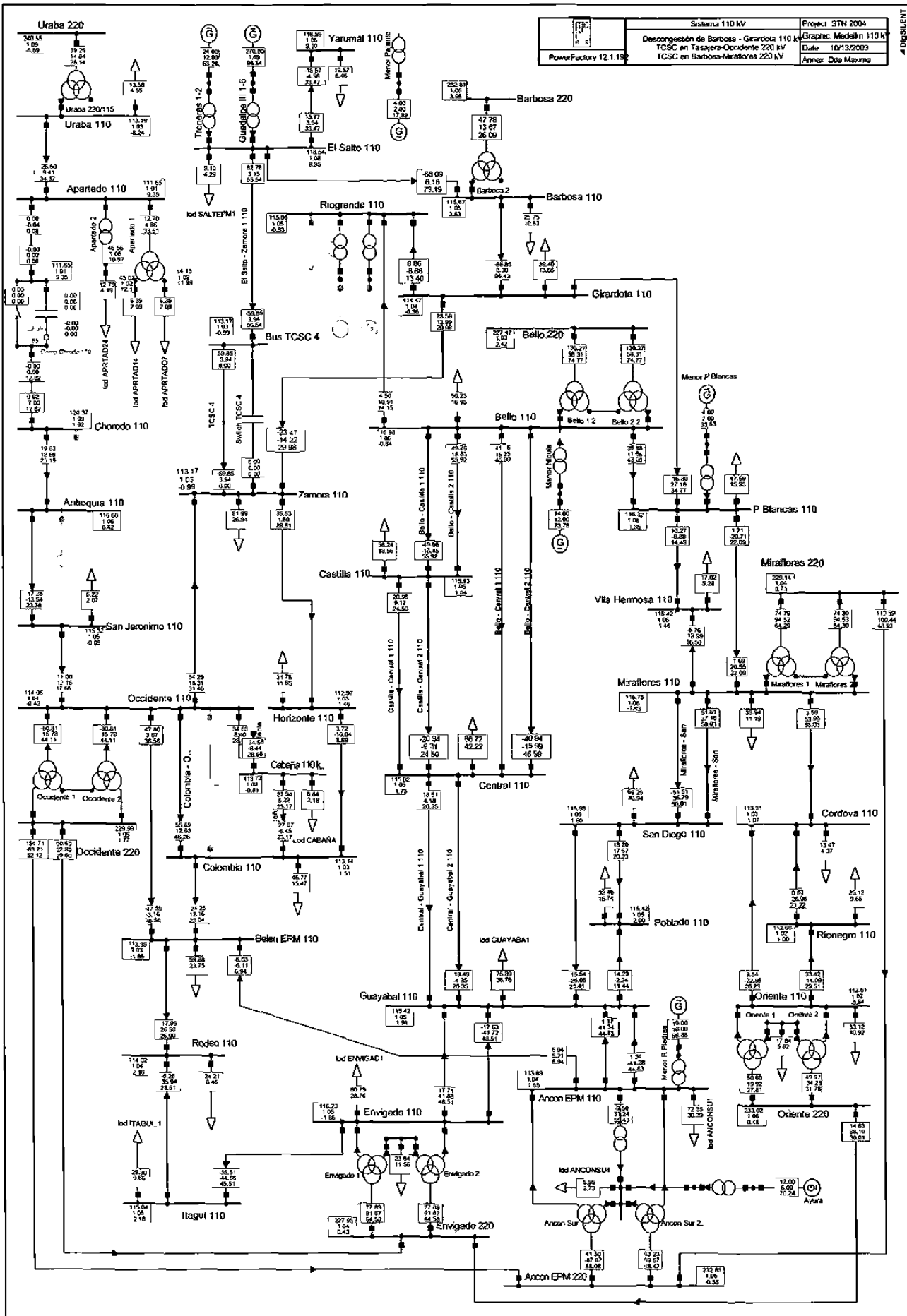


Fig. 5.17. TCSC en líneas Tasajera-Occidente 220 kV y Barbosa - Miraflores 220 kV.Red de 110 kV

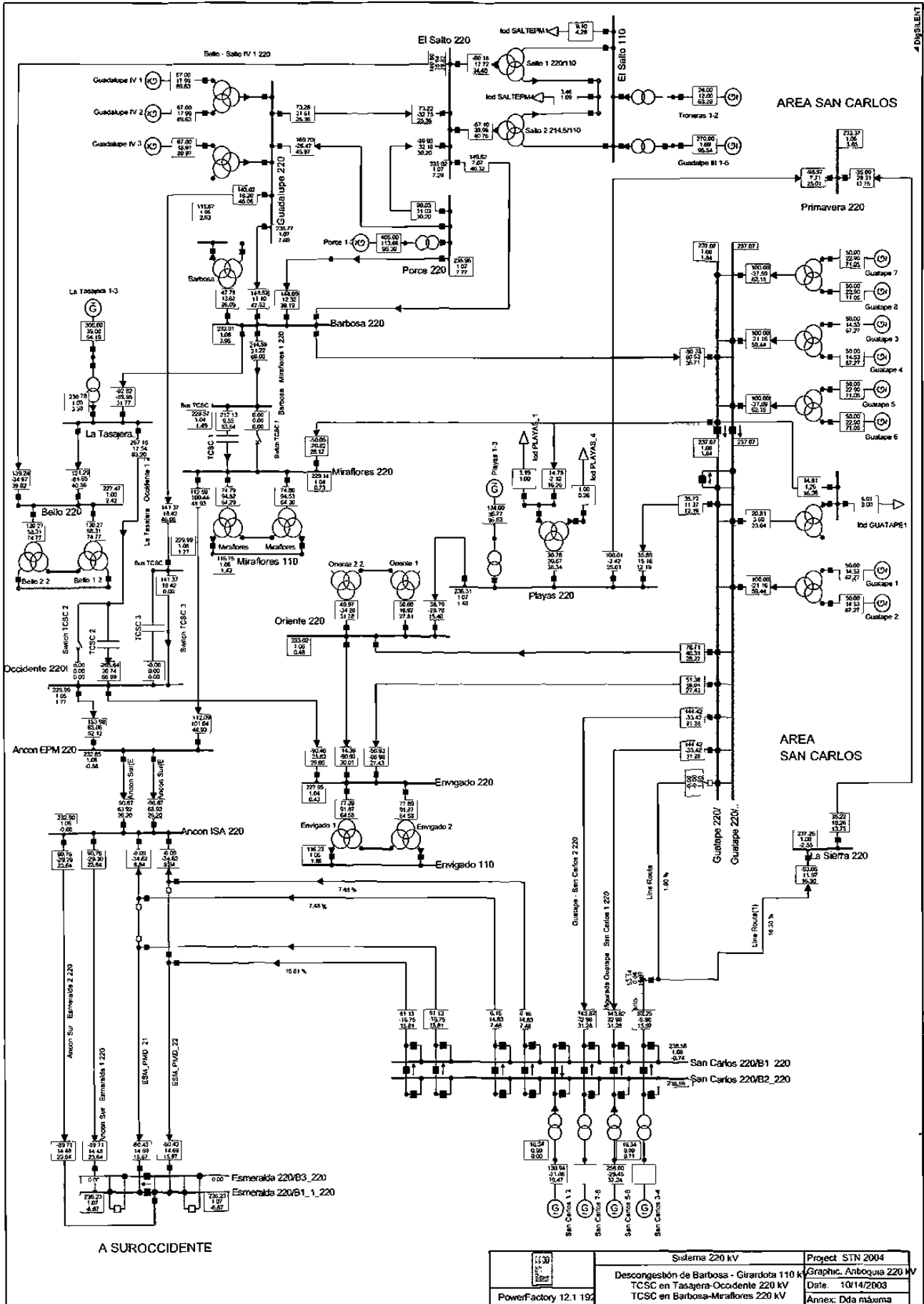
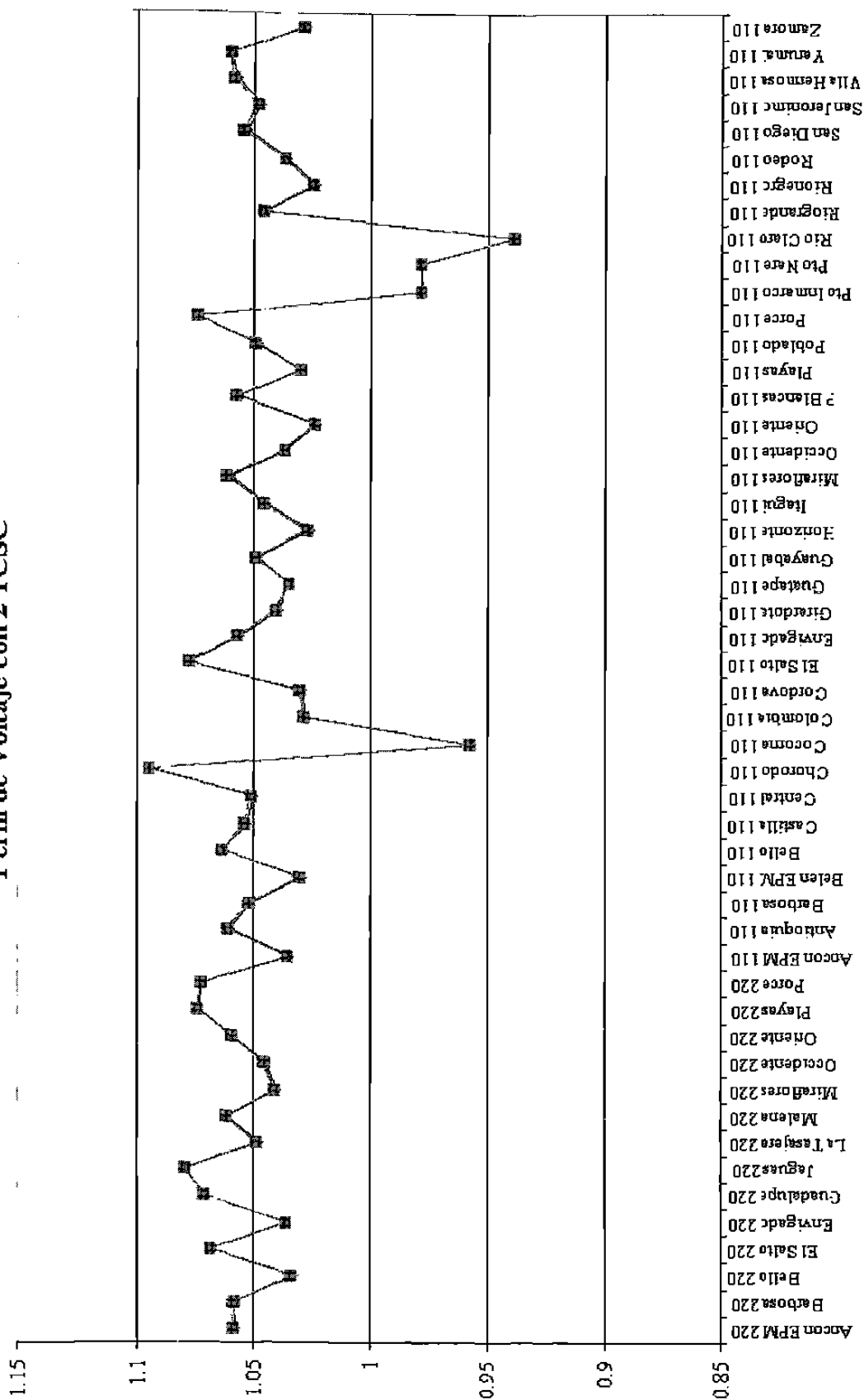


Fig. 5.18. TCSC en líneas Tasajera-Occidente 220 kV y Barbosa - Miraflores 220 kV.Red de 220 kV

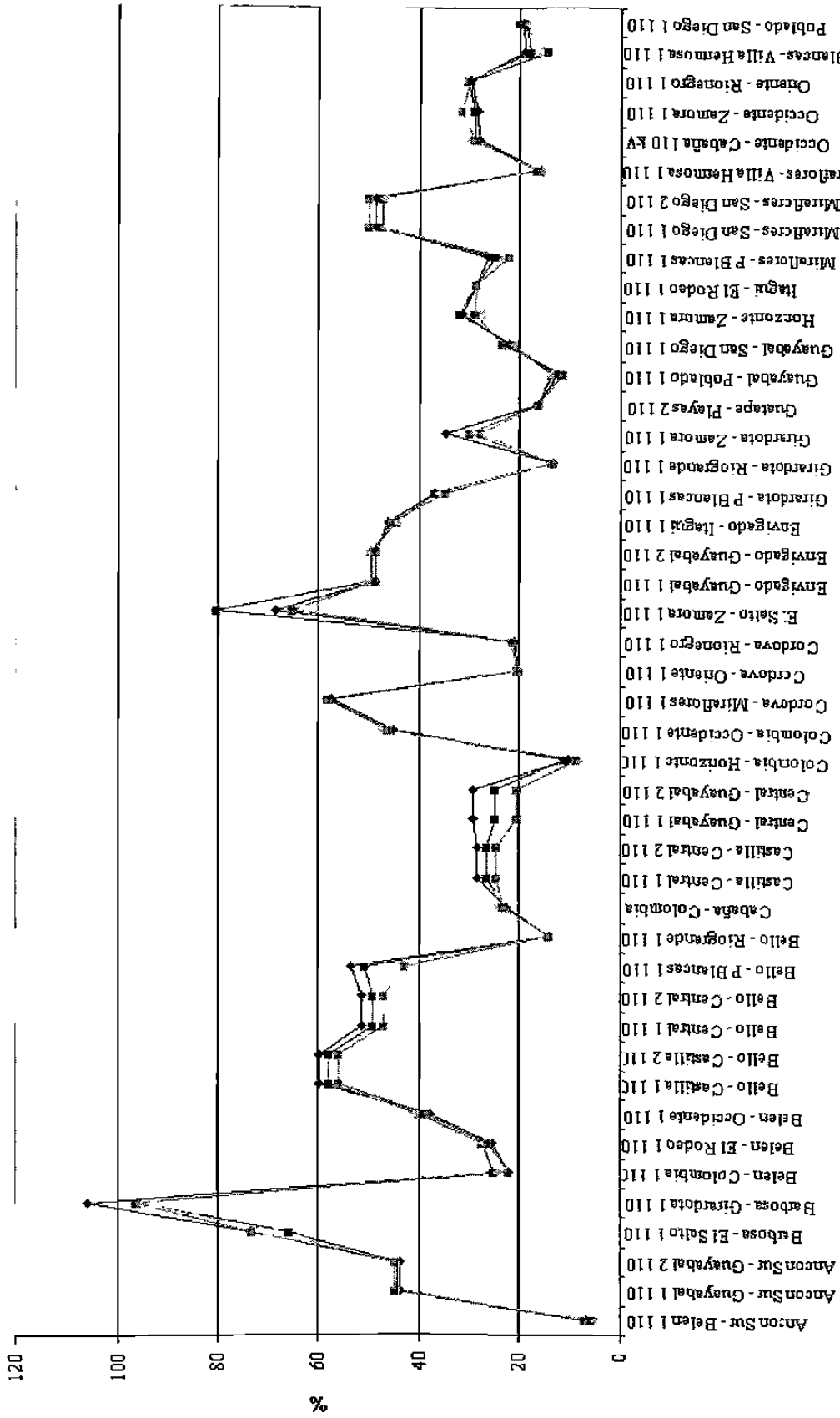
### Perfil de Voltaje con 2 TCSC



—◆— Caso base  
 ---■--- TCSC en Guadalupe IV-Occidente 220 kV y Tasajera-Occidente 220 kV  
 ---■--- TCSC en Guadalupe IV-Occidente 220 kV y Salto-Zamora 110 kV  
 ---■--- TCSC en Tasajera-Occidente 220 kV y en Barbosa-Miraflores 220 kV

Fig. 5.19. Perfil de voltajes nodales para las diferentes alternativas de ubicación de DOS TCSC

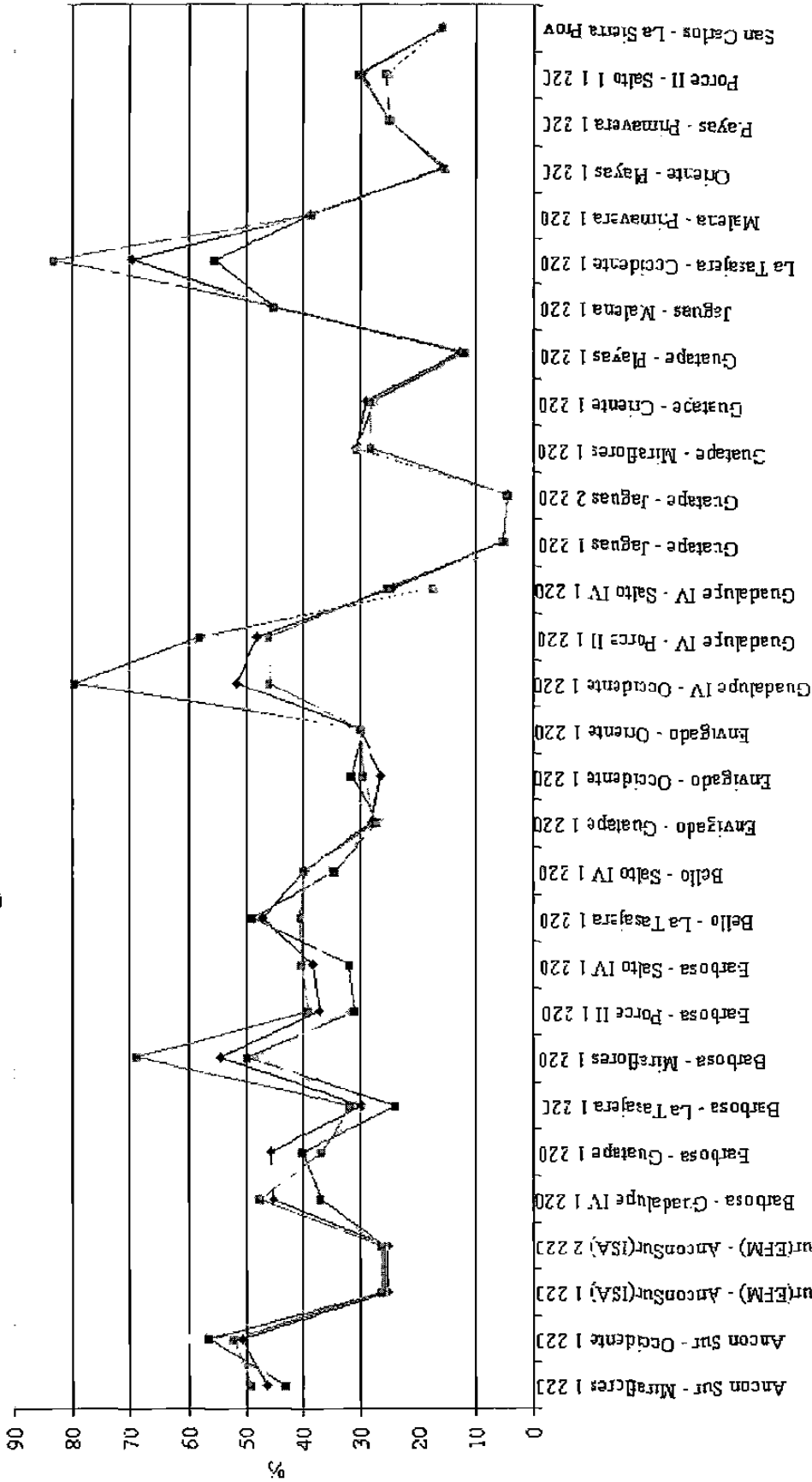
Carga en Líneas de 110 kV con 2 TCSC



—◆— Caso base  
 -■- TCSC en Guadalupe IV - Occidente 220 kV y Salto-Zamora 110 kV  
 -#- TCSC en Tasajera-Occidente 220 kV y en Barbosa-Miraflores 220 kV

Fig. 5.20. Perfil de carga en líneas de 110 kV para las tres alternativas de ubicación de dos TCSC

### Carga en Líneas de 220 kV con 2 TCSC



—◆— Caso base  
 -■- TCSC en Guadalupe IV-Occidente 220 kV  
 ■ TCSC en Tasajera-Occidente 220 kV y en Barbosa-Miraflores 220 kV

Fig 5 21 Perfil de carga en líneas de 220 kV para las tres alternativas de ubicación de dos TCSC

Se puede observar en las tres opciones colocando dos TCSC que todas mantienen el perfil de voltajes prácticamente idéntico al perfil del caso base.

Respecto a la redistribución de flujos, en las tres alternativas con 2 TCSC, se observa que:

- se elimina la sobrecarga de Barbosa-Girardota 110 kV
- se disminuye el nivel de carga del corredor Bello-Castilla-Central-Guayabal 110 kV, y entre estas dos últimas subestaciones se llega a disminuir en casi un 10%.
- En las alternativas de TCSC que no incluyen la línea Barbosa-Miraflores 220 kV se disminuye el nivel de carga de las líneas asociadas a Barbosa.
- Las tres alternativas incrementan el uso del enlace Occidente – Ancón 220 kV

### 5.2.3 ENLACE HVDC BACK-TO-BACK

Se encontraron cuatro ubicaciones posibles para realizar una conexión HVDC back-to-back según la estructura de la sección 4.3.4. Las cuatro posibles ubicaciones fueron:

- Salto - Barbosa 110 kV con flujo hacia Barbosa
- Bello - Riogrande 110 kV con flujo hacia Riogrande
- Girardota - Riogrande 110 kV con flujo hacia Girardota
- Barbosa – Girardota 110 kV con flujo hacia Girardota

Nótese que la última alternativa es la misma línea sobrecargada.

Con el fin de estudiar el impacto en los cuatro proyectos se colocó un enlace de 30 MW. En la Fig. 5.22 puede observarse el perfil de carga para las líneas de 110 kV y en la Fig. 5.23 el perfil de carga para las líneas de 220 kV para el caso base y los cuatro proyectos planteados.

### Carga en Líneas de 110 kV con enlace Back-to-Back

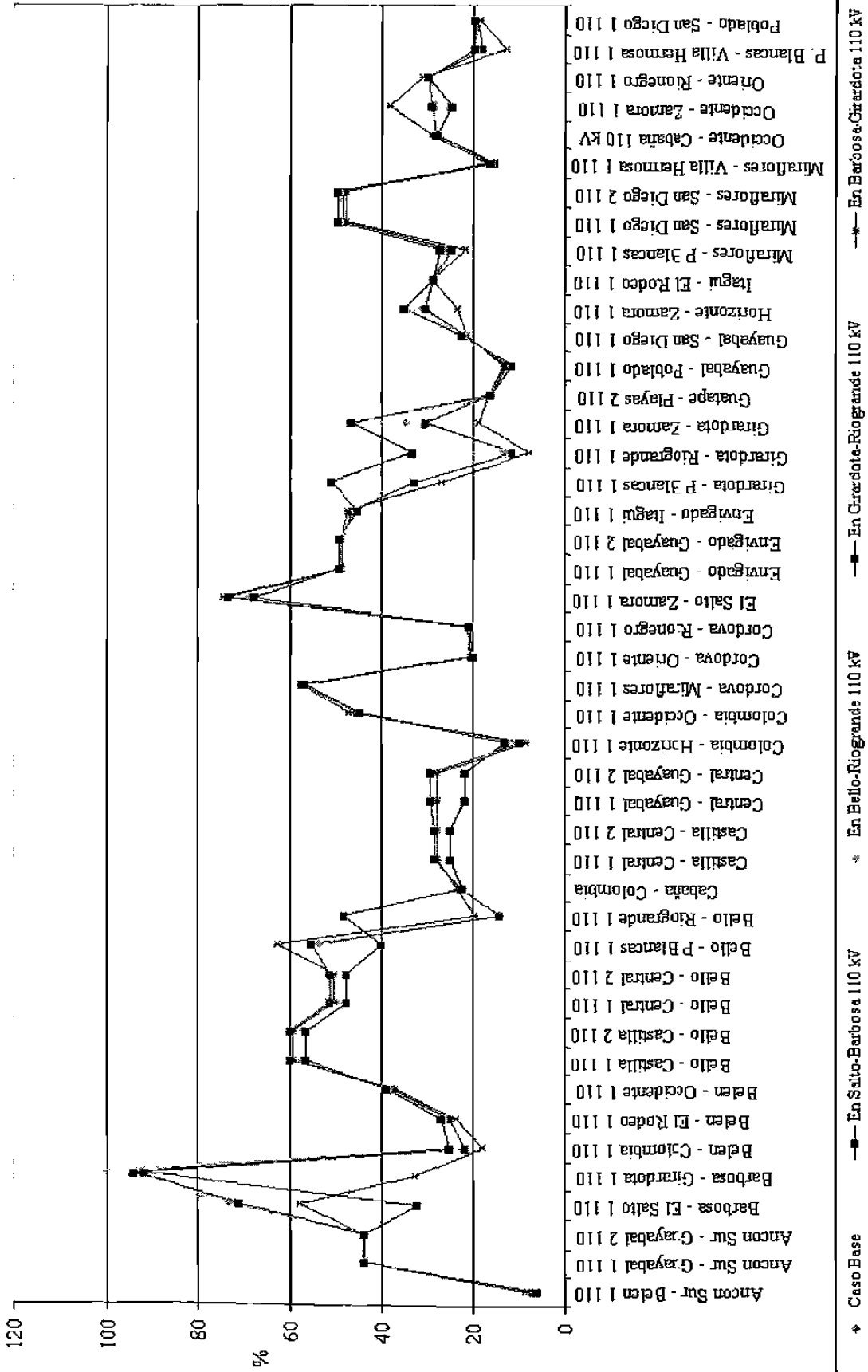


Fig. 5.22. Perfil de carga en líneas de 110 kV para las cuatro alternativas de ubicación de enlace HVDC back-to-



### Carga en Líneas de 220 kV con enlace Back-to-Back

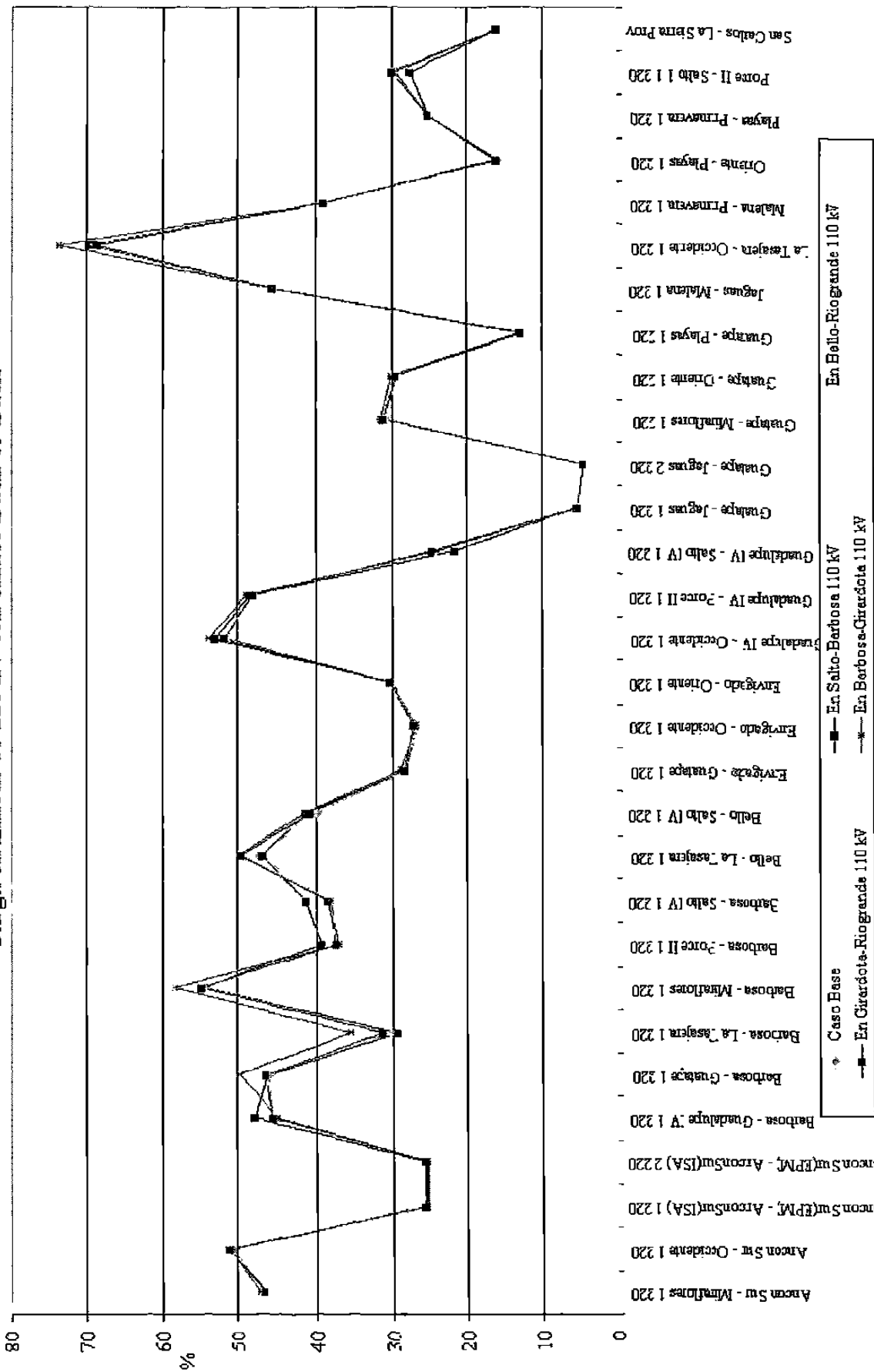


Fig. 5.23. Perfil de carga en líneas de 220 kV para las cuatro alternativas de ubicación de enlace HVDC back-to-

Todas las opciones de enlace back-to-back eliminan la sobrecarga de la línea Barbosa-Girardota 110 kV. Las alternativas de Bello-Riogrande 110 kV y Girardota-Riogrande 110 kV, logran disminuir la carga del corredor Bello-Castilla-Central-Guayabal 110 kV.

La alternativa que logra una mayor redistribución de flujos en la red de 110 kV, es el enlace en la línea Barbosa-Girardota 110 kV. Es un control directo en el cuello de botella. Esto se logra a partir de aumentar el uso de los enlaces a Barbosa en 220 kV y el aumento en la carga en Tasajera- Occidente 220 kV, que para el caso base es la línea en 220 kV más cargada.

En la Fig. 5.24 se observa el perfil de voltajes al introducir enlaces HVDC. El perfil de voltaje, permanece prácticamente intacto y dentro de los rangos necesarios.

En el anexo A se presentan los diagramas de los enlaces back-to-back y de las redes de 110 kV y 220 kV con las soluciones entregadas por DIGSILENT para los cuatro alternativas halladas con la metodología propuesta.

Este tipo de alternativa es equivalente a reconfigurar una línea existente por un nuevo enlace HVDC, con la diferencia que no se construye línea DC, sino que al final de la línea se coloca el enlace HVDC.

Dentro de la optimización planteada en la Fig. 3.1. se usa la totalidad de los genes del cromosoma de la sección 4.3.4. Debido a que DIGSILENT usa una parametrización automática de los ángulos de encendido y apagado, para la solución del flujo DC, los genes usados durante verificación son:

- El número de línea
- El sentido del flujo
- Los MW del enlace.

Esta observación también es válida para los enlaces HVDC en paralelo.

### Perfil de Voltaje con enlaces HVDC back-to-back

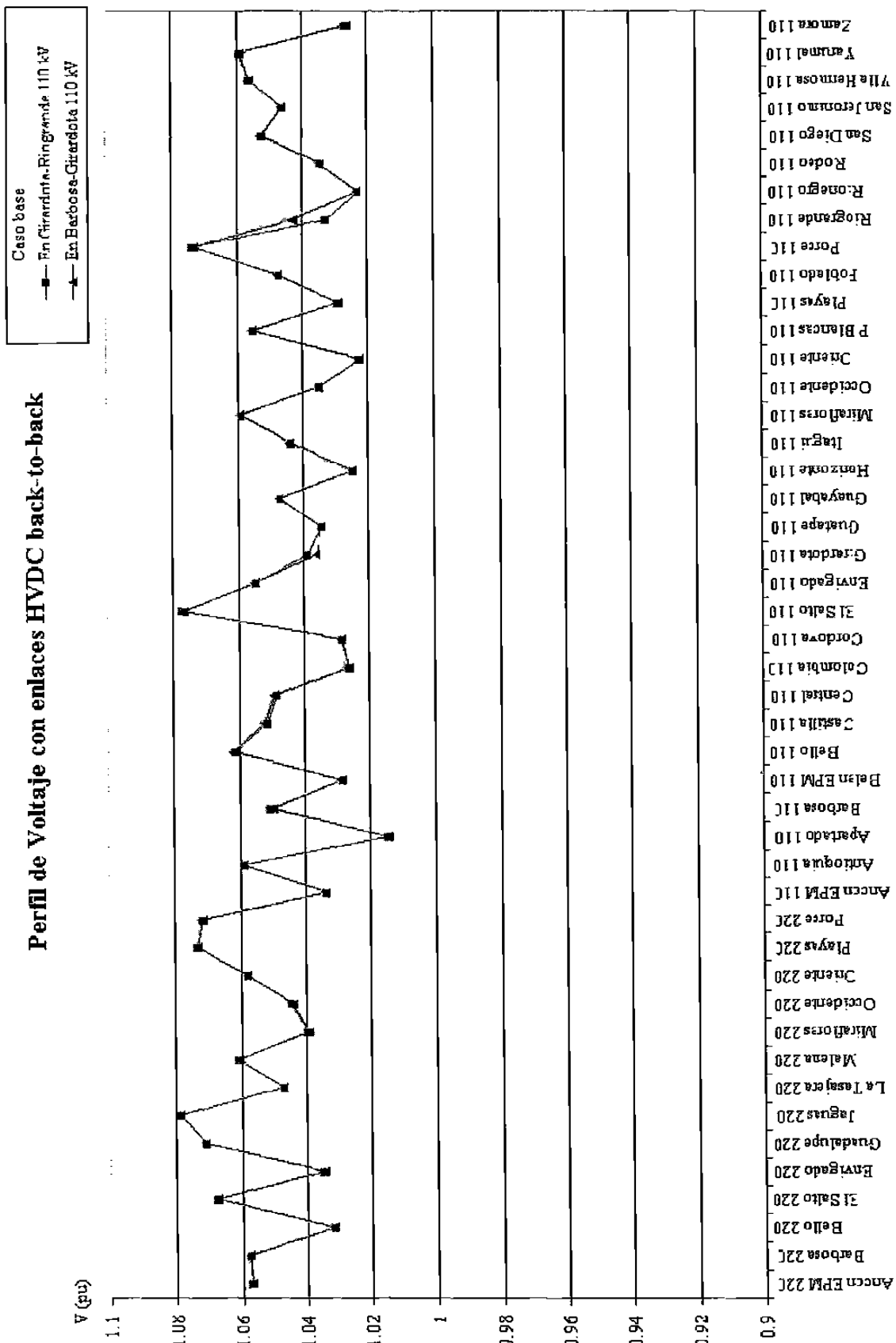


Fig. 5.24. Perfil de voltaje en los nodos para dos alternativas de ubicación de enlace HVDC back-to-back

## 5.2.4 CONSTRUCCIÓN DE LINEA HVDC

Se encontraron dos ubicaciones posibles para la construcción de enlaces HVDC en paralelo con líneas existentes. Los enlaces encontrados fueron:

- Barbosa-Girardota 110 kV con flujo hacia Girardota
- Salto-Zamora 110 kV con flujo hacia Zamora

En la Fig. 5.25 puede observarse el perfil de carga para las líneas de 110 kV y en la Fig. 5.26 el perfil de carga para las líneas de 220 kV para el caso base y los dos proyectos planteados.

Ambas alternativas logran descargar la línea Barbosa-Girardota 110 kV, aunque el enlace Salto-Zamora 110 kV requiere de 5 MW más para dejar al límite la carga de Barbosa-Girardota 110 kV. Con ambas alternativas no se logra modificar apreciablemente el perfil de carga de algún corredor, tanto en 220 kV como en 110 kV.

En la Fig. 5.27 se pueden observar los perfiles de voltajes nodales para los dos proyectos planteados. Ambas alternativas mantienen en condiciones muy adecuados el perfil de voltaje.

Se encontró también como posible solución la línea Salto-Zamora 110 kV con flujo hacia Salto 110 kV, lo cual es un lazo de flujo, una circulación innecesaria de potencia activa, pues el flujo entre Salto y Zamora, siempre tiene el sentido hacia Zamora debido a la generación proveniente de El Salto. Esto no es una solución práctica.

Los diagramas en DIGSILENT para ambas alternativas de enlace HVDC en paralelo y para la solución no práctica se presentan en el Anexo B

Carga en Líneas de 110 kV con enlace HVDC en paralelo

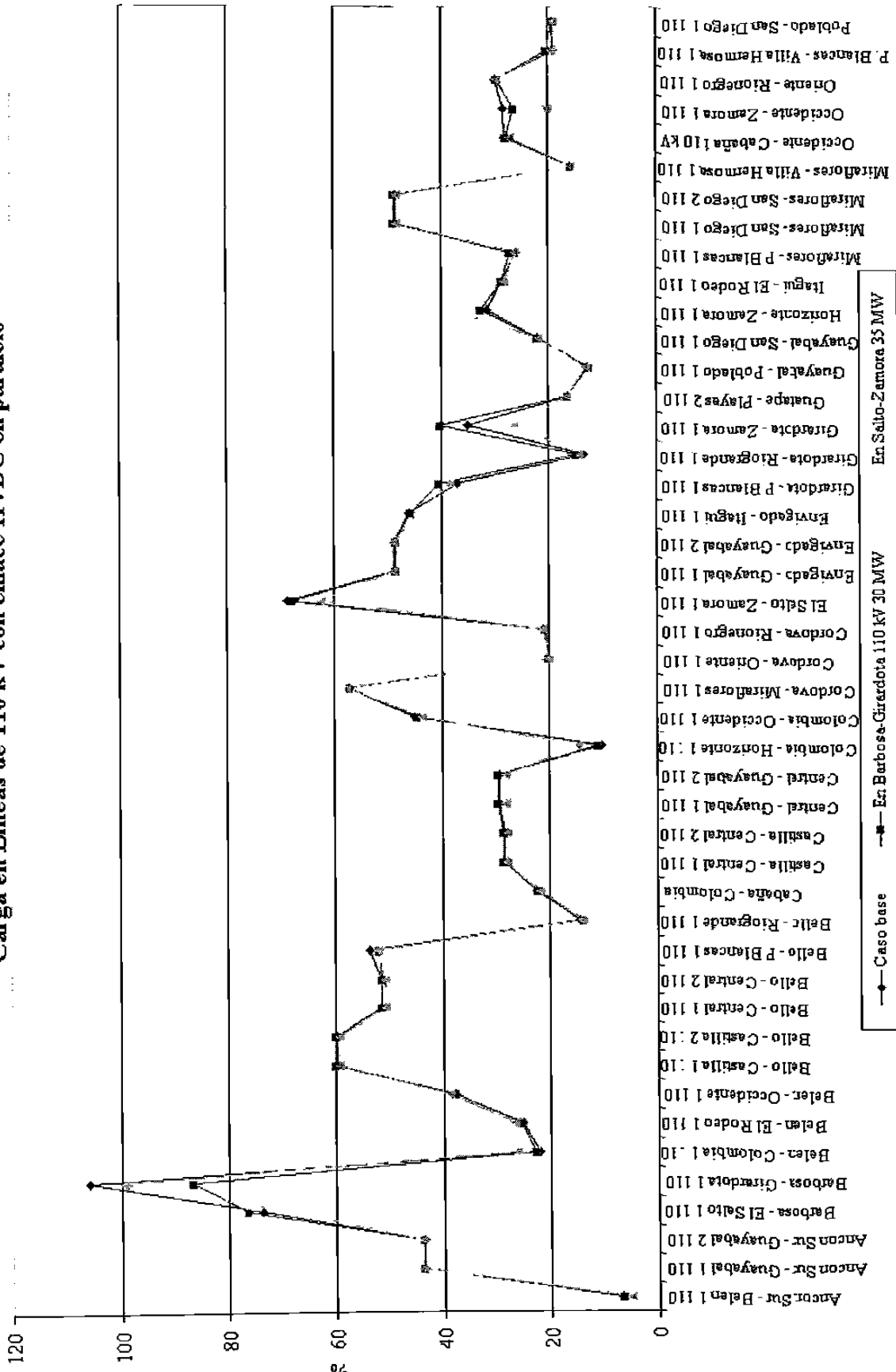


Fig. 5.25. Perfil de carga en líneas de 110 kV con enlace HVDC en paralelo

Carga en Líneas de 220 kV con enlace HVDC en paralelo

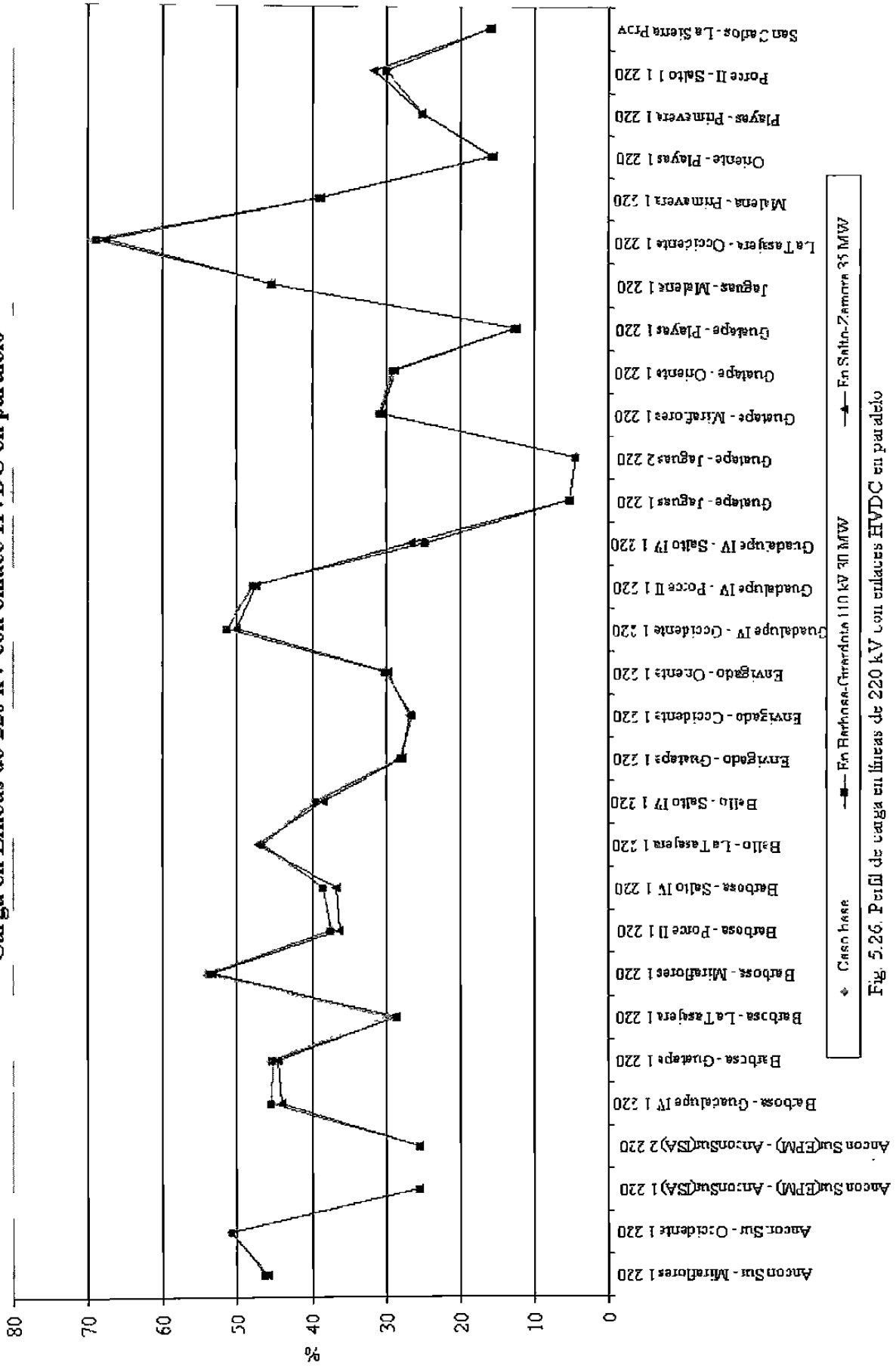


Fig. 5.26 Perfil de carga en líneas de 220 kV con enlaces HVDC en paralelo

### Perfil de Voltaje con enlace HVDC en paralelo

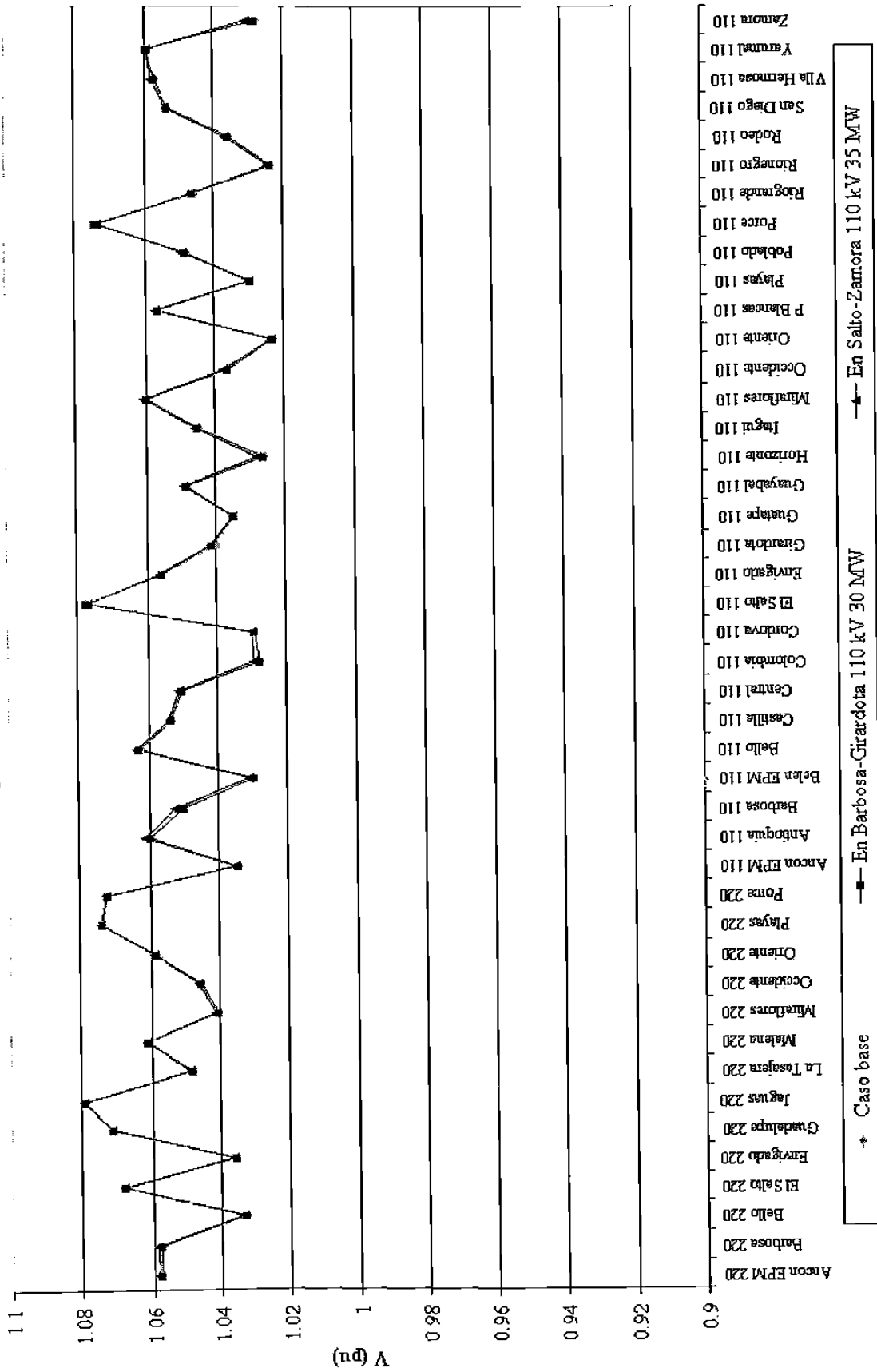


Fig. 5.27. Perfil de voltajes nodales para las diferentes alternativas de enlace HVDC en paralelo

### 5.2.5 APERTURA DE LÍNEAS

La sobrecarga de la línea Barbosa-Girardota 110 kV se ha manejado hasta hoy con la apertura de ella. Por medio de la propuesta de manejo de la congestión y con el esquema presentado en la sección 4.3.3. se encontraron otras dos alternativas de apertura de líneas para manejar operativamente dicha sobrecarga:

- Línea Girardota-Zamora 110 kV
- Línea Salto-Barbosa 110 kV.

En las Fig. 5.28 y en la Fig. 5.29. se puede observar el nivel de carga de los sistemas de 110 kV y 220 kV para la alternativa que actualmente se usa y para las otras dos propuestas. Puede observarse que la alternativa actual de abrir la línea Barbosa-Girardota 110 kV disminuye la carga en el corredor Bello-Castilla-Central-Guayabal 110 kV, incrementando el uso de los enlaces a 220 kV de las subestaciones Barbosa y Bello y el aumento en la carga en Tasajera- Occidente 220 kV, que para el caso base es la línea en 220 kV más cargada.

Las alternativas propuestas de abrir líneas, logran descargar la línea Barbosa-Girardota 110 kV y los cambios en los flujos en las redes de 110 y 220 kV no dejan líneas dentro de márgenes críticos.

## 5.3 CONCLUSIONES

Por medio de la metodología propuesta para el manejo de la congestión se han encontrado catorce soluciones para eliminar la sobrecarga de la línea Barbosa-Girardota 110 kV. Son doce soluciones propias de la expansión del SEP y dos soluciones operativas alternas a la que actualmente se usa. Estas soluciones se resumen en la Tabla 5.4.



Carga en líneas de 110 kV con apertura de líneas

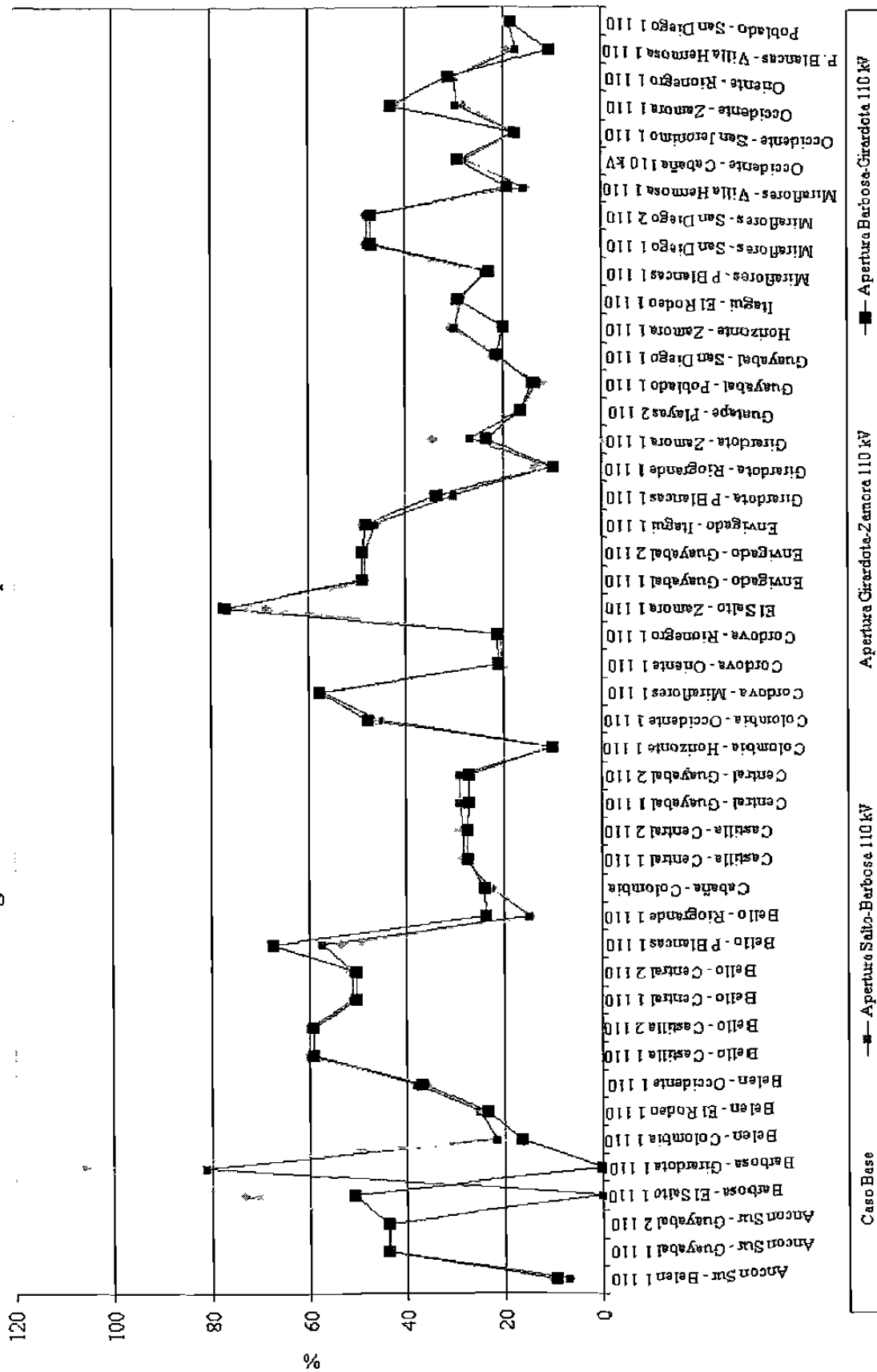


Fig. 5 28. Perfil de carga en líneas de 110 kV con la apertura de líneas

### Carga en líneas de 220 kV con apertura de líneas

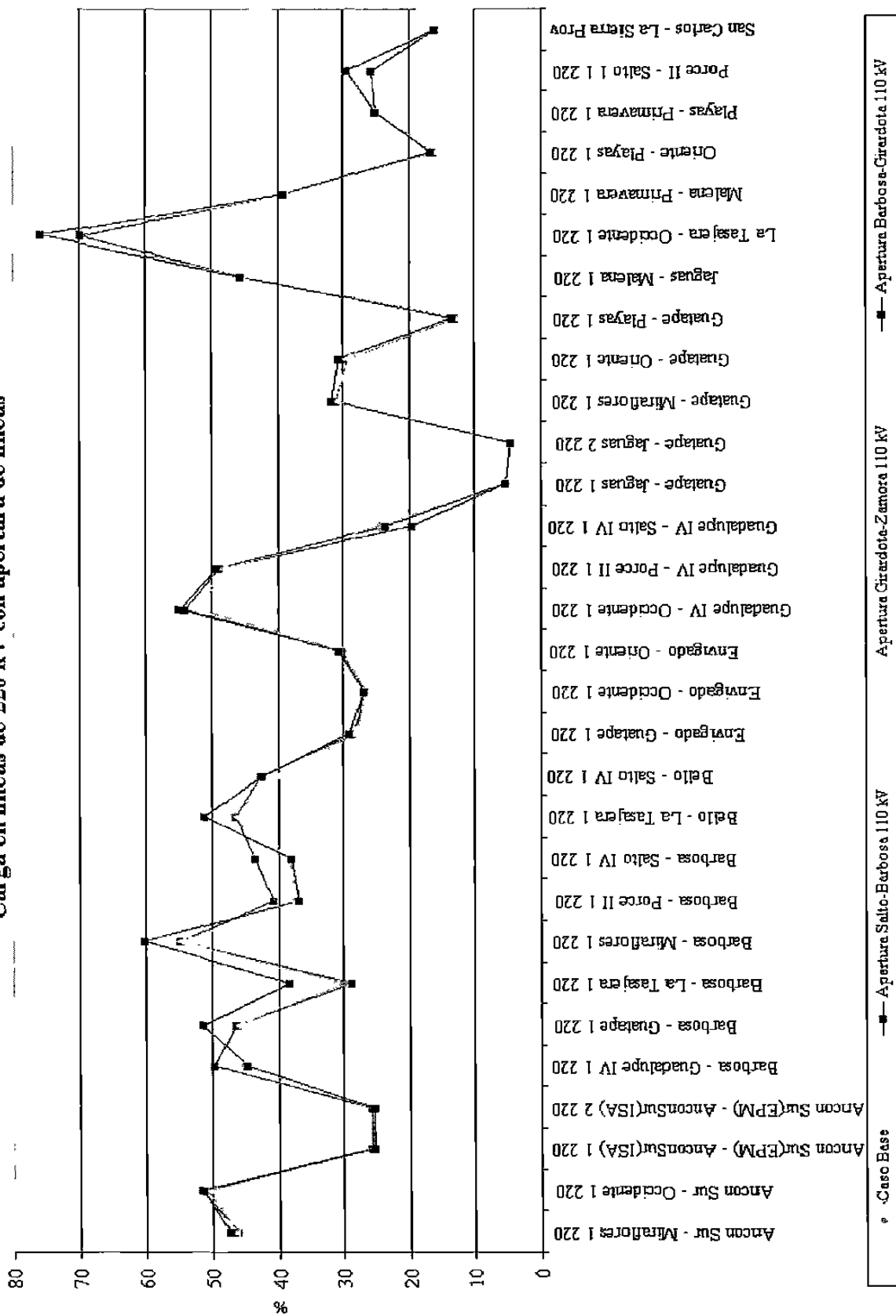


Fig. 5.29. Perfil de carga en líneas de 220 kV con la apertura de líneas

TABLA 5.4. RESUMEN DE SOLUCIONES HALLADAS PARA ELIMINAR LA SOBRECARGA DE LA LÍNEA BARBOSA-GIRARDOTA 110 kV

TIPO	SOLUCIÓN
Ubicación de un TCSC	Barbosa-Miraflores 220 kV
	Salto-Bello 220 kV
	Guadalupe IV-Occidente 220 kV
Ubicación de dos TCSC	Guadalupe IV - Occidente 220 kV y Salto - Zamora 110 kV
	Guadalupe IV - Occidente 220 kV y Tasajera-Occidente 220 kV
	Tasajera-Occidente 220 kV y Barbosa-Miraflores 220 kV
Enlace HVDC back-to-back	Salto - Barbosa 110 kV con flujo hacia Barbosa
	Bello - Riogrande 110 kV con flujo hacia Riogrande
	Girardota - Riogrande 110 kV con flujo hacia Girardota
	Barbosa - Girardota 110 kV con flujo hacia Girardota
Construcción de línea HVDC	Barbosa-Girardota 110 kV con flujo hacia Girardota
	Salto-Zamora 110 kV con flujo hacia Zamora
Apertura de líneas	Línea Girardota-Zamora 110 kV
	Línea Salto-Barbosa 110 kV

La elección de realizar uno u otro proyecto deberá compararse con el proyecto de cambiar conductor en la línea sobrecargada o en otra.

Además de contemplar otros escenarios de generación-demanda y planes de expansión vigentes, deben tenerse en cuenta aspectos como el uso que se desea dar a la red, según las características de cada solución, pues se puede pensar en hacer un uso más intensivo de ciertos corredores de 110 kV o de determinados corredores de 220 kV, a fin de aumentar la confiabilidad operativa. Por ejemplo en Colombia en la red de 220 kV actualmente se penaliza monetariamente la indisponibilidad de equipos. Con enlaces de 220 kV menos cargados, se puede disminuir el riesgo de penalizaciones.

Y desde otra perspectiva el pensar en alargar la vida útil y extender tiempos de mantenimiento, llevaría a pensar en descargar parte de una red que resulte más oneroso su mantenimiento que el de otras porciones de la red.

## CAPÍTULO 6

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 CONCLUSIONES

La desregulación del sector eléctrico ha hecho evidente un problema que ha sido inherente a los SEPs: La congestión.

La congestión de los SEPs se debe a las imperfecciones del mercado y a las imperfecciones de la red conjugados con la regulación sobre normas de seguridad.

El manejo que se dé a esas imperfecciones y a la regulación impactará el costo de la operación y por lo tanto será una medida del beneficio social.

El manejo técnico-regulatorio de la congestión se ha hecho con metodologías que abordan por separado los diversos problemas que lo constituyen y las diversas instancias temporales desde donde puede ser tratado.

La mayoría de las metodologías usadas para tratar los problemas que constituyen la congestión son difíciles de implementar, hacen muchas simplificaciones y entregan datos poco prácticos para el que opera, para el que planea la expansión o para el que planea la operación.

La operación y la planeación además de pragmáticas, deben ser ingeniosas y con visión no solo de la seguridad y la confiabilidad sino que deben tener visión de economía.

La economía resultará de un uso coordinado de los recursos que se tienen para operar el SEP, conjugando además la confiabilidad con la probabilidad.

Los Algoritmos Genéticos pueden ser usados como una herramienta auxiliar en la toma de decisiones en estudios de expansión del sistema, de la planeación de la operación y en la operación misma, entregando soluciones que son operativamente viables.

Los resultados entregados por la metodología propuesta de manejo de la congestión de SEPs son coherentes con la implementación de dichos resultados en el software DIGSILENT usado como verificador de las soluciones encontradas.

## 6.2 APORTACIONES

Se ha propuesto una metodología integral de manejo de la congestión de SEPs que presenta las siguientes ventajas:

- Permite tratar gran variedad de problemas con la misma estructura
- Entrega soluciones concretas y viables operativamente, que cumplen las restricciones definidas en la función de desempeño
- La función de desempeño al tener un máximo conocido, permite detener la búsqueda aunque no se haya cumplido el número de generaciones, lo cual es una ventaja para aplicaciones donde es crítico el tiempo para la toma de decisiones


- La función de desempeño conserva el máximo independiente del número de restricciones
- Al aumentar el número de restricciones se cierra el espacio solución
- Es posible encontrar nichos de soluciones a partir de almacenar los valores que cumplen el máximo sin detener el proceso hasta que se cumpla el número de generaciones

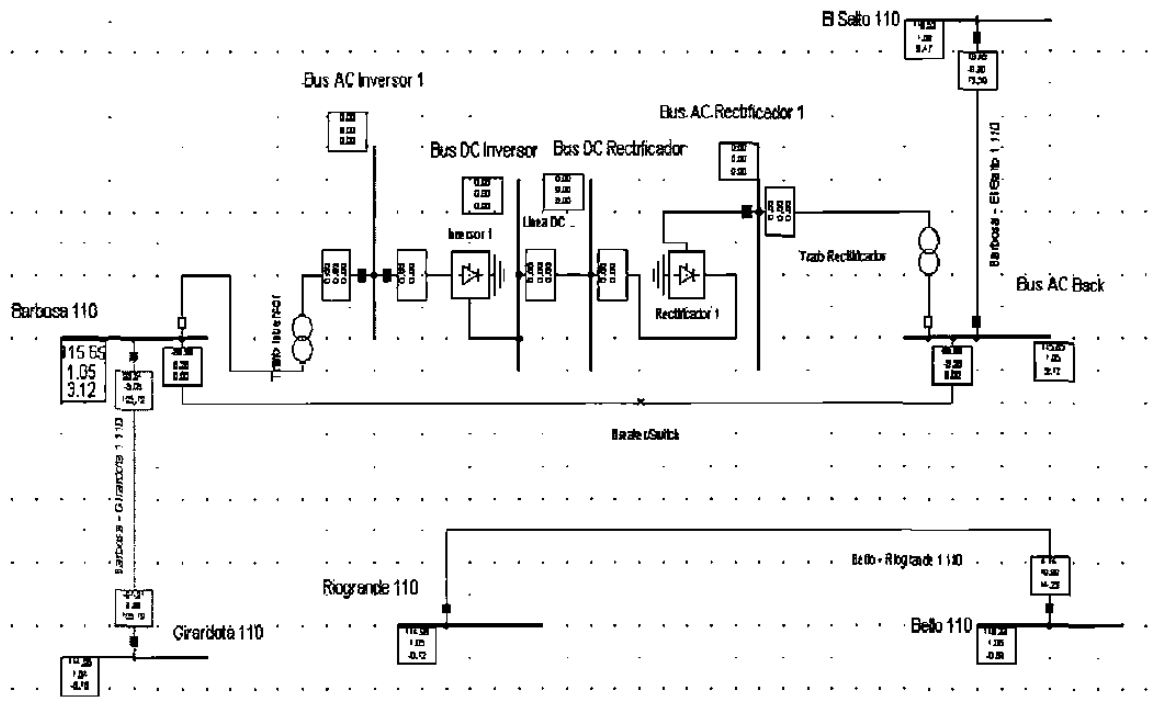
### 6.3 RECOMENDACIONES PARA FUTURAS INVESTIGACIONES


- Estudiar estructuras de hardware y software en paralelo que permitan aumentar el rendimiento de los AGs
- Estudiar en detalle la influencia de los parámetros de los AGs en su velocidad de optimización:
  - ◆ Tipos de selección
  - ◆ Probabilidad de cruce y mutación: Fija o variable
- Posibilidad de utilizar la metodología propuesta en el problema del Flujo Optimo de Potencia (OPF)
- Posibilidad de enlazar la metodología con sistemas en tiempo real como herramientas auxiliares en la toma de decisiones en salas de operación

## ANEXO A

RESULTADOS EN DIGSILENT PARA  
LAS OPCIONES EN BACK-TO-BACK

	Descongestion de la línea Barbosa-Girardota, 110 kV	Project: HVDC
	Enlace HVDC back-to-back en línea Salto-Barbosa 110 kV	Graphic: HVDC 1
	Enlace con 30 MW	Date: 10/16/2003
PowerFactory 12.1.192		Annex:



	Descongestion de la línea Barbosa-Girardota 110 kV	Project: HVDC
	Enlace HVDC back-to-back en línea Salto-Barbosa 110 kV	Graphic: HVDC 1
	Enlace con 30 MW	Date: 10/16/2003
PowerFactory 12.1.192		Annex:

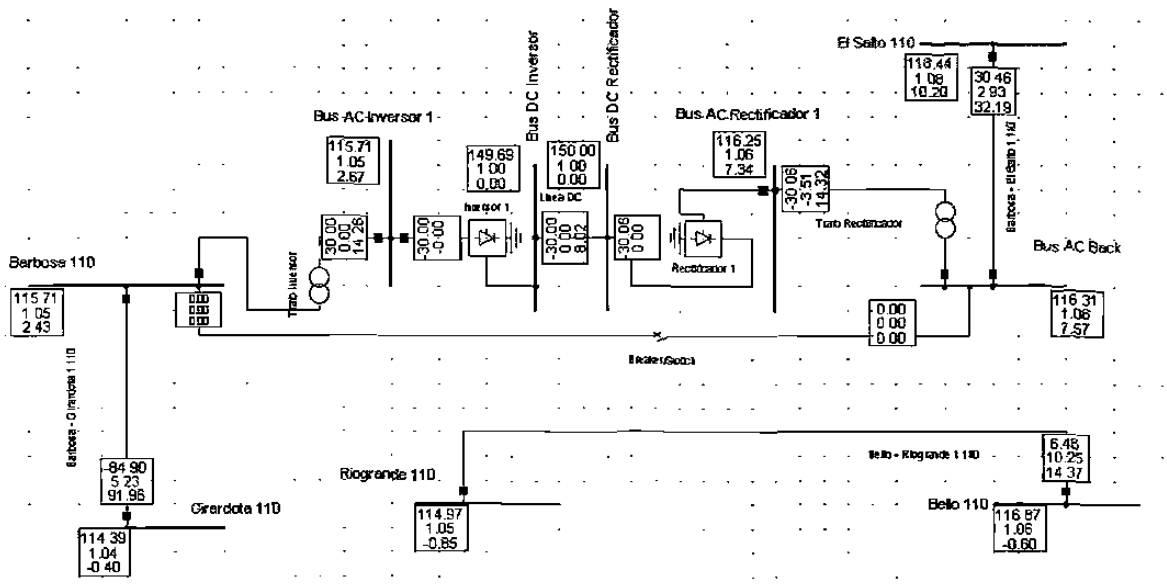


Fig. A.1.



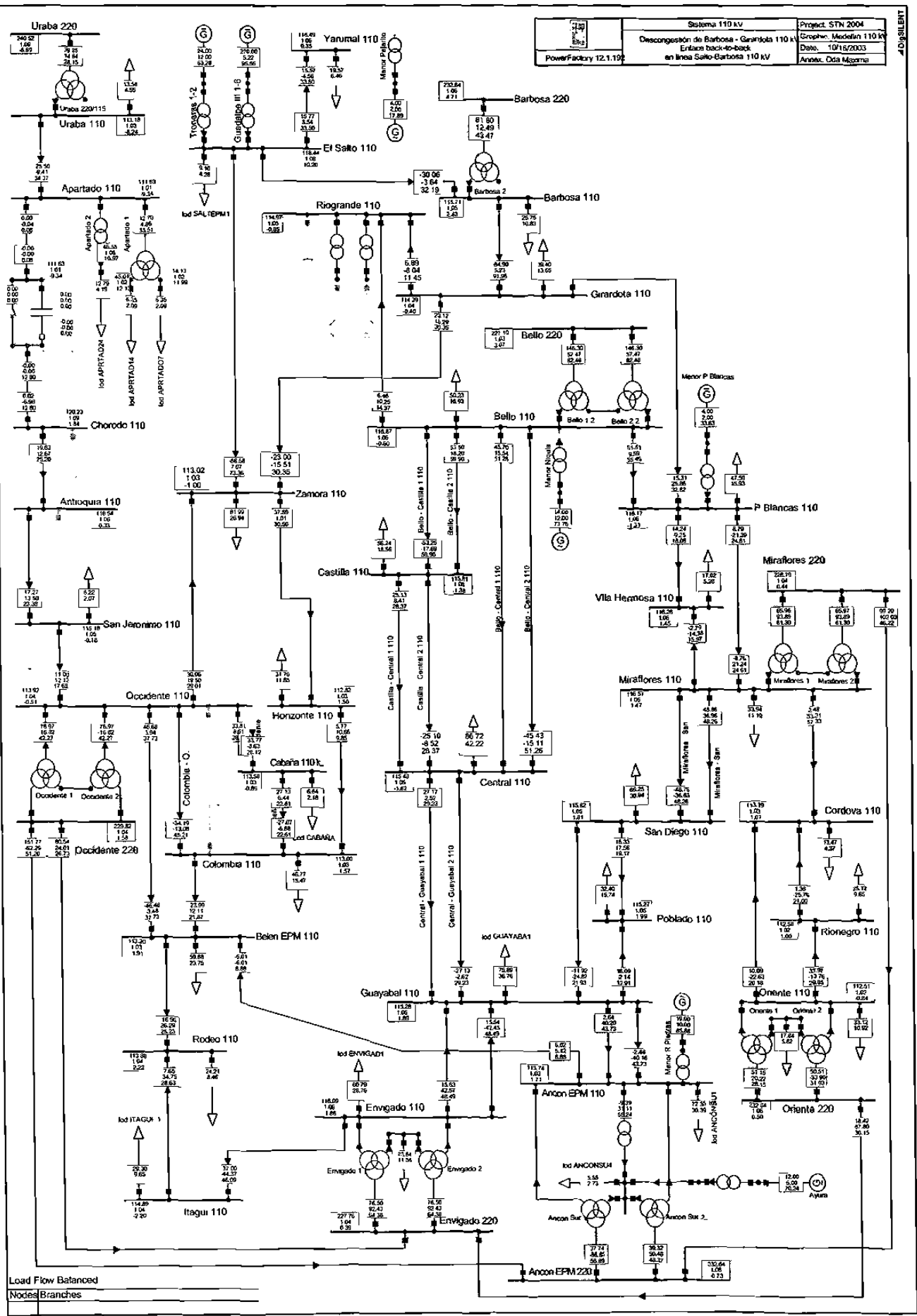


Fig. A.2.

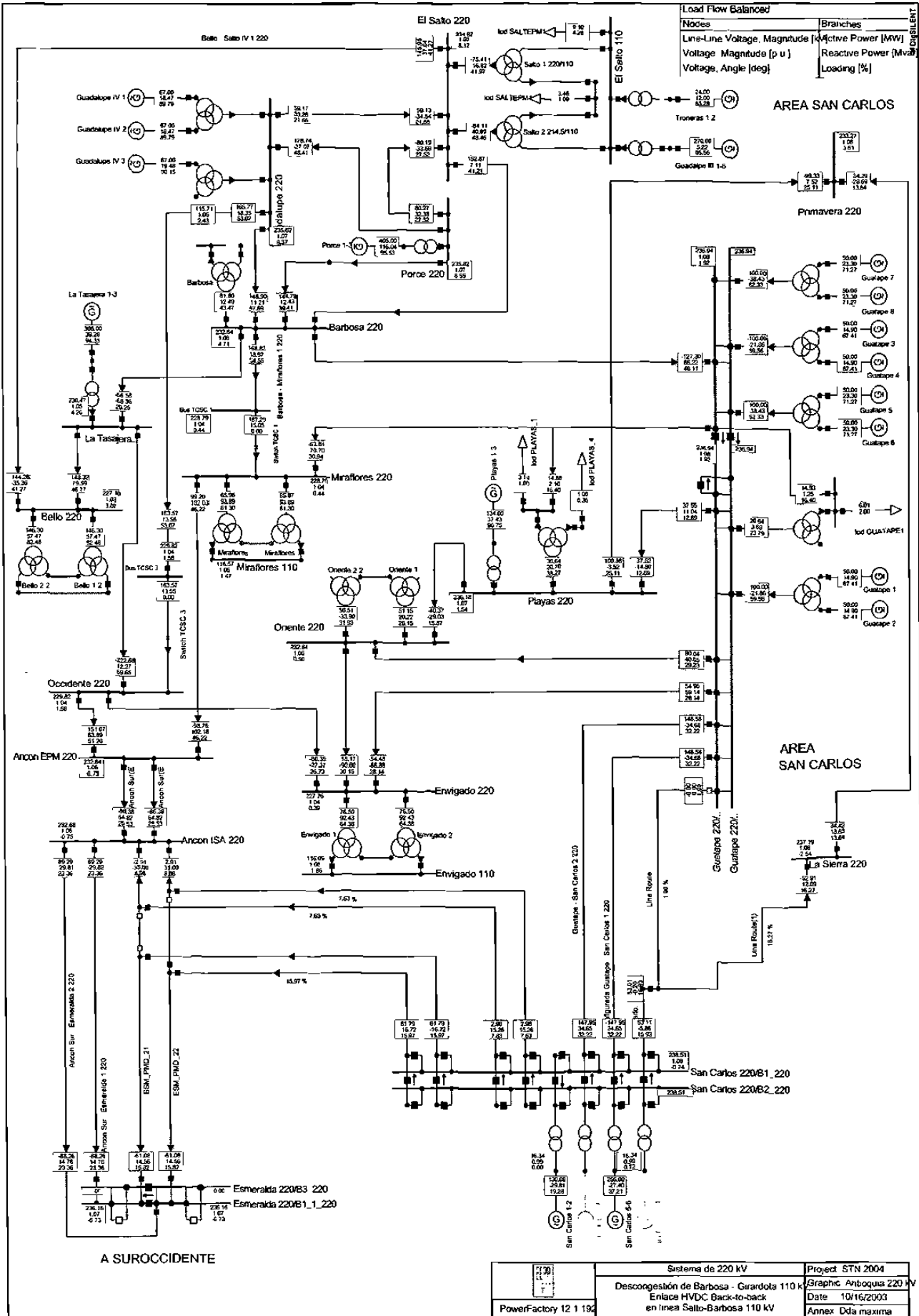


Fig. A.3.

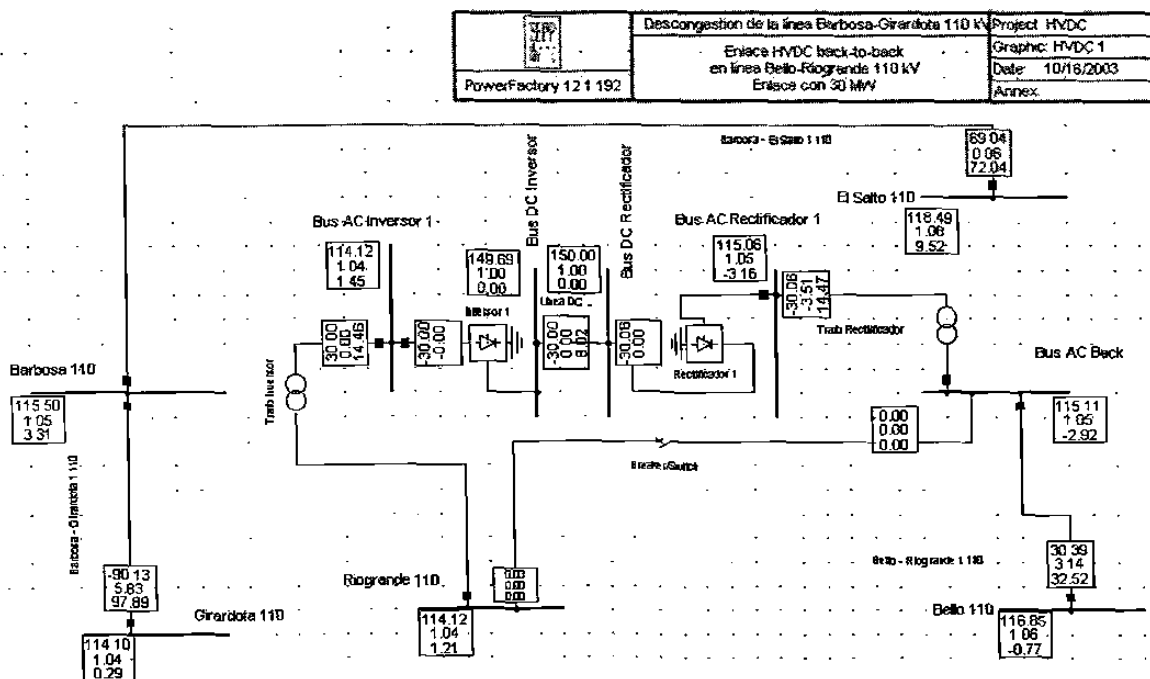
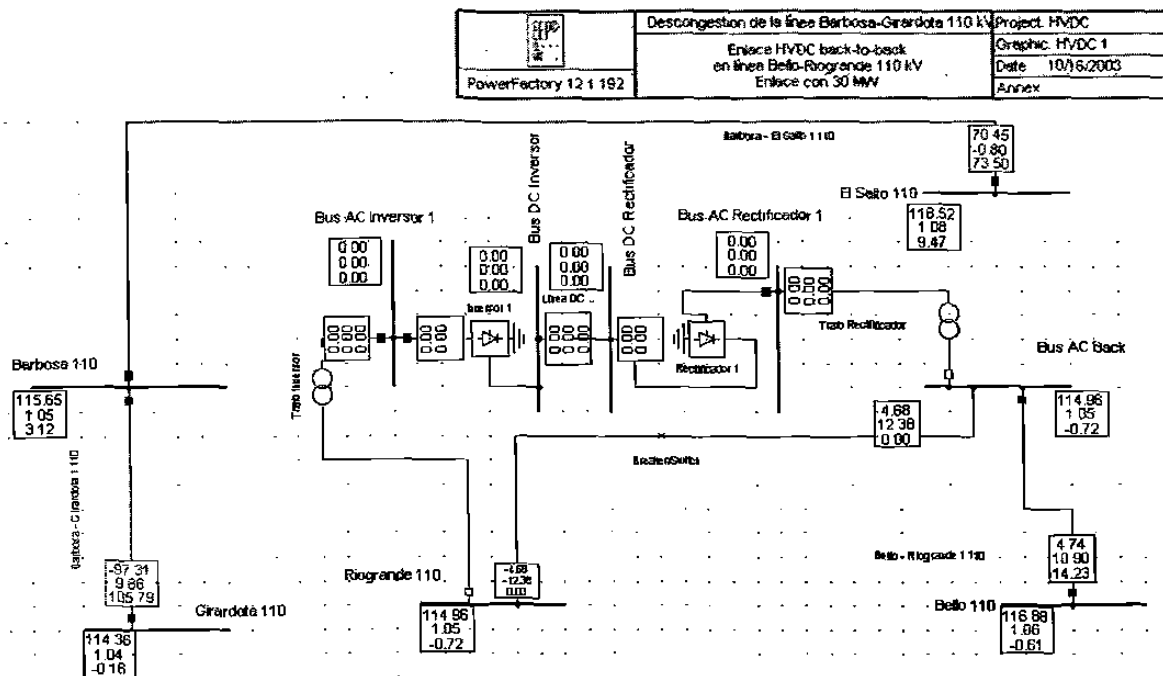
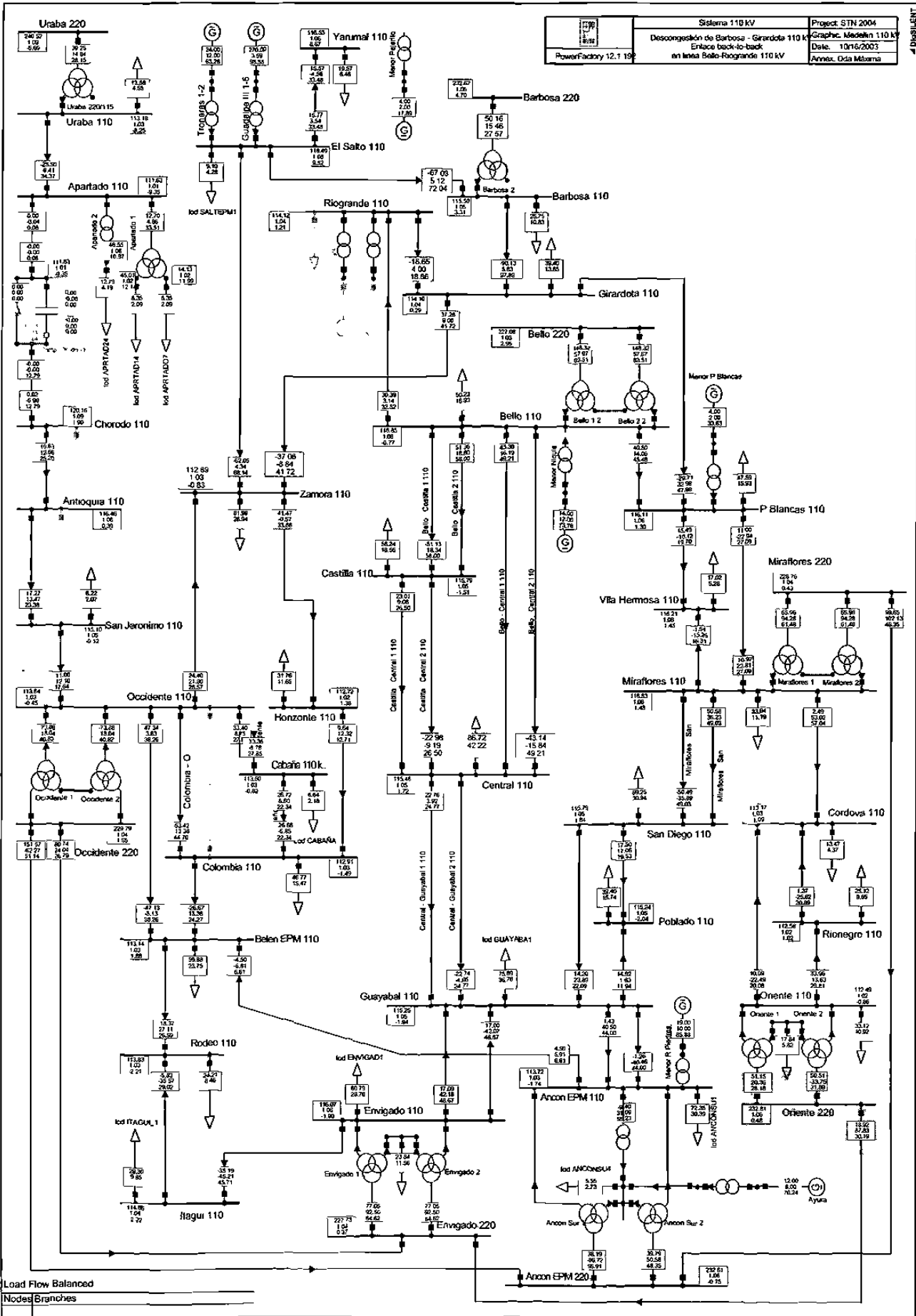


Fig. A.4.



PowerFactory 12.1.19	Sistema 110 kV	Project: STN 2004
	Desconexión de Barbosa - Girardota 110 kV	Graphic: Medellín 110 kV
	Enlace back-to-back en línea Bello-Rogrande 110 kV	Date: 10/16/2003
		Anexo: Oda Máxima

Load Flow Balanced  
Nodes Branches

Fig. A.5.

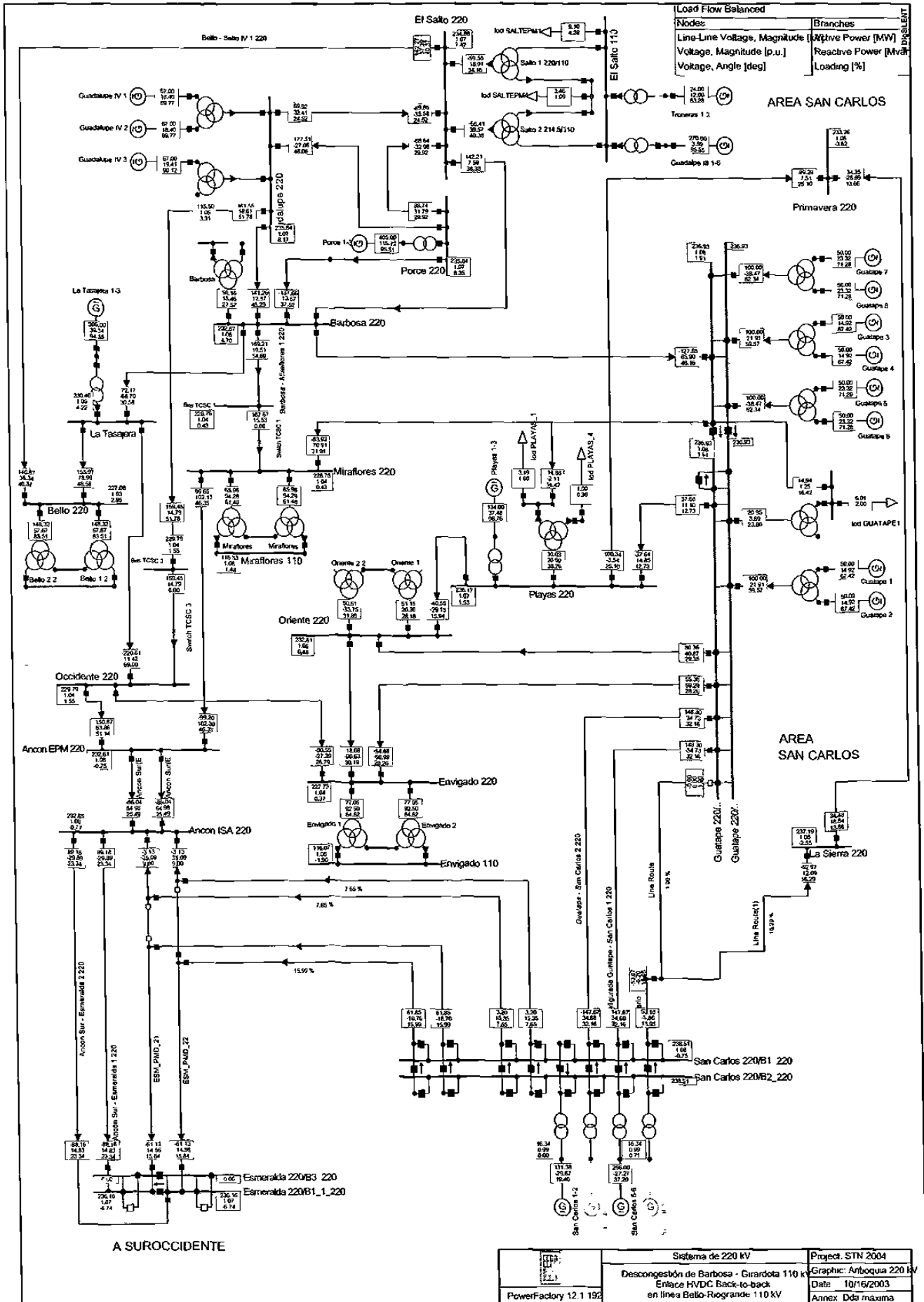


Fig. A.6.

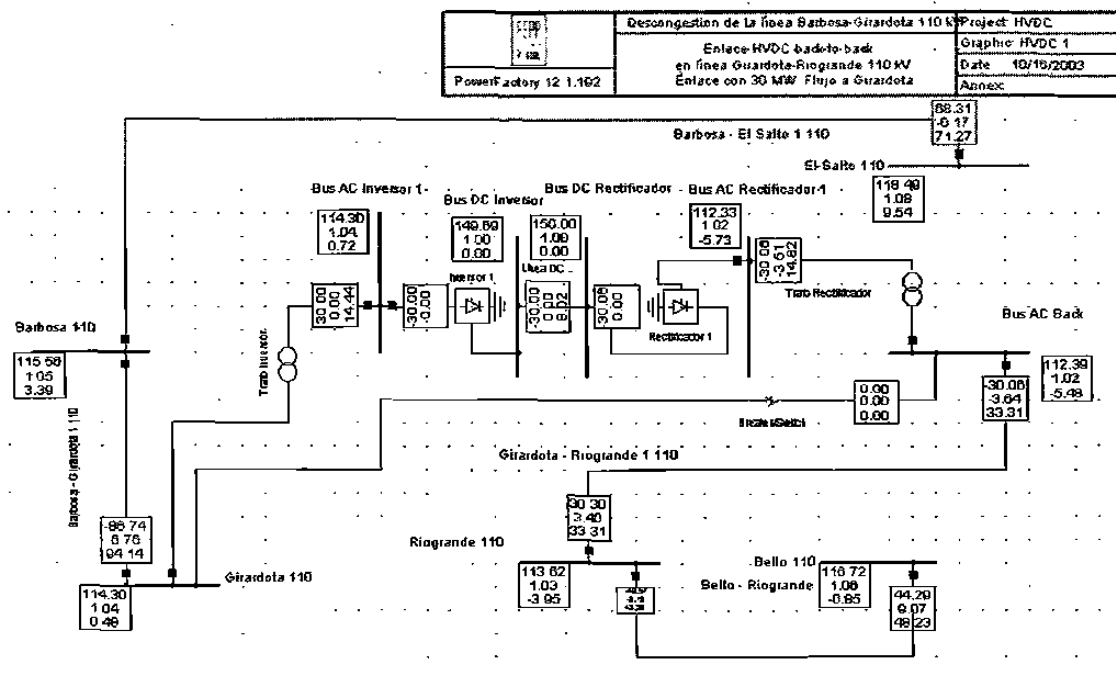
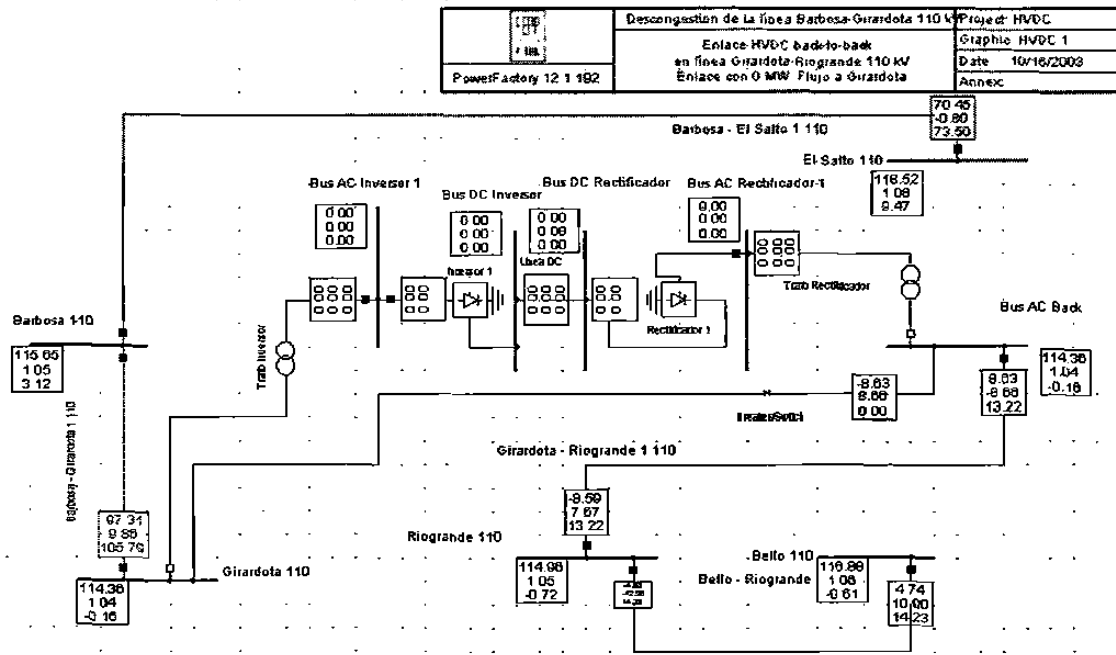


Fig. A.7.

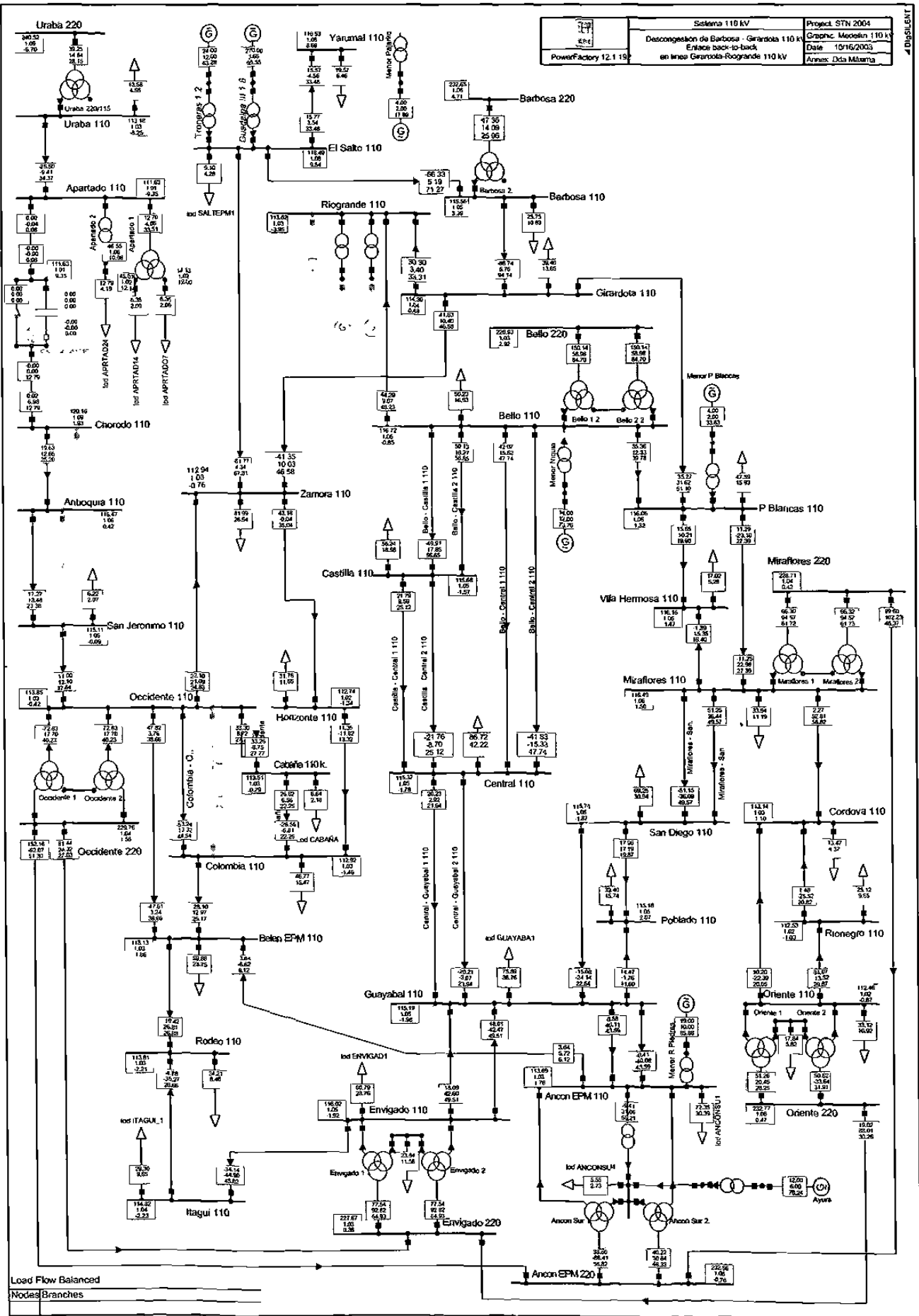


Fig. A.8.

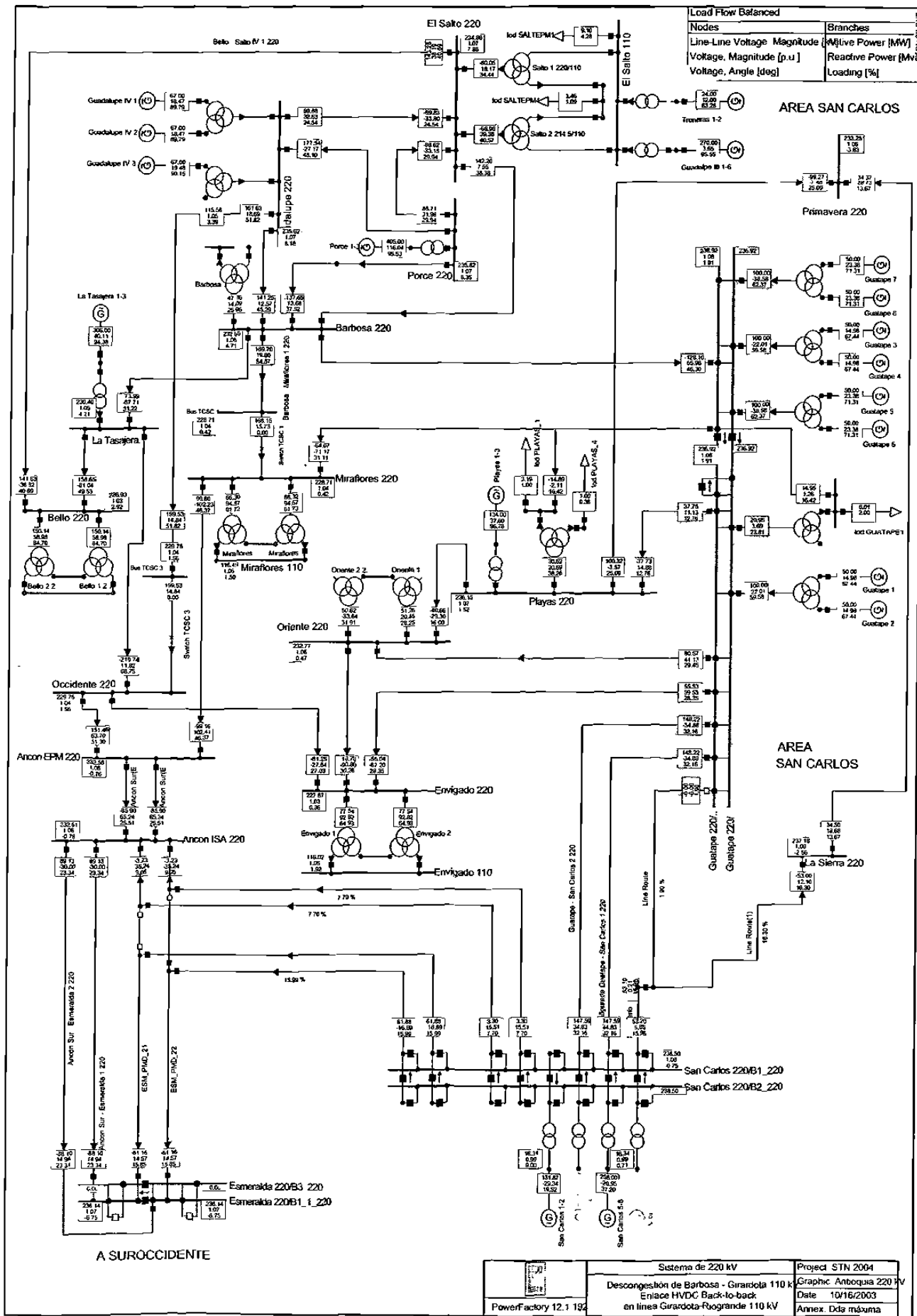


Fig. A.9



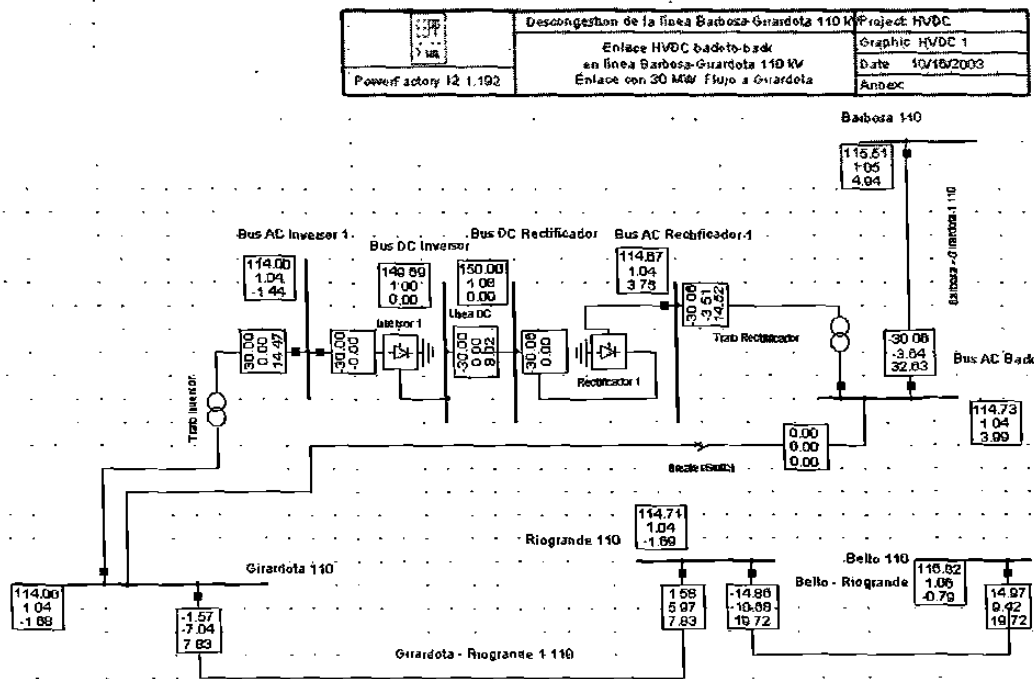
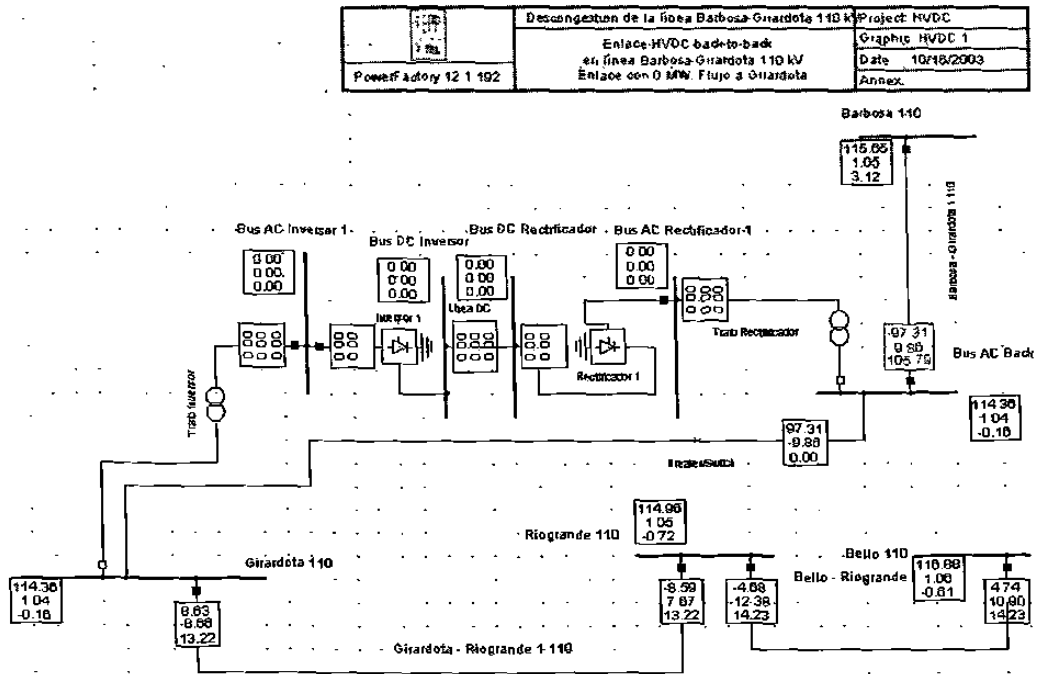


Fig. A.10.

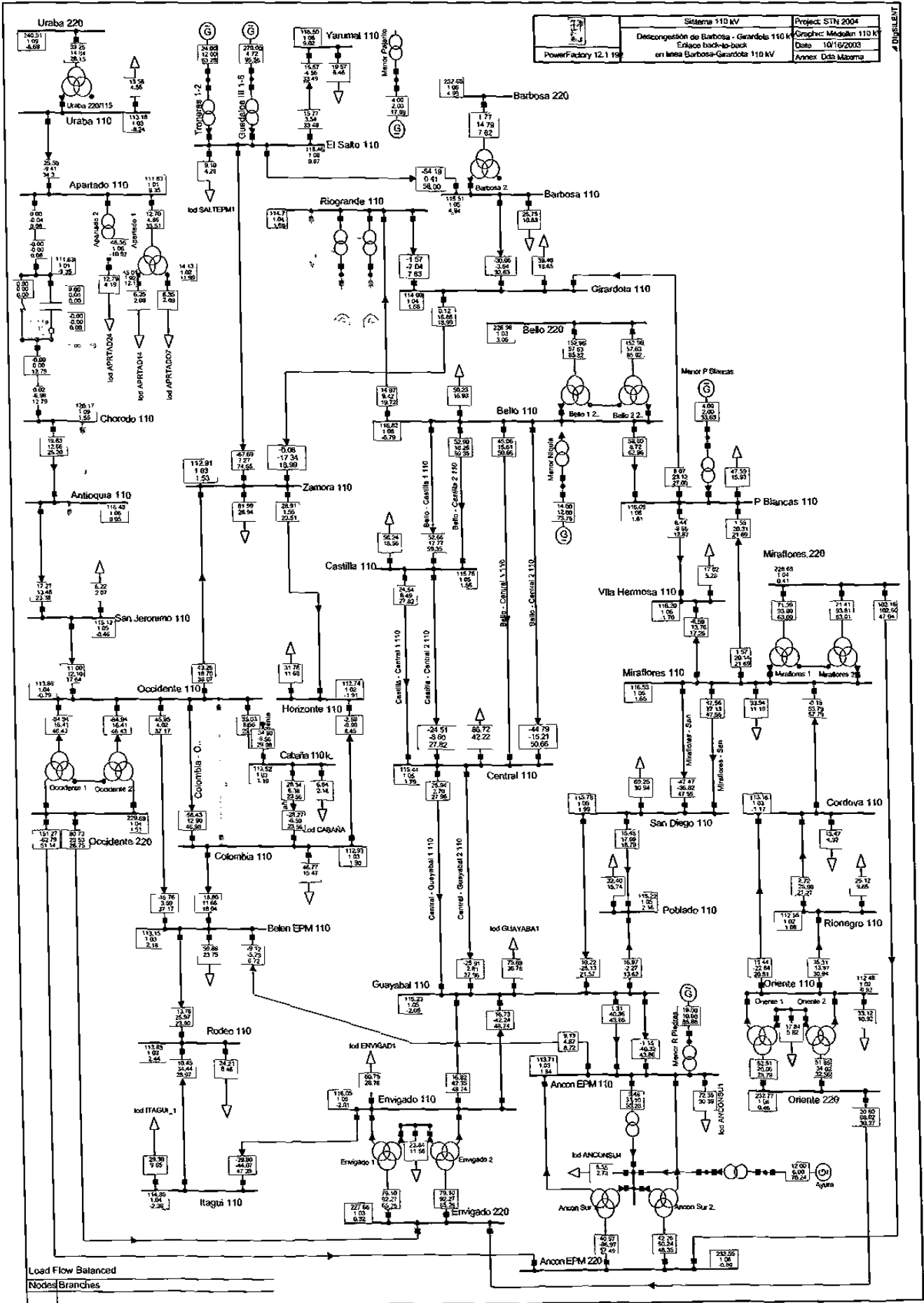


Fig. A.11.



## ANEXO B

RESULTADOS EN DIGSILENT PARA  
LAS OPCIONES DE ENLACE  
HVDC EN PARALELO

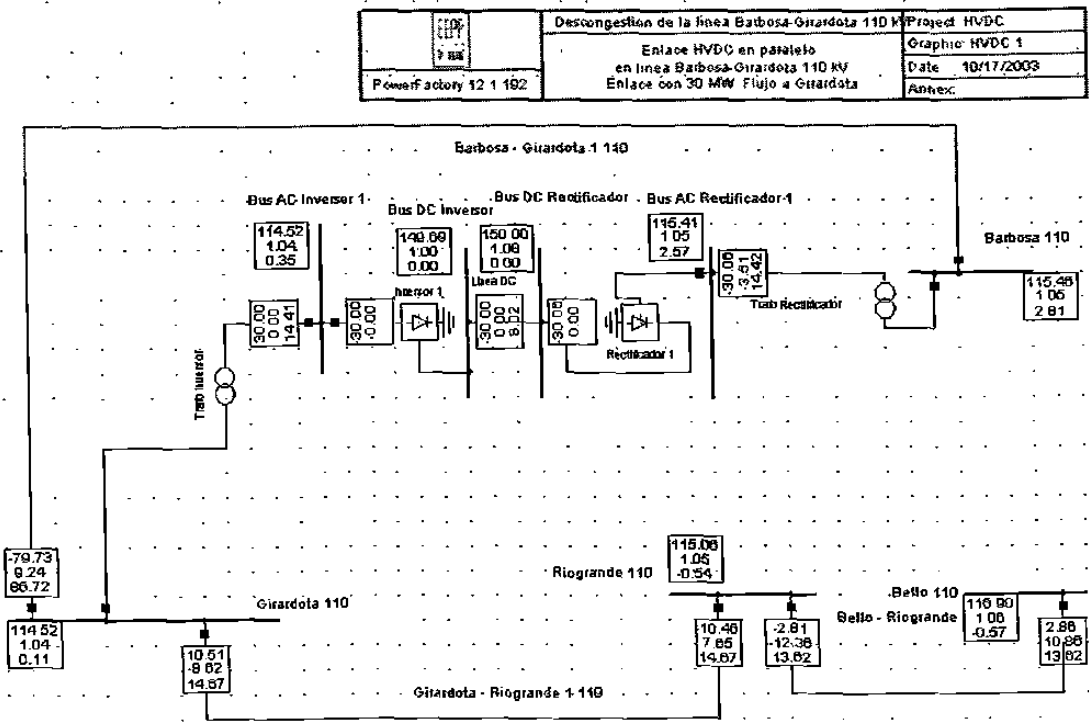
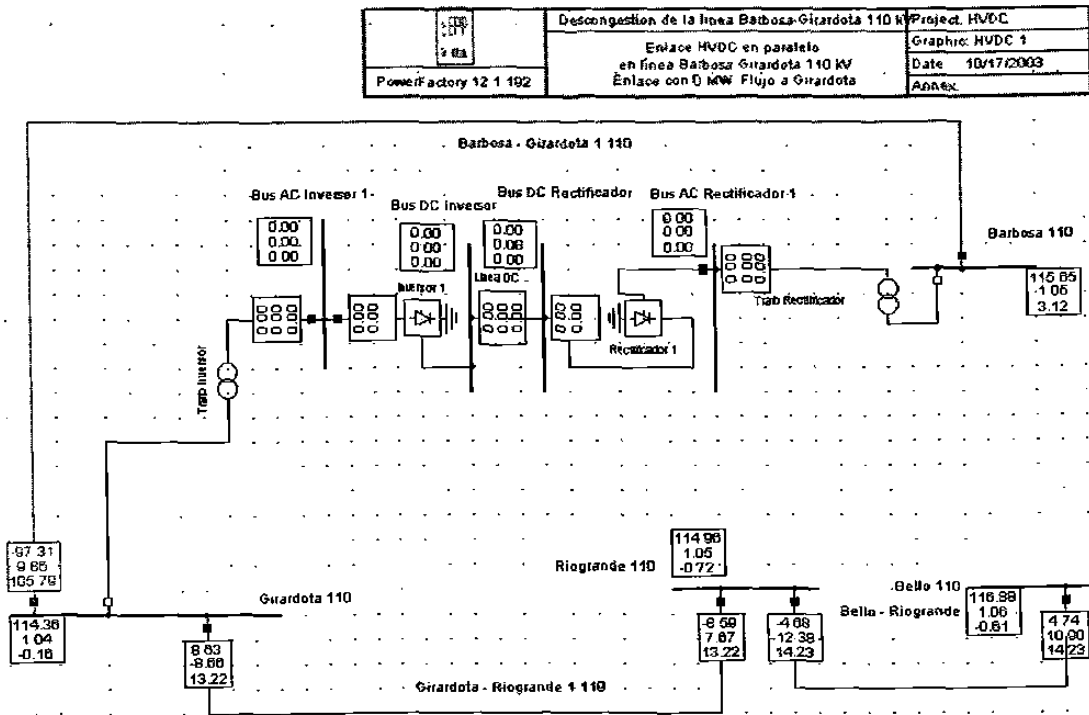


Fig. B.1.

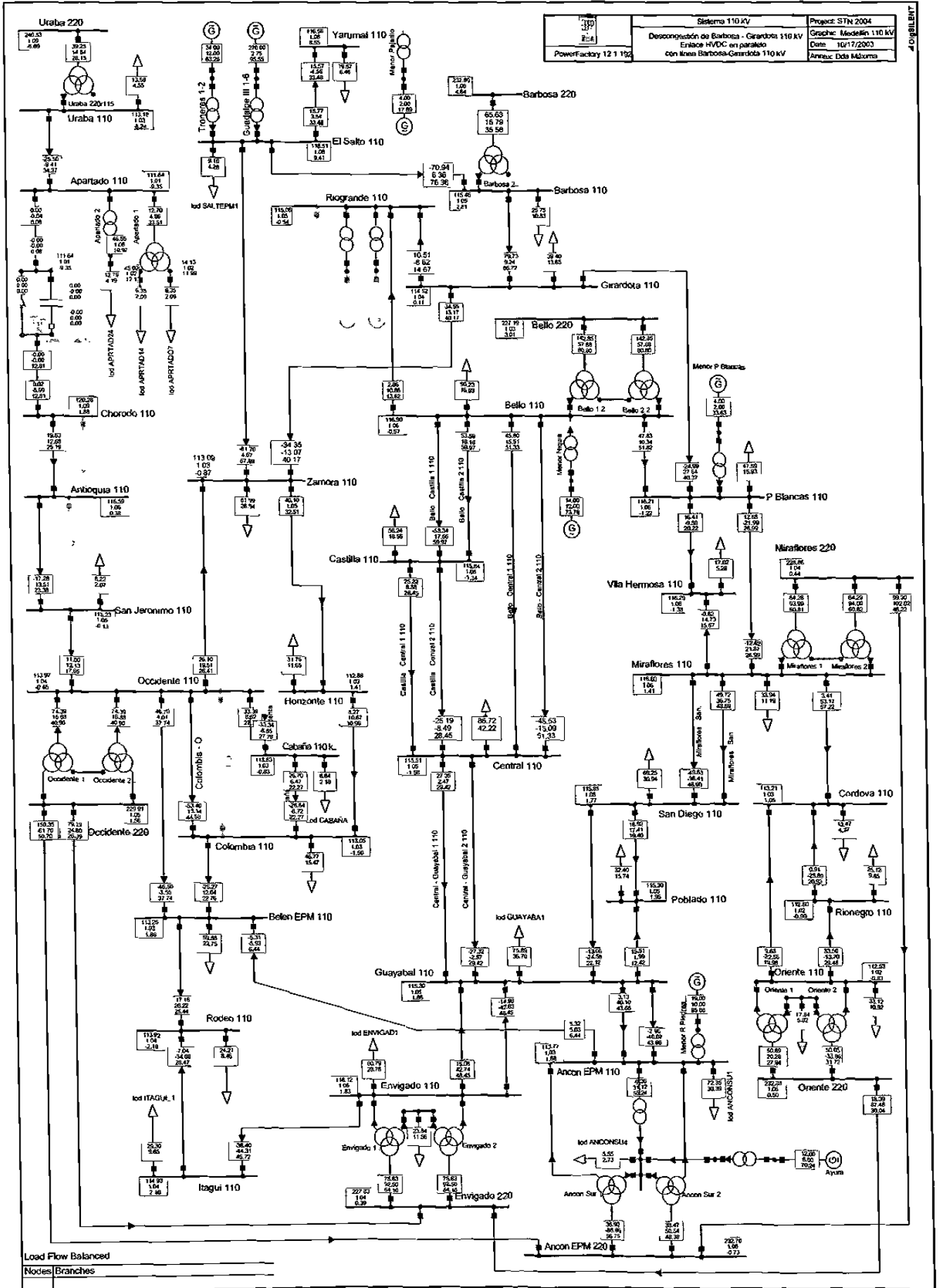


Fig. B.2.

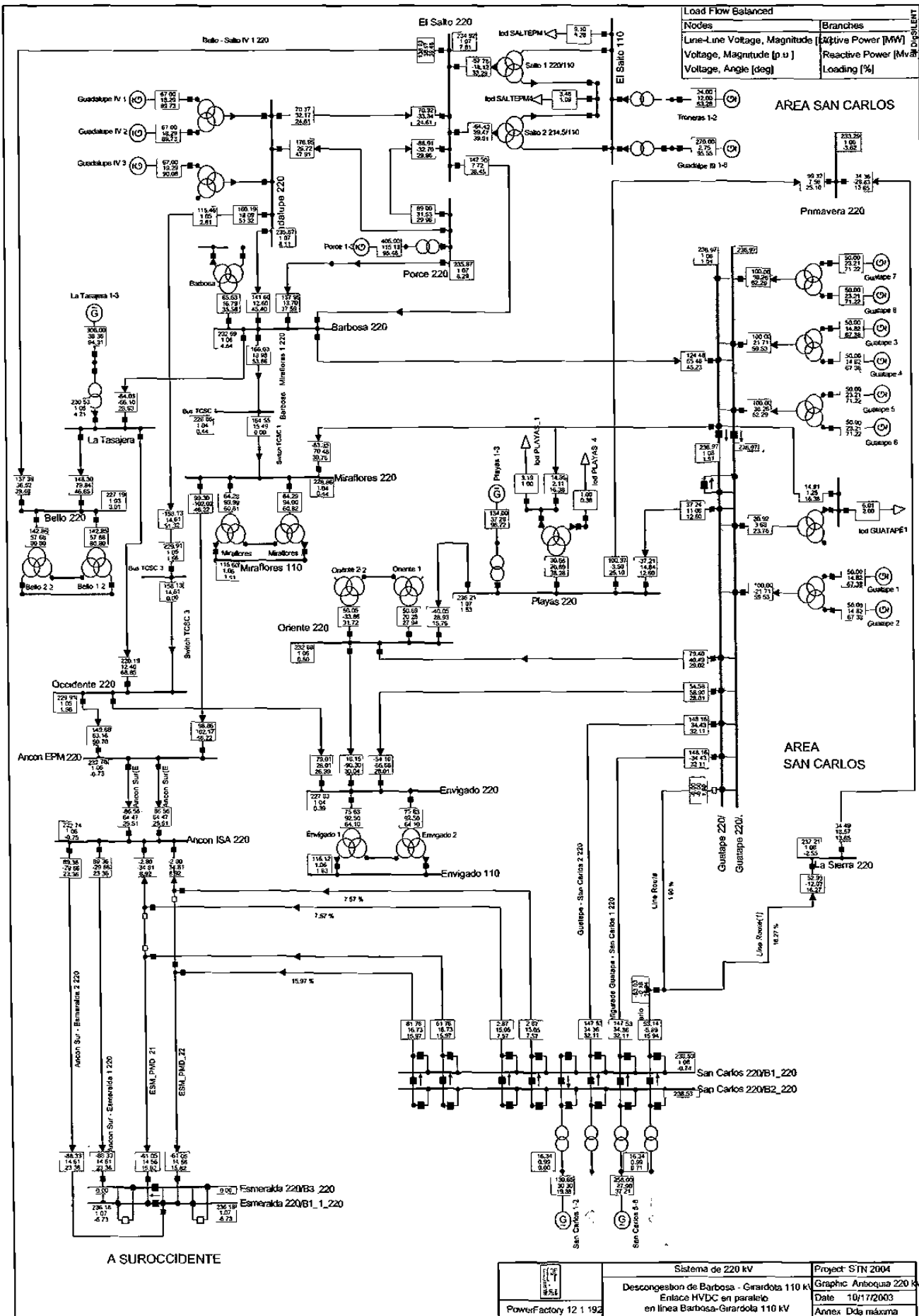

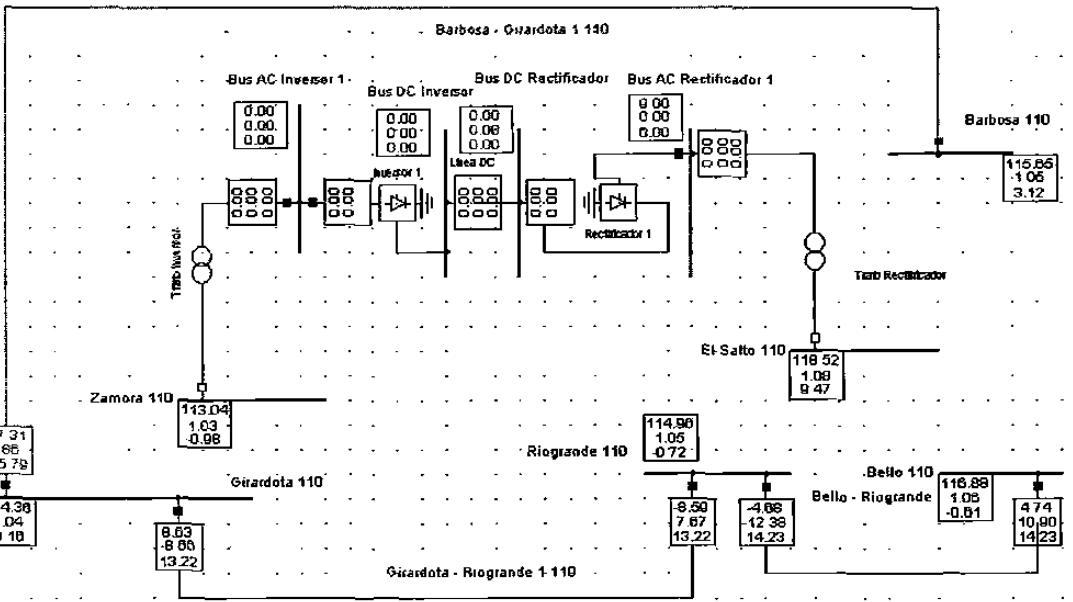



Fig. B.3.

	Sistema de 220 kV	Project S/IN 2004
	Descongestion de Barbosa - Gardota 110 kV	Graphic: Antioquia 220 kV
	Entace HVDC en paralelo	Date 10/17/2003
	en línea Barbosa-Gardota 110 kV	Annex Dda máxima

 PowerFactory 12.1.192	Descongestion de la línea Barbosa-Girardota 110 kV Enlace HVDC en paralelo en línea Salto-Zamora 110 kV Enlace con 0 MW	Project: HVDC Graphic: HVDC 1 Date: 10/17/2003 Annex:



 PowerFactory 12.1.192	Descongestion de la línea Barbosa-Girardota 110 kV Enlace HVDC en paralelo en línea Salto-Zamora 110 kV Enlace con 35 MW	Project: HVDC Graphic: HVDC 1 Date: 10/17/2003 Annex:

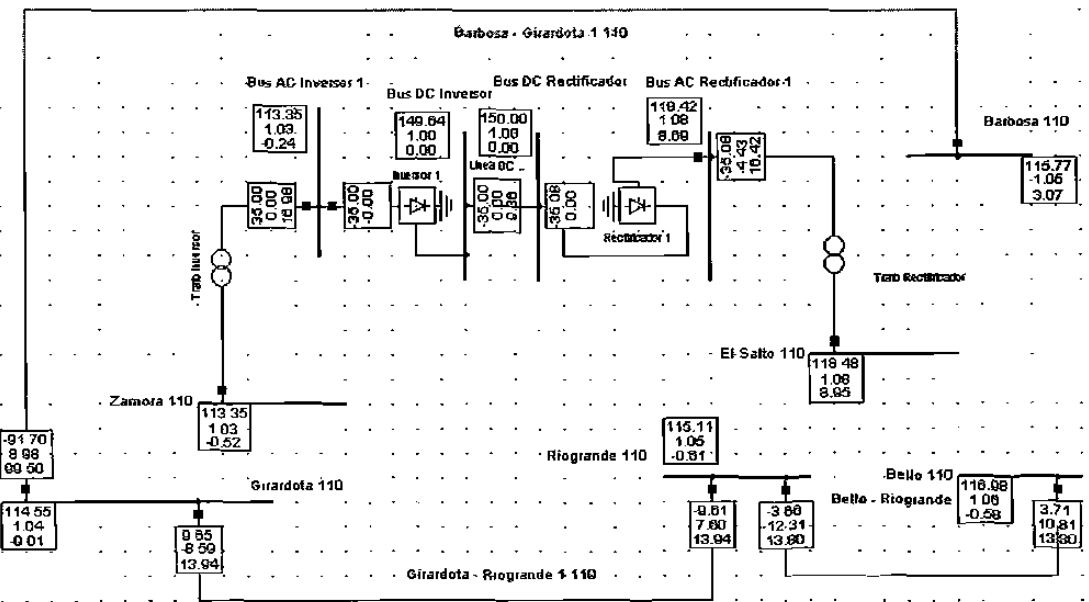


Fig. B.4.



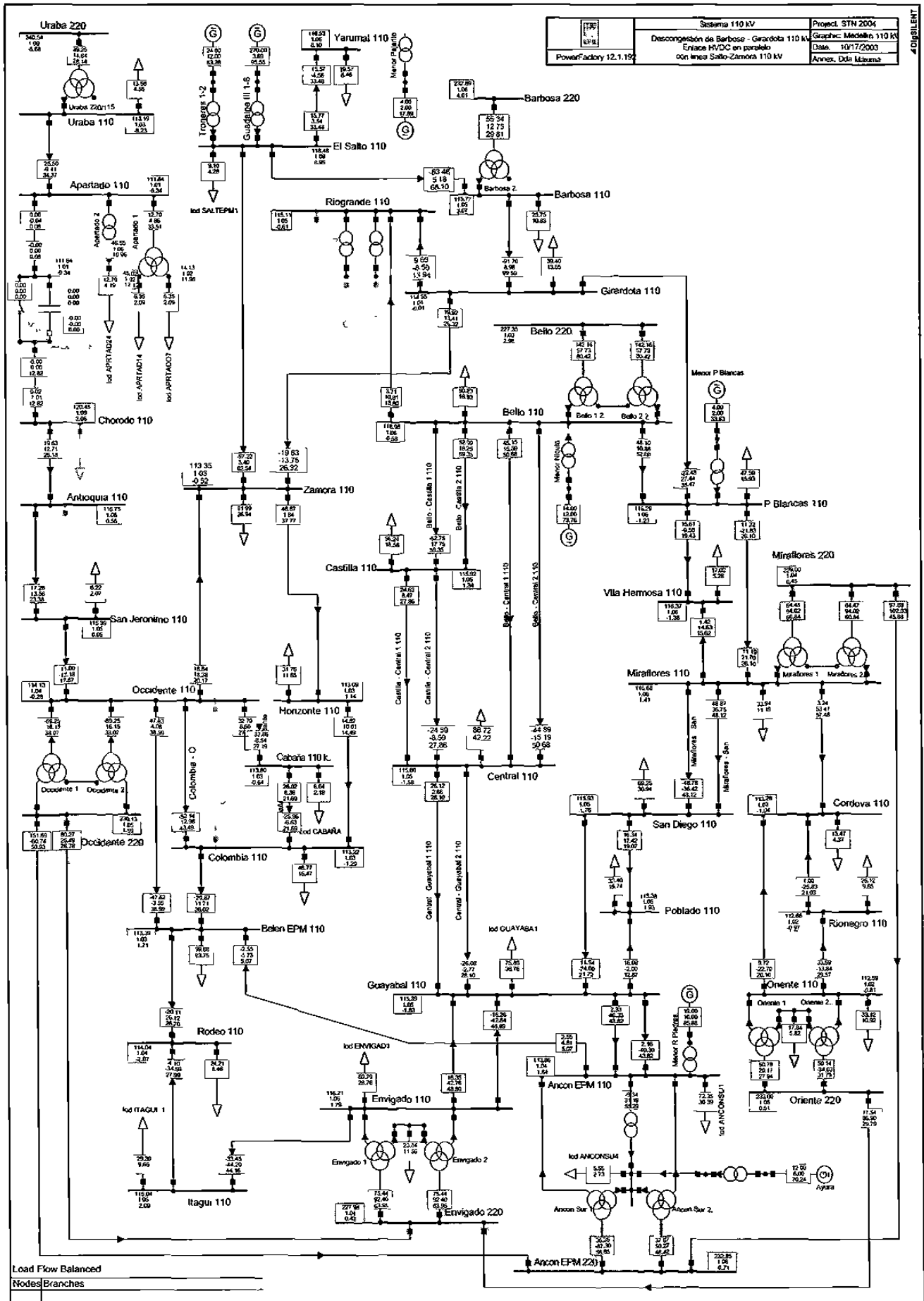


Fig. B.5.

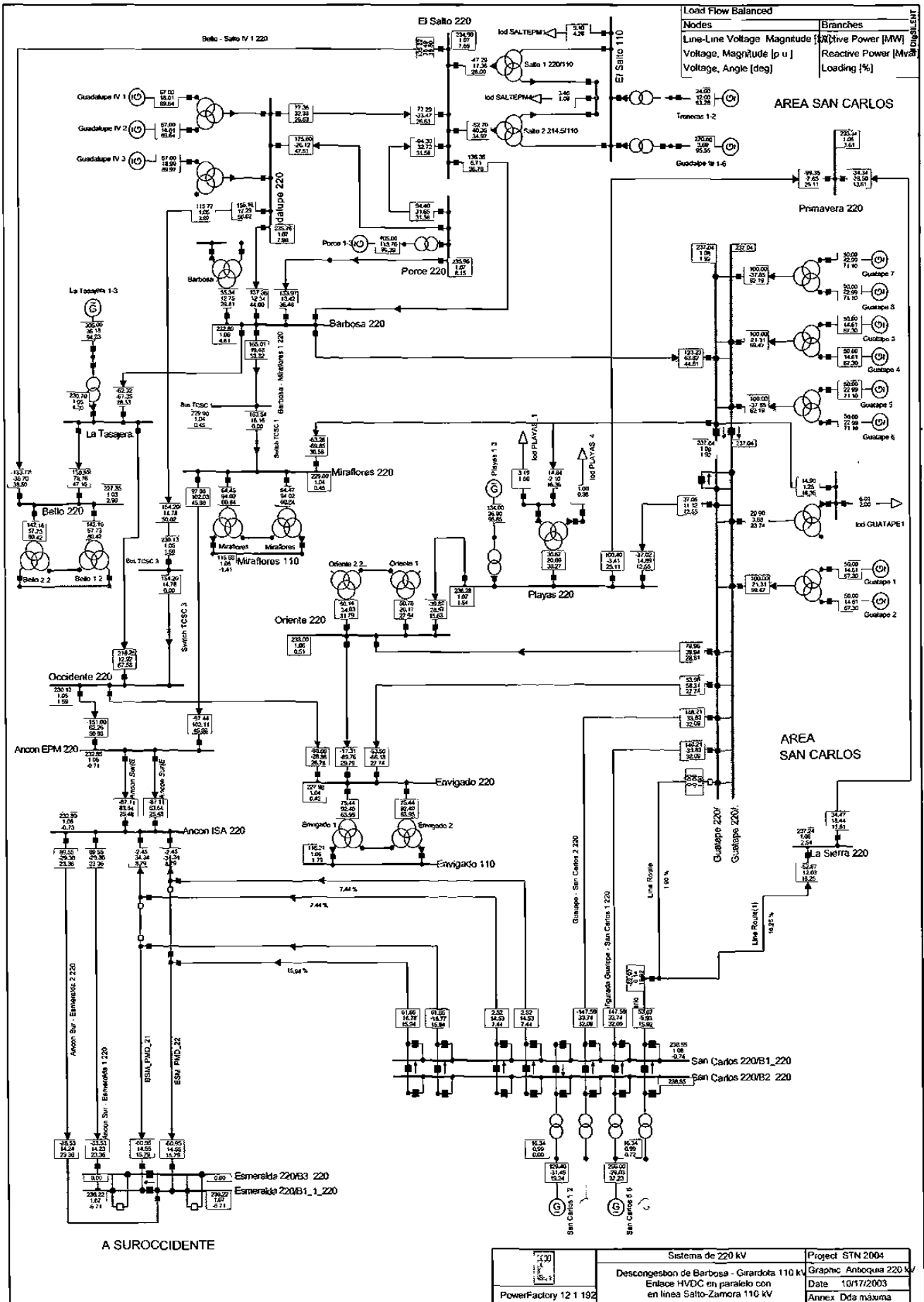


Fig. B.6.

