

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



INCLUSIÓN DE RESTRICCIONES AMBIENTALES EN EL DESPACHO ECONÓMICO PARA LA OPERACIÓN DE SISTEMAS DE POTENCIA

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

PRESENTADO POR:

GROVER CESAR MALLQUI RODRIGUEZ

**PROMOCIÓN
2001 - II**

**LIMA – PERÚ
2011**

**INCLUSIÓN DE RESTRICCIONES AMBIENTALES EN EL
DESPACHO ECONÓMICO PARA LA OPERACIÓN DE
SISTEMAS DE POTENCIA**

Agradezco a mis padres, quienes con sus consejos y sacrificios son los artífices del cumplimiento de este objetivo en mi vida profesional.

A toda mi familia, por su comprensión y apoyo desinteresado.

A mis profesores, por los conocimientos compartidos y a mi Alma Mater, la Universidad Nacional de Ingeniería, por acogerme como uno de sus hijos.

SUMARIO

En las décadas pasadas los sistemas eléctricos de potencia crecieron en tamaño y en complejidad a medida que aumentaba el número de interconexiones, así diversos problemas técnicos forzaron a las empresas de transmisión y generación eléctrica a operar sus sistemas eléctricos en forma eficiente y económica. El despacho económico es un estudio importante en el planeamiento de la operación de sistemas de potencia y forma parte de las políticas energéticas necesarias para el desarrollo de los actuales mercados eléctricos.

Una de las herramientas más utilizadas para análisis de despacho económico es el flujo de potencia óptimo, el cual se constituye como un problema de optimización no lineal estático que estima los ajustes óptimos de diversas variables eléctricas teniendo en cuenta que deben ser cumplidas diversas condiciones de operación y límites de algunas variables.

En el presente informe se analiza el despacho económico usado en la operación de sistemas de potencia de características térmicas llevando en cuenta restricciones ambientales. Estas restricciones representarán el impacto ambiental ocasionado por la emisión de contaminantes (específicamente de CO₂) al medio ambiente, las cuales pueden ser modeladas e incluidas en una formulación de despacho económico lineal. La formulación resultante es un despacho económico ambiental que incluye restricciones operacionales como los límites de sobrecarga en líneas y límites de generación activa, además considera la opción de corte de carga para enfrentar aspectos de infactibilidad de la operación. Como parte del análisis, dentro de la metodología serán resaltados tópicos como: la formulación matemática (problema de optimización), el flujo de carga DC (modelo de la red eléctrica lineal) y técnicas de resolución de problemas de optimización lineal; además serán interpretados los resultados de la aplicación del programa computacional a sistemas de prueba conocidos en la literatura (como un sistema de 3 barras) así como también a sistemas reales como el Sistema Eléctrico Interconectado Nacional Peruano (SEIN 512 barras) para la operación en el 2010.

ÍNDICE

PROLOGO	1.
CAPÍTULO I.....	2
INTRODUCCIÓN.....	2
1.1 Planteamiento de ingeniería del problema.....	2
1.1.1. Despacho económico lineal	2
1.1.2. Restricciones ambientales	3
1.2 Objetivos	3
1.3 Alcances.....	3
CAPÍTULO II.....	5
MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL.....	5
2.1 Estructura de los sistemas eléctricos de potencia.....	5
2.2 Modelo de componentes de sistemas de potencia.....	6
2.2.1 Líneas de transmisión.....	7
2.2.2 Transformadores en fase	8
2.2.3 Matriz admitancia de barra	9
2.3 Formulación matemática de flujo de potencia.....	9
2.3.1 Flujo de potencia en líneas de transmisión	10
2.3.2 Flujo de potencia en transformadores en fase.....	10
2.4 Flujo de potencia no lineal o CA	11
2.4.1 Aspectos generales.....	11
2.4.2 Formulación del problema	11
2.4.3 Formulación matricial.....	13
2.4.4 Solución del problema de flujo de potencia no lineal.....	15
2.5 Flujo de potencia lineal	16
2.5.1 Linealización.....	16
2.5.2 Formulación matricial.....	17
2.5.3 Potencia de la barra de referencia	18
2.5.4 Características del método de flujo de potencia lineal.....	18

2.5.5	Ejemplo aplicativo – flujo de potencia CC del sistema 3 barras	18
CAPÍTULO III		21
DESPACHO ECONOMICO CON RESTRICCIONES AMBIENTALES		21
3.1	Programación lineal	21
3.1.1	Formulación matemática del problema de programación lineal.....	21
3.1.2	Formulaciones equivalentes.....	22
3.1.3	Ejemplo aplicativo – programación lineal usando representación gráfica.....	24
3.1.4	Método SIMPLEX.....	25
3.2	Flujo de potencia óptimo.....	27
3.2.1	Formulación matemática no lineal.....	28
3.2.2	Formulación matemática lineal.....	29
3.3	Despacho económico lineal	30
3.3.1	Costos de producción.....	30
3.3.2	Definición de despacho económico	32
3.3.3	Formulación de despacho económico lineal en FPO.....	33
3.3.4	Ejemplo aplicativo 1 – despacho económico sin congestión – sistema 3 barras..	34
3.3.5	Ejemplo aplicativo 2 – despacho económico con congestión – sistema 3 barras..	37
3.4	Despacho económico lineal con restricciones ambientales	39
3.4.1	Formulación FPO del despacho ambiental	40
3.4.2	Ejemplo aplicativo 3 – despacho ambiental – sistema 3 barras.....	41
3.4.3	Formulación FPO con restricciones ambientales.....	43
3.4.4	Ejemplo aplicativo 4 – despacho económico con restricciones ambientales – sistema 3 barras.....	45
CAPÍTULO IV		48
ANÁLISIS DE DESPACHO ECONÓMICO CON RESTRICCIONES AMBIENTALES APLICADO AL SEIN.....		48
4.1	Sistema de potencia SEIN 2010.....	48
4.1.1	Datos de demanda	49
4.1.2	Datos de ramas.....	49
4.1.3	Datos de generación para despacho económico y ambiental.....	53
4.2	Despacho económico	55
4.2.1	Resultados para operación normal.....	55
4.2.2	Resultados para operación en alerta.....	58

4.3	Despacho ambiental	61
4.3.1	Resultados para operación normal	61
4.3.2	Resultados para operación en alerta.....	64
4.4	Despacho económico con restricciones ambientales	67
4.4.1	Resultados para operación normal	67
4.4.2	Resultados para operación en alerta.....	71
4.5	Resumen de resultados de generación	74
4.5.1	Operación normal.....	74
4.5.2	Operación en alerta	75
CONCLUSIONES.....		77
ANEXOS.....		79
BIBLIOGRAFÍA.....		95

PROLOGO

En el presente informe se analiza el despacho económico usado en la operación de sistemas de potencia de características térmicas llevando en cuenta restricciones ambientales. Como parte del desarrollo del tema, este trabajo fue dividido en cuatro capítulos, una sección de conclusiones y anexos.

En el Capítulo I (Introducción) se presenta los antecedentes, el objetivo, la importancia del tema, así como los alcances del informe.

En el Capítulo II (Conceptos Básicos) se muestran los conceptos básicos asociados con el modelo matemático de los componentes de sistemas de potencia, formulación matemática del flujo de potencia, flujo de potencia no lineal y flujo de potencia lineal.

En el Capítulo III (Modelo de Despacho Económico Ambiental) se presenta el problema de flujo de potencia óptimo utilizando modelos estáticos y la formulación del despacho económico usando el modelo lineal. También es explicado el problema de despacho ambiental para finalmente definir el modelo de despacho económico con restricciones ambientales usado en el presente informe.

En el Capítulo IV (Resultados de la Aplicación del Despacho Económico Ambiental en Sistemas de Potencia) se presentan los resultados de la aplicación del modelo de despacho económico con restricciones ambientales en sistemas de potencia reales, como en el sistema SEIN para la operación en el 2010. Los resultados de la simulación permitieron realizar el análisis y algunas recomendaciones son sugeridas.

En la última sección se establecen las conclusiones referidas al modelo de despacho económico con restricciones ambientales para análisis de la operación de los sistemas de potencia analizados.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

En las décadas pasadas los sistemas eléctricos de potencia crecieron en tamaño y en complejidad a medida que aumentaba el número de interconexiones, así diversos problemas técnicos forzaron a las empresas de transmisión y generación eléctrica a operar sus sistemas eléctricos en forma eficiente y económica.

El despacho económico es un estudio importante en el planeamiento de la operación de sistemas de potencia y forma parte de las actuales políticas energéticas necesarias para el desarrollo de los mercados eléctricos. El despacho económico se encarga de definir la potencia activa que entregará cada grupo generador comprometido en la operación (generadores elegidos en la etapa de pre despacho) con la finalidad de obtener un costo mínimo de operación del sistema. Para esto el costo de operación del sistema es definido como la suma de los costos de combustible de todas las unidades térmicas que intervienen en la operación, cada unidad posee diferentes características de generación y de costos.

En el panorama actual de operación de las centrales eléctricas se hace necesario velar por la reducción de la contaminación ambiental debido a la emisión de contaminantes (CO₂, NO_x, entre otros) al medio ambiente.

El presente trabajo propone un análisis de la operación económica y ambiental de redes eléctricas, tema que hoy en día es de gran importancia para las empresas del sector eléctrico y operadores de los sistemas de potencia.

1.1 Planteamiento de ingeniería del problema

1.1.1. Despacho económico lineal

En el cálculo del despacho económico se debe llevar en cuenta las condiciones operacionales de la transmisión de potencia, así deben ser respetadas las restricciones de balance de potencia en barras (1ª y 2ª ley de Kirchhoff) así como los límites de sobrecarga en líneas y límites de generación.

En el resultado del despacho económico son presentados: el valor de potencia activa que despachará cada unidad térmica, variables de estado del sistema (tensiones en barras) e

información necesaria para la operación (flujo de potencia en líneas de transmisión, costos marginales, entre otros).

Comúnmente en el medio académico la formulación matemática del despacho económico es representada como un problema de optimización no lineal, debido a que las ecuaciones de balance de potencia (residuos de potencia activa y reactiva en barras) y la función objetivo (costo de operación del sistema) son de características no lineales.

No obstante, el problema está asociado fuertemente con la potencia activa, así que una manera de simplificar el problema de despacho económico puede realizarse al eliminar las variables vinculadas con la potencia reactiva (potencia de generación reactiva, módulo de tensión en barras).

Muchos autores trataron este problema y resultado de ello es definido el despacho económico lineal, donde las ecuaciones de balance de potencia solo involucran la potencia activa usando un modelo lineal (compatible con el Flujo de Carga DC) y las demás restricciones solo llevan en cuenta modelos lineales en función de la potencia activa y ángulos de las tensiones en barras. La función objetivo en este modelo también es linealizada en función de costos variables.

1.1.2. Restricciones ambientales

Actualmente es importante llevar en cuenta el impacto ambiental en las diversas actividades en el sector eléctrico. Las restricciones ambientales representarán la emisión de contaminantes (específicamente en CO₂) al medio ambiente, las cuales pueden ser modeladas e incluidas en las formulaciones de despacho económico lineal. Estos datos de emisiones serán los que se manejan a nivel internacional.

La formulación resultante es un despacho económico ambiental, la cual es motivo de estudio en el presente informe.

1.2 Objetivos

El presente informe tiene como objetivo analizar y proponer una formulación de despacho económico usado en la operación de sistemas de potencia de centrales térmicas llevando en cuenta restricciones ambientales. Para ello se trabajará con modelos lineales donde el problema de optimización será resuelto mediante software de ingeniería como el toolbox de optimización de MATLAB.

1.3 Alcances

Dentro de los alcances el presente trabajo se puede mencionar lo siguiente:

- ◆ Realizar el marco teórico conceptual asociado con el modelo matemático de los

componentes de sistemas de potencia, formulación matemática del flujo de potencia, flujo de potencia no lineal, flujo de potencia lineal y el flujo de potencia óptimo utilizando modelos estáticos.

- ◆ Desarrollar el modelo matemático para la inclusión de las restricciones ambientales en el despacho económico de sistemas de potencia.
- ◆ Presentar los resultados de la aplicación del modelo de despacho económico ambiental en los sistemas de potencia de prueba y reales, como en el sistema SEIN para la operación en el 2010. Los resultados de la simulación permitieron realizar el análisis y algunas recomendaciones son sugeridas.
- ◆ Analizar los resultados obtenidos desde el punto de vista económico y de impacto ambiental. Proponer conclusiones y recomendaciones orientadas a establecer criterios para la operación actual de los sistemas de potencia.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

En este capítulo se presenta los conceptos básicos relacionados con el modelo matemático de los componentes de sistemas de potencia, formulación matemática del flujo de potencia, flujo de potencia no lineal o CA (corriente alterna) y flujo de potencia lineal o CC (corriente continua).

2.1 Estructura de los sistemas eléctricos de potencia

Los sistemas de energía eléctrica están formados por: el sistema eléctrico de potencia, sistemas de subtransmisión y sistemas de distribución. En la Fig. 2.1 se observa un típico sistema de energía eléctrica resaltando los elementos de los sistemas de potencia.

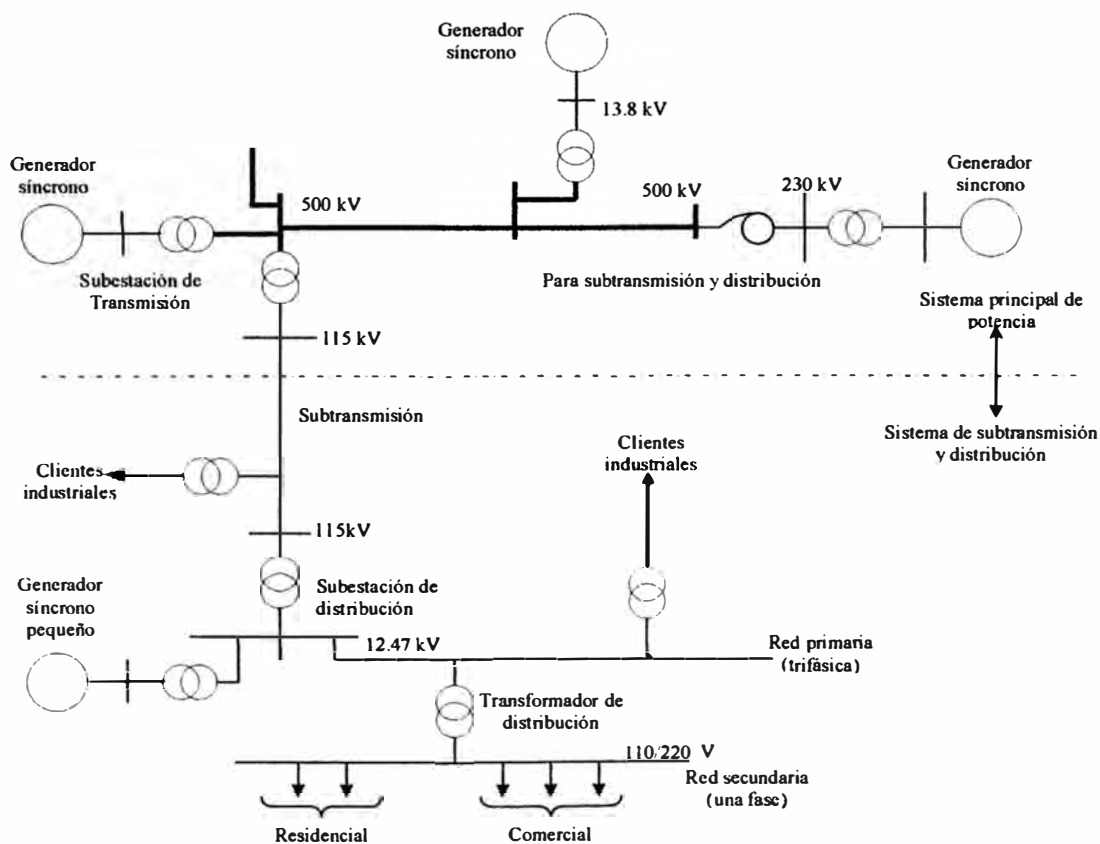


Fig. 2.1 Sistema de energía eléctrica y elementos del sistema de potencia [1].

Los sistemas de potencia varían en tamaño y en componentes, sin embargo, ellos presentan las siguientes características básicas [1]:

- ◆ Están conformados por sistemas trifásicos en corriente alterna y vienen a ser las empresas de transmisión y generación. Las cargas mayores se conectan a los sistemas de subtransmisión, son de tipo industrial y necesariamente trifásicas; las cargas menores industriales suelen conectarse al sistema de distribución. Las cargas residenciales y comerciales son monofásicas, se conectan a los sistemas de distribución y están distribuidas igualmente entre las fases de manera a formar un sistema trifásico balanceado.
- ◆ Se usan generadores síncronos para la generación de electricidad. Los motores primos convierten las fuentes primarias de energía (fósil, nuclear e hidráulica) a energía mecánica, de allí es convertido a energía eléctrica.
- ◆ Se transmite potencia eléctrica a grandes distancias, desde los centros de generación hacia consumidores ubicados en un área extensa. Esto requiere de un sistema de transmisión conformado por subestaciones operando a diferentes voltajes.

La potencia eléctrica es producida por las subestaciones generadoras y transmitidas a los consumidores a través de una red compleja de componentes, que incluyen líneas, transformadores y dispositivos de seccionamiento. El sistema de transmisión interconecta todas las subestaciones de generación y los principales centros de carga. El sistema de potencia opera en altos niveles de tensión, por ejemplo, en el Perú las tensiones del sistema de transmisión son 60 kV, 138 kV, 220 kV y actualmente se están construyendo líneas de transmisión en 500 kV. Las tensiones de generación están usualmente en el rango de 11 a 35 kV. Las interconexiones a sistemas de potencia vecinos (interconexiones con otros países) se dan en el nivel de transmisión. Todo el sistema consiste de múltiples fuentes de generación y diversas capas de redes de transmisión. Esto provee un alto grado de redundancia en su estructura y permite que el sistema soporte contingencias repentinas sin interrumpir el servicio a los consumidores.

Con el objetivo de estudiar los sistemas de potencia fueron desarrollados modelos matemáticos que en su mayoría se basan en modelos usados en los estudios de flujo de potencia.

2.2 Modelo de componentes de sistemas de potencia

Los componentes de un sistema eléctrico de potencia pueden ser clasificados en los siguientes dos grupos [2]:

- ◆ Elementos que están conectados entre una barra y al nodo de neutro, por ejemplo: generadores, cargas, reactores shunt, capacitores shunt, SVCs, entre otros. El nodo de

neutro es puesto a tierra en la mayoría de los sistemas de potencia, con excepción de los sistemas aislados. Este nodo representa la referencia potencial de las tensiones en barras del sistema.

- ◆ Elementos que están conectados entre dos barras cualesquiera de la red (circuitos), por ejemplo: líneas de transmisión, transformadores, capacitores serie, entre otros.

Los modelos de generadores y las cargas son considerados en la parte externa de la formulación de flujo de potencia y comúnmente son representados a través de inyecciones de potencia constante en las barras. Los demás componentes forman la parte interna y son modelados a través de impedancias o admitancias.

2.2.1 Líneas de transmisión

El modelo equivalente π de una línea de transmisión, representado en la Fig. 2.2, es definido por tres parámetros:

- La resistencia serie r_{km} ,
- La reactancia serie x_{km} ,
- La susceptancia shunt $b_{km}^{sh} = \frac{1}{2} b_{linea}^{sh}$.

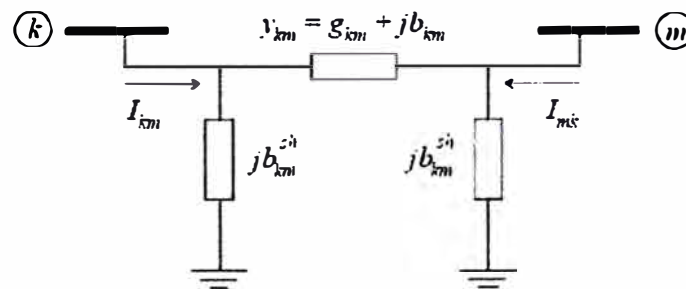


Fig. 2.2 Modelo equivalente π de una línea de transmisión.

La impedancia del elemento serie es $z_{km} = r_{km} + jx_{km}$, entonces la admitancia serie es:

$$y_{km} = z_{km}^{-1} = g_{km} + jb_{km} = \frac{r_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} + j \frac{x_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} \quad (2.1)$$

La corriente I_{km} puede ser expresada como:

$$I_{km} = y_{km}(E_k - E_m) + jb_{km}^{sh}E_k \quad (2.2)$$

donde $E_k = V_k e^{j\theta_k}$ y $E_m = V_m e^{j\theta_m}$.

Análogamente, la corriente I_{mk} es expresada como:

$$I_{mk} = y_{km}(E_m - E_k) + jb_{km}^{sh}E_m \quad (2.3)$$

2.2.2 Transformadores en fase

La representación de transformadores en fase, como se presenta en la Fig. 2.3, consiste en una admitancia $y_{km} = g_{km} + jb_{km}$ en serie con un transformador ideal con relación de transformación $a : 1$, donde a es un número real.



Fig. 2.3 Modelo de transformador en fase.

La relación entre las tensiones en los nodos k y p del transformador ideal es:

$$\frac{E_p}{E_k} = \frac{1}{a} \quad (2.4)$$

y entre corrientes es:

$$\frac{I_{km}}{I_{mk}} = -\frac{1}{a} \quad (2.5)$$

De la Fig. 2.3, se tiene que:

$$\begin{aligned} I_{km} &= -\frac{1}{a} I_{mk} = \frac{1}{a^2} y_{km} E_k - \frac{1}{a} y_{km} E_m \\ I_{mk} &= y_{km} E_m - E_k = -\frac{1}{a} y_{km} E_k + y_{km} E_m \end{aligned} \quad (2.6)$$

Por otro lado, el transformador en fase puede ser representado por un circuito equivalente del tipo π , conforme mostrado en la Fig. 2.4.

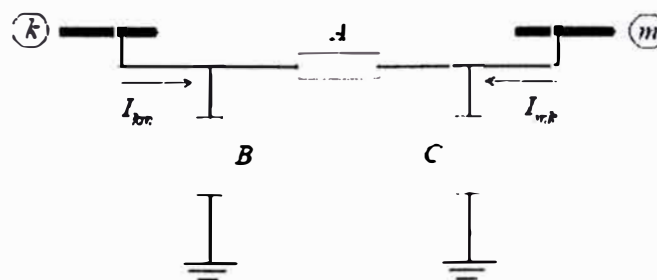


Fig. 2.4 Circuito equivalente π de un transformador en fase.

En esta figura, se tiene:

$$\begin{aligned} I_{km} &= (A + B)E_k - AE_m \\ I_{mk} &= -AE_k + (A + C)E_m \end{aligned} \quad (2.7)$$

Comparando las ecuaciones (2.6) y (2.7), se concluye que:

$$A = \frac{1}{a} y_{km} \quad B = \frac{1}{a} \left(\frac{1}{a} - 1 \right) y_{km} \quad C = \left(1 - \frac{1}{a} \right) y_{km} \quad (2.8)$$

2.2.3 Matriz admitancia de barra

En los modelos de flujo de potencia se usan estructuras matriciales que están asociadas con la matriz admitancia de barra Y_{barra} . De las ecuaciones nodales para un sistema eléctrico, se tiene que $I = Y_{barra}E$, donde I es el vector de inyecciones de corriente, E es el vector de las tensiones nodales.

Los elementos de la matriz admitancia para las líneas de transmisión o transformadores son expresados de la siguiente forma:

$$Y_{km} = -\frac{1}{a_{km}} y_{km}, \quad (2.9)$$

$$Y_{kk} = jb_k^{sh} + \sum_{m \in \Omega_k} \left(jb_{km}^{sh} + \frac{1}{a_{km}^2} y_{km} \right), \quad (2.10)$$

$$Y_{mm} = jb_m^{sh} + \sum_{k \in \Omega_m} \left(jb_{km}^{sh} + y_{km} \right). \quad (2.11)$$

donde Ω_k es el conjunto de barras vecinas de la barra k .

Para el uso de las ecuaciones (2.9)-(2.11) se deben seguir las siguientes instrucciones:

- ◆ Adición de un elemento serie entre barras k - m
 - Para líneas de transmisión: $a_{km} = 1$, $b_{km}^{sh} = \frac{1}{2} b_{linea}^{sh}$ y $b_k^{sh} = 0$.
 - Para transformadores: $a_{km} = a_{transformador}$, $b_{km}^{sh} = 0$ y $b_k^{sh} = 0$.
- ◆ Adición de un elemento shunt en la barra k : $a_{km} = 0$, $b_{km}^{sh} = 0$ y $b_k^{sh} = b_{elemento}^{sh}$.

La matriz Y_{barra} puede ser descompuesta en dos matrices, como:

$$Y_{barra} = G_{barra} + jB_{barra} \quad (2.12)$$

donde:

G_{barra} : es la matriz conductancia nodal;

B_{barra} : es la matriz susceptancia nodal.

2.3 Formulación matemática de flujo de potencia

Las formulaciones matemáticas de los flujos de potencia dependen de los componentes del sistema que se están analizando.

2.3.1 Flujo de potencia en líneas de transmisión

Para una línea de transmisión entre las barras k - m , el flujo de potencia compleja de la barra k para la barra m es:

$$S_{km}^* = P_{km} - jQ_{km} = E_k^* I_{km} = y_{km} V_k e^{-j\theta_k} (V_k e^{j\theta_k} - V_m e^{-j\theta_m}) + j b_{km}^{sh} V_k^2 \quad (2.13)$$

Los flujos P_{km} y Q_{km} son obtenidos identificándose las partes reales e imaginarias de la expresión anterior:

$$P_{km} = V_k^2 g_{km} - V_k V_m (g_{km} \cos \theta_{km} + b_{km} \text{sen} \theta_{km}) \quad (2.14)$$

$$Q_{km} = -V_k^2 (b_{km} + b_{km}^{sh}) + V_k V_m (b_{km} \cos \theta_{km} - g_{km} \text{sen} \theta_{km})$$

donde $\theta_{km} = \theta_k - \theta_m$.

Los flujos P_{mk} y Q_{mk} son obtenidos análogamente:

$$P_{mk} = V_m^2 g_{km} - V_k V_m (g_{km} \cos \theta_{mk} + b_{km} \text{sen} \theta_{mk}) \quad (2.15)$$

$$Q_{mk} = -V_m^2 (b_{km} + b_{km}^{sh}) + V_k V_m (b_{km} \cos \theta_{mk} - g_{km} \text{sen} \theta_{mk})$$

donde $\theta_{mk} = \theta_m - \theta_k$.

2.3.2 Flujo de potencia en transformadores en fase

El flujo de potencia compleja de la barra k para la barra m es:

$$S_{km}^* = P_{km} - jQ_{km} = E_k^* I_{km} \quad (2.16)$$

y, por lo tanto, los flujos de potencia activa y reactiva son obtenidos identificándose las partes real e imaginaria de esa expresión, resultando en:

$$P_{km} = \frac{V_k^2 g_{km}}{a} - \frac{V_k V_m}{a} (g_{km} \cos \theta_{km} + b_{km} \text{sen} \theta_{km}) \quad (2.17)$$

$$Q_{km} = -\frac{V_k^2 g_{km}}{a^2} + \frac{V_k V_m}{a} (b_{km} \cos \theta_{km} - g_{km} \text{sen} \theta_{km})$$

Por otro lado, el flujo de potencia compleja de la barra m para la barra k es:

$$S_{mk}^* = P_{mk} - jQ_{mk} = E_m^* I_{mk} \quad (2.18)$$

y, por lo tanto, los flujos de potencia activa y reactiva son:

$$P_{mk} = V_m^2 g_{km} + \frac{V_k V_m}{a} (b_{km} \text{sen} \theta_{km} - g_{km} \cos \theta_{km})$$

$$Q_{km} = -V_m^2 g_{km} + \frac{V_k V_m}{a} (b_{km} \cos \theta_{km} + g_{km} \text{sen} \theta_{km}) \quad (2.19)$$

2.4 Flujo de potencia no lineal o CA

El problema de flujo de potencia en sistemas eléctricos de potencia ha sido ampliamente estudiado durante varias décadas. Este tipo de problema fue formulado en coordenadas polares (módulo y ángulo de las tensiones en barra) y para redes de secuencia positiva.

2.4.1 Aspectos generales

El cálculo del flujo de potencia no lineal o CA (corriente alterna) en una red de energía eléctrica consiste esencialmente en la determinación del estado de esta red (tensiones complejas en todas las barras) y de la distribución de los flujos de potencia activa y reactiva en todos los circuitos de la red. La formulación del problema de flujo de potencia no lineal es representada por un conjunto de ecuaciones algebraicas no lineales. El cálculo del flujo de potencia es, en general, realizado utilizándose métodos computacionales desarrollados específicamente para la resolución de sistemas de ecuaciones algebraicas no lineales que representan el modelo estático de la red.

Las ecuaciones de flujo de potencia (llamadas también “balance de potencias”) son obtenidas imponiéndose la conservación de las potencias activas y reactivas en cada barra de la red, es decir, la potencia líquida inyectada tiene que ser igual a la suma de las potencias que fluyen hacia los componentes internos conectados a esta barra. Eso equivale a la aplicación de la Primera Ley de Kirchhoff. La Segunda Ley de Kirchhoff es utilizada para la determinación de los flujos de potencia en los componentes internos en función de las tensiones complejas de las barras terminales.

2.4.2 Formulación del problema

A cada barra de la red son asociadas cuatro variables, siendo que dos de ellas son datos y las otras dos son incógnitas:

- ◆ V_k es el módulo de la tensión compleja en la barra k ;
- ◆ θ_k es el ángulo de la tensión compleja en la barra k ;
- ◆ P_k es la inyección de potencia activa en la barra k , es decir, $P_k = P_{g,k} - P_{d,k}$;
- ◆ Q_k es la inyección de potencia reactiva en la barra k , es decir, $Q_k = Q_{g,k} - Q_{d,k}$.

donde $P_{g,k}$ y $Q_{g,k}$ son las potencias activa y reactiva de generación en la barra k , respectivamente; $P_{c,k}$ y $Q_{c,k}$ son las potencias activa y reactiva de carga en la barra k , respectivamente.

Dependiendo de cuales variables entran como datos y cuales son consideradas incógnitas, se definen tres tipos de barras:

- ◆ Barra PQ : son datos P_k y Q_k , y son calculados V_k y θ_k ;
- ◆ Barra PV : son datos P_k y V_k , y son calculados θ_k y Q_k ;
- ◆ Barra $V\theta$: son datos V_k y θ_k , y son calculados P_k y Q_k .

La barra $V\theta$, también denominada barra *slack* o *swing*, cumple la función de referencia angular de tensiones de barras del sistema y realiza el balance de potencia entre generación y demanda total del sistema.

Las barras del tipo PQ y PV son utilizadas para representar las barras de carga y barras de generación, respectivamente. La barra $V\theta$, también denominada barra *slack*, determina la referencia angular del sistema y es usada para cerrar el balance de potencia llevando en cuenta las pérdidas de transmisión que no son conocidas antes de obtenerse la solución final del problema.

El conjunto de ecuaciones del problema de flujo de potencia es formado por dos ecuaciones para cada barra, cada una de ellas representando el hecho que las potencias activa y reactiva en una barra sea igual a la suma de los flujos correspondientes que dejan la barra a través de los circuitos (líneas de transmisión, transformadores, etc.). Esto corresponde a la aplicación de la Primera Ley de Kirchhoff y matemáticamente puede ser expresado por:

$$\begin{aligned} P_k &= \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \\ Q_k + Q_k^{sh} &= \sum_{m \in \Omega_k} Q_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \end{aligned} \quad (2.20)$$

donde:

$k = 1, 2, \dots, nb$, siendo nb el número de barras de la red;

V_k, V_m : módulos de las tensiones complejas en las barras k y m ;

θ_k, θ_m : ángulos de fase de las tensiones complejas en las barras k y m ;

P_{km}, Q_{km} : flujos de potencia activa y reactiva en el circuito $k-m$, respectivamente;

Q_k^{sh} : componente de inyección de potencia reactiva debido al elemento shunt conectado en la barra k ($Q_k^{sh} = b_k^{sh} V_k^2$, donde b_k^{sh} la susceptancia conectada a la barra k).

En estas ecuaciones los ángulos de fase θ_k y θ_m aparecen siempre en la forma $\theta_k - \theta_m$, significando que una misma distribución de flujos en la red puede ser obtenida si fuera sumada una constante arbitraria a todos los ángulos nodales, es decir, el problema de flujo

de carga es indeterminado en las variables θ , lo que hace necesario la adopción de una referencia angular (eso es realizado por una barra tipo $V\theta$, conforme lo dicho anteriormente).

Las ecuaciones (2.20) son montadas considerándose la siguiente convención de signos:

- ◆ Las inyecciones líquidas de potencia son positivas cuando entran en la barra (generación) y negativas cuando salen de la barra (carga);
- ◆ Para los elementos shunt de las barras es adoptada la misma convención que para las inyecciones.

Esas convenciones de sentidos para las potencias activa y reactiva son las mismas utilizadas para las corrientes y están mostradas en la Fig. 2.5.

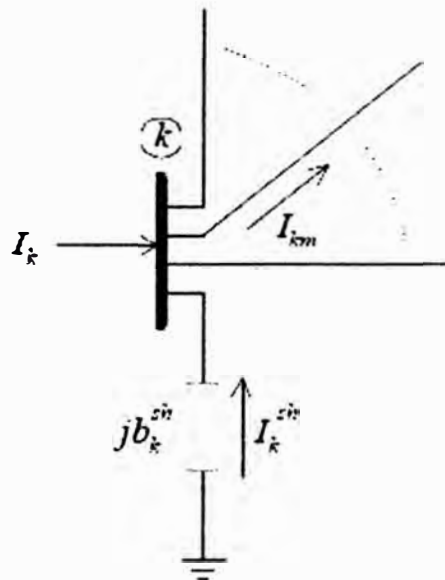


Fig. 2.5 Convención de signos para los flujos e inyecciones de corriente, potencia activa y reactiva.

2.4.3 Formulación matricial

La inyección líquida de la corriente en la barra k puede ser escrita como:

$$I_k = Y_{kk}E_k + \sum_{m \in \Omega_k} Y_{km}E_m \quad (2.21)$$

Considerando que $Y_{kk} = G_{kk} + jB_{kk}$, $Y_{km} = G_{km} + jB_{km}$, $E_k = V_k e^{j\theta_k}$ y $E_m = V_m e^{j\theta_m}$, la ecuación (2.21) puede ser escrita como:

$$I_k = (G_{kk} + jB_{kk})V_k e^{j\theta_k} + \sum_{m \in \Omega_k} (G_{km} + jB_{km})V_m e^{j\theta_m} \quad (2.22)$$

La inyección de potencia en la barra k es:

$$S_k^* = P_k - jQ_k = E_k^* I_k \quad (2.23)$$

y substituyendo la ecuación (2.22) en la ecuación (2.23), las inyecciones de potencias activa y reactiva en la barra k pueden ser escrita como:

$$\begin{aligned} P_{cal,k} &= G_{kk}V_k^2 + V_k \sum_{m \in \Omega_k} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \text{sen} \theta_{km}) \\ Q_{cal,k} &= -B_{kk}V_k^2 + V_k \sum_{m \in \Omega_k} V_m (G_{km} \text{sen} \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \end{aligned} \quad (2.24)$$

donde el termino *cal* se refiere a las potencias calculadas con las variables de estado.

En el problema flujo de potencia tiene los siguientes datos:

- ◆ P_k y Q_k en las barras PQ ;
- ◆ P_k y V_k en las barras PV ;
- ◆ V_k y θ_k en la barra *slack* (referencia angular);

y tiene los siguientes incógnitas a resolver:

- ◆ V_k y θ_k en las barras PQ ;
- ◆ θ_k en las barras PV .

Sean nPQ y nPV el número de barras PQ y PV , respectivamente. Entonces, el problema de flujo de potencia envuelve $2nPQ + nPV$ ecuaciones algebraicas no lineales con el mismo número de incógnitas, es decir:

$$\begin{aligned} G_{kk}V_k^2 + V_k \sum_{m \in \Omega_k} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \text{sen} \theta_{km}) - P_{esp,k} &= 0, \text{ para barras } PQ \text{ y } PV \\ -B_{kk}V_k^2 + V_k \sum_{m \in \Omega_k} V_m (G_{km} \text{sen} \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) - Q_{esp,k} &= 0, \text{ para barras } PQ \end{aligned} \quad (2.25)$$

donde:

$$\begin{aligned} P_{esp,k} &= P_{g,k} - P_{d,k} \\ Q_{esp,k} &= Q_{g,k} - Q_{d,k} \end{aligned}$$

Una vez resuelto este problema, será conocido el estado de todas las barras de la red (tensiones complejas en todas las barras). Entonces, se calcula:

$$\begin{aligned} P_{g,k} &= G_{kk}V_k^2 + V_k \sum_{m \in \Omega_k} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \text{sen} \theta_{km}) + P_{d,k}, \text{ para barras } V\theta \\ Q_{g,k} &= -B_{kk}V_k^2 + V_k \sum_{m \in \Omega_k} V_m (G_{km} \text{sen} \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) + Q_{d,k}, \text{ para barras } PV \text{ y } V\theta \end{aligned} \quad (2.26)$$

Las incógnitas pueden ser agrupadas en el vector x como:

$$x = \left\{ \begin{array}{l} \theta \\ V \end{array} \right\} \begin{array}{l} nPQ + nPV \\ nPQ \end{array} \quad (2.27)$$

donde:

- V : es el vector de los módulos de las tensiones complejas en las barras PQ .
- θ : es el vector de los ángulos de fase de las tensiones complejas en las barras PQ y PV .

Por otra parte, las ecuaciones (2.26) pueden ser rescritas como:

$$\begin{aligned}\Delta P_k &= P_{esp,k} - P_{cal,k} = 0, \text{ para barras } PQ \text{ y } PV \\ \Delta Q_k &= Q_{esp,k} - Q_{cal,k} = 0, \text{ para barras } PQ\end{aligned}\quad (2.28)$$

donde ΔP_k y ΔQ_k son conocidas como los residuos de potencias activa y reactiva en la barra k , respectivamente;

Estas ecuaciones pueden ser colocadas en la forma vectorial como:

$$\begin{aligned}\Delta P &= P_{esp} - P_{cal} = 0, \text{ para barras } PQ \text{ y } PV \\ \Delta Q &= Q_{esp} - Q_{cal} = 0, \text{ para barras } PQ\end{aligned}\quad (2.29)$$

2.4.4 Solución del problema de flujo de potencia no lineal

Sea $f(x)$ el vector de funciones:

$$f(x) = \begin{Bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{Bmatrix} \begin{matrix} nPQ + nPV \\ nPQ \end{matrix}\quad (2.30)$$

De esta forma, el sistema de ecuaciones algebraicas no lineales a ser resuelto puede ser colocado en la siguiente forma:

$$f(x) = 0\quad (2.31)$$

La resolución de ese sistema puede ser realizada por varios métodos iterativos dentro de los cuales se puede mencionar los siguientes: método de Newton-Raphson [3] y métodos desacoplados rápidos [4].

La inicialización del problema es realizada en forma arbitraria en los valores de los módulos de las tensiones en las barras PQ y para los ángulos de fase de todas las barras, excepto la barra $V\theta$. Normalmente, se utiliza la inicialización con perfil plano (*flat start*), donde se adopta 1.0 pu para las magnitudes de las tensiones y 0° para los ángulos de fase.

Los criterios de convergencia para los métodos de solución iterativos son que los residuos de potencia activa en las barras PV y PQ , y de potencia reactiva en las barras PQ deben tender a cero. En la práctica, estos residuos deberán satisfacer una tolerancia pre-especificada (en general, 10^{-3}).

2.5 Flujo de potencia lineal

El flujo de potencia activa en un circuito es aproximadamente proporcional a la abertura angular del circuito y el sentido del flujo va desde ángulos mayores a ángulos menores. La relación entre los flujos de potencia activa y las aberturas angulares es del mismo tipo que entre los flujos de corriente y las caídas de tensión en un circuito de corriente continua, para el cual es válida la Ley de Ohm. Esta propiedad hace posible el desarrollo de un modelo aproximado de flujo de potencia lineal o CC (corriente continua) que permite estimar, con bajo costo computacional y con precisión aceptable para muchas aplicaciones, la distribución de los flujos de potencia activa en una red de transmisión.

El flujo de potencia lineal es basado en el acoplamiento entre las variables P y θ (potencia activa y ángulo de fase de las tensiones complejas) y presenta resultados tanto mejores cuanto más elevado el nivel de tensión del sistema. A parte de eso, el mismo tipo de relación válida para las líneas de transmisión puede ser extendido para los transformadores en fase. Sin embargo, este modelo lineal no es aplicable para sistemas de distribución en baja tensión, en los cuales los flujos de potencia activa dependen también, de manera significativa, de las magnitudes de las tensiones complejas en las barras.

Se debe observar que el modelo lineal no lleva en cuenta las magnitudes de las tensiones en barras, las potencias reactivas y los taps de los transformadores. Por esta razón, este no puede sustituir por completo los métodos no lineales de flujo de potencia, pero tiene gran utilidad en las fases preliminares de estudios que exigen el análisis de un gran número de casos, lo que difícilmente podría ser realizado utilizándose los métodos convencionales. En las fases siguientes de estos estudios, si fuese necesario el conocimiento de las variables como los módulos de las tensiones, los flujos de potencia reactiva y los valores de los taps de transformadores con control de taps, entonces se deberá utilizar la formulación del flujo de potencia no lineal.

2.5.1 Linealización

Para realizar la linealización de las ecuaciones de la red eléctrica considerando apenas el acoplamiento $P-\theta$, se debe considerar las siguientes aproximaciones:

- ◆ $V_k = 1.0$ p.u., $k = 1, 2, \dots, nb$, donde nb es el número de barras;
- ◆ Despreciar todos los elementos shunt en la formación Y_{barra} ;
- ◆ Despreciar todas las resistencias serie de los circuitos;
- ◆ Considerar $\text{sen}\theta_{km} \cong \theta_{km}$ en radianes;
- ◆ Considerar todos los taps unitarios, esto es $\forall a = 1.0$

De esta forma las ecuaciones (2.14) y (2.17) que expresan el flujo de potencia activa en las líneas y transformadores en fase, pueden ser escritas como:

$$P_{km} = -b_{km}\theta_{km} = -b_{km}(\theta_k - \theta_m) = \frac{\theta_k - \theta_m}{x_{km}} \quad (2.32)$$

donde x_{km} es la reactancia equivalente de todos los circuitos en paralelo que existen en la rama $k-m$.

Esta ecuación tiene la misma forma que la Ley de Ohm aplicada a un resistor por donde fluye una corriente continua, siendo P_{km} análogo a la intensidad de corriente, θ_k y θ_m análogos a las tensiones terminales y x_{km} análogo a la resistencia eléctrica del resistor. Por esta razón, el modelo de red de transmisión basado en la ecuación (2.32) es conocida como modelo CC.

2.5.2 Formulación matricial

La inyección de potencia activa en la barra k es igual a la suma de los flujos que salen de la barra, es decir:

$$P_k = \sum_{m \in \Omega_k} x_{km}^{-1} (\theta_k - \theta_m) = \theta_k \sum_{m \in \Omega_k} x_{km}^{-1} - \theta_m \sum_{m \in \Omega_k} x_{km}^{-1}, \quad k = 1, 2, \dots, nb \quad (2.33)$$

la cual admite una representación matricial del tipo siguiente:

$$P = B' \theta, \quad (2.34)$$

donde

- P : es el vector de las inyecciones líquidas de potencia reactiva;
- θ : es el vector de los ángulos de fase de las tensiones complejas de barras;
- B' : es una matriz tipo susceptancia nodal, cuyos elementos son:

$$B'_{km} = -x_{km}^{-1}, \quad (2.35)$$

$$B'_{kk} = \sum_{m \in \Omega_k} x_{km}^{-1}. \quad (2.36)$$

La matriz B' dada por las ecuaciones (2.35)-(2.36) es singular pues, como las pérdidas de transmisión fueron ignoradas, la suma de los componentes de P es nula, es decir, la inyección de potencia en una barra cualquiera de la red puede ser obtenida a partir de la suma algebraica de las demás, lo que genera un sistema linealmente dependiente. Para resolver este problema, se elimina una de las ecuaciones del sistema lineal (2.34) y se adopta una barra como la correspondiente a la referencia angular o *slack* del sistema (donde $\theta_{slack} = 0^\circ$). De esta forma la matriz B' pasa a ser no singular con dimensión $(nb - 1)$ y los ángulos de fase de las $(nb - 1)$ barras restantes pueden ser determinadas a partir de las

inyecciones de potencia activa especificadas en esas $(nb - 1)$ barras.

También, para la ecuación de balance de potencia activa se tiene lo siguiente:

$$P_{esp} - P = 0, \quad (2.37)$$

donde P_{esp} es el vector de potencias activas especificadas; también $P_{esp} = P_g - P_c$ donde P_g y P_c es el vector de potencias activas de generación y carga, respectivamente.

2.5.3 Potencia de la barra de referencia

En el cálculo del flujo de potencia CC todas las resistencias de los circuitos fueron despreciadas, por lo que no hay pérdidas activas en el sistema. Entonces se tiene lo siguiente:

$$\sum_{i=1}^{nb} P_i = 0. \quad (2.38)$$

Por lo tanto, la potencia activa de inyección en la barra de referencia o *slack* puede ser determinada como:

$$P_{slack} = - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq slack}}^{nb} P_i = - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq slack}}^{nb} (P_{g,i} - P_{c,i}) = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq slack}}^{nb} P_{c,i} - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq slack}}^{nb} P_{g,i}, \quad (2.39)$$

donde el primer término representa la carga total del sistema y el segundo término la generación total del sistema con excepción de la generación de la barra *slack* en ambos. Comúnmente la barra *slack* es una barra de generación y en el caso que exista diferencia entre la generación y la carga total del sistema, esta asumiría ese desbalance.

2.5.4 Características del método de flujo de potencia lineal

El flujo de potencia lineal o CC presenta las siguientes características:

- ◆ Es un método aproximado de cálculo de flujo de potencia;
- ◆ Siempre presenta convergencia, aún si los valores del sistema fueran absurdos;
- ◆ Presenta mejor desempeño en las redes de alta relación x/r (redes de alta tensión);
- ◆ Es adecuado en problemas donde la exactitud no es un factor preponderante o en problemas donde exista necesidad de muchas soluciones de casos, como por ejemplo en el planeamiento de la expansión;
- ◆ Presenta una solución rápida;
- ◆ Presenta la desventaja de ser un método aproximado de cálculo, generalmente presenta un error 3 a 5% en los ángulos para sistemas de líneas medias (no largas).

2.5.5 Ejemplo aplicativo – flujo de potencia CC del sistema 3 barras

A modo de ejemplo, en la Fig. 2.6 se muestra un sistema de 3 barras y los datos usados

para flujo de potencia CC.

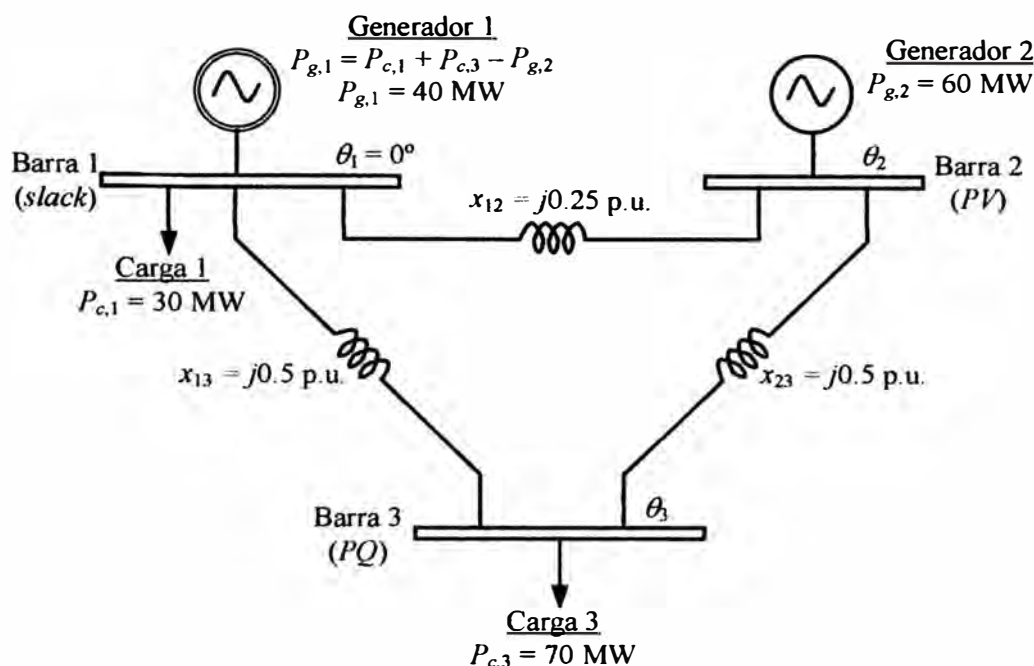


Fig. 2.6 Sistema de 3 barras y datos usados para flujo de potencia CC.

En este sistema la barra 1 es la barra de referencia o *slack*, la cual tiene una potencia de inyección que puede ser calculada con la ecuación (2.39):

$$P_{slack} = \sum_{i=2}^3 P_{c,i} - \sum_{i=2}^3 P_{g,i} = P_{c,3} - P_{g,2} = +10 \text{ MW},$$

donde la potencia de generación de la barra *slack* es calculado como:

$$P_{slack} = P_1 = P_{g,1} - P_{c,1} \Rightarrow P_{g,1} = P_{slack} + P_{c,1} = 40 \text{ MW},$$

Para calcular los flujos de potencia activa en las líneas de transmisión, primero se deben calcular los ángulos de las tensiones en todas las barras excepto la barra *slack*, puesto que es la barra de referencia ($\theta_1 = 0^\circ$).

La matriz B' es construida a partir de las ecuaciones (2.35) y (2.36), así se tiene:

$$B' = \begin{bmatrix} \sum_{m \in \Omega_1} x_{1m}^{-1} & -x_{12}^{-1} & -x_{13}^{-1} \\ -x_{21}^{-1} & \sum_{m \in \Omega_2} x_{2m}^{-1} & -x_{23}^{-1} \\ -x_{31}^{-1} & -x_{32}^{-1} & \sum_{m \in \Omega_3} x_{3m}^{-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +6 & -4 & -2 \\ -4 & +6 & -2 \\ -2 & -2 & +4 \end{bmatrix}.$$

De la matriz B' anterior se puede notar que la suma de las filas 2 y 3 resultan la fila 1 con signo cambiado, lo que comprueba que la matriz B' es singular. Eliminando la fila 1 y

columna 1 referida a la barra *slack* se tiene la siguiente formulación del flujo de potencia CC para el sistema de 3 barras:

$$P = B'\theta \Rightarrow \begin{bmatrix} P_{g,2} \\ -P_{c,3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +6 & -2 \\ -2 & +4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix}.$$

Resolviendo el sistema anterior teniendo en cuenta que $P_{g,2} = 0.6$ p.u. (60 MW) y $P_{c,3} = 0.7$ p.u. (70 MW), se tiene lo siguiente:

$$\begin{bmatrix} 0.6 \\ -0.7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +6 & -2 \\ -2 & +4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.1 \\ 0.1 & 0.3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.6 \\ -0.7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +0.05 \\ -0.15 \end{bmatrix},$$

donde los valores de θ_2 y θ_3 están en radianes. Los flujos en las líneas son calculados de la siguiente forma:

$$P_{12} = \frac{\theta_1 - \theta_2}{x_{12}} = -0.2 \text{ p.u. } (-20 \text{ MW}),$$

$$P_{13} = \frac{\theta_1 - \theta_3}{x_{13}} = +0.3 \text{ p.u. } (+30 \text{ MW}),$$

$$P_{23} = \frac{\theta_2 - \theta_3}{x_{23}} = +0.4 \text{ p.u. } (+40 \text{ MW}).$$

En la Fig. 2.7 se muestra la solución de flujo de potencia CC del sistema de 3 barras, destacándose los sentidos de los flujos de potencia activa en las líneas de transmisión.

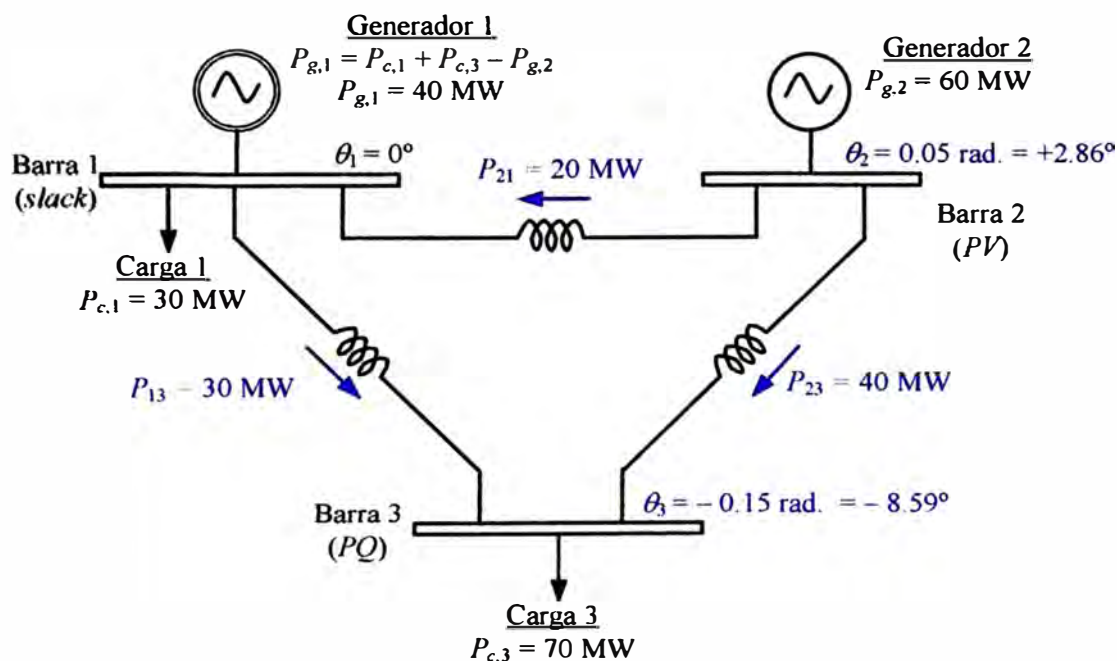


Fig. 2.7 Solución de flujo de potencia CC del sistema de 3 barras.

CAPÍTULO III

DESPACHO ECONOMICO CON RESTRICCIONES AMBIENTALES

En este capítulo se presenta los conceptos básicos relacionados a programación lineal, flujo de potencia óptimo, despacho económico lineal y la formulación de despacho económico con restricciones ambientales que se utiliza en este trabajo. Se adicionan ejemplos aplicativos para explicar mejor el contenido de este capítulo.

3.1 Programación lineal

Diversos trabajos han sido publicados en la literatura especializada, donde los problemas del mundo real son abordados a través de la aplicación de técnicas de optimización [5].

El término “programación lineal” también es usado para referirse a optimización lineal. La programación lineal consiste de un grupo de las técnicas del área de investigación operacional y estas son las más usadas en los problemas de optimización. Se trata de una herramienta de planeamiento que nos ayuda a seleccionar actividades (variables de decisión) a ser utilizadas, dado que estas actividades compiten entre sí por la utilización de los recursos escasos y necesitan satisfacer ciertos requisitos mínimos (restricciones). Un determinado objetivo, por ejemplo maximizar el beneficio o minimizar el costo, puede ser expresado a través de una función lineal denominada “función objetivo”.

Con el avance de computadores cada vez más rápidos y poderosos, la programación lineal se ha vuelto de gran utilidad en las aplicaciones prácticas de planeamiento en diversas áreas, inclusive en sistemas de potencia. Esos trabajos tienen como objetivo reducir los costos de inversiones en la expansión de los sistemas de energía, reducir las pérdidas eléctricas, entre otros.

3.1.1 Formulación matemática del problema de programación lineal

Las técnicas de programación lineal hacen posible encontrar la solución óptima de un problema de optimización, el cual es definido en forma lineal, es decir, la función objetivo y las restricciones (igualdad y desigualdad) lineales. La forma exacta como se formulan estas restricciones puede diferenciar un problema de otro, pero en forma general un problema de programación lineal puede ser formulado en la siguiente forma:

$$\text{Maximizar } z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$$

sujeto a:

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n &\leq b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n &\leq b_2 \\ &\vdots \\ a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{in}x_n &\leq b_i \\ &\vdots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n &\leq b_m \\ x_1, x_2, x_3, \dots, x_n &\geq 0 \end{aligned} \tag{3.1}$$

donde:

x_j : es la actividad o variable de decisión cuyo valor debe ser determinado, donde $j = 1, 2, \dots, n$; n es el número total de actividades;

z : es el valor de la función objetivo a ser maximizada.

c_i : es el coeficiente de costo asociado a la actividad x_i .

b_i : es el nivel de un recurso escaso i , donde $i = 1, 2, \dots, m$; m es el número total de recursos;

a_{ij} : representa cuanto el recurso i es consumido por la actividad j ;

El problema (3.1) se dice que está expresado en la forma canónica y este se interpreta de la siguiente forma: n actividades compiten entre ellas, siendo sus niveles de actividad señalados como x_1, x_2, \dots, x_n , con el objetivo de maximizar la función objetivo z considerando los m niveles de recursos escasos.

3.1.2 Formulaciones equivalentes

Existen formulaciones equivalentes para el problema (3.1) las cuales son presentadas sin las restricciones de desigualdad asociadas a los recursos. En este caso se utilizan unas variables positivas adicionales $x_{n+1}, x_{n+2}, \dots, x_{n+m} \geq 0$ introducidas en los recursos para convertir estos en restricciones de igualdad. El nuevo problema tiene $n+m$ variables de decisión y se dice que está expresado en la forma estándar.

En la Tabla N° 3.1 se muestra un resumen de los dos tipos de formulaciones para el problema de programación lineal.

Existen diversas ventajas en usar una u otra forma de representación, por ejemplo, la forma canónica es útil especialmente para el análisis de las relaciones duales. El método SIMPLEX, el cual es un algoritmo muy usado para resolver problemas de programación matemática, fue creado para ser aplicado después que el problema es representado en su forma estándar.

Tabla N° 3.1 Resumen de formulaciones del problema de programación lineal.

Forma	Minimización	Maximización
Estándar	$\min \quad z = \sum_{j=1}^n c_j x_j$ $\text{sujeto a : } \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j = b_i \quad i = 1, \dots, m$ $x_j \geq 0 \quad j = 1, \dots, n$	$\max \quad z = \sum_{j=1}^n c_j x_j$ $\text{sujeto a : } \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j = b_i \quad i = 1, \dots, m$ $x_j \geq 0 \quad j = 1, \dots, n$
Canónica	$\min \quad z = \sum_{j=1}^n c_j x_j$ $\text{sujeto a : } \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq b_i \quad i = 1, \dots, m$ $x_j \geq 0 \quad j = 1, \dots, n$	$\max \quad z = \sum_{j=1}^n c_j x_j$ $\text{sujeto a : } \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i \quad i = 1, \dots, m$ $x_j \geq 0 \quad j = 1, \dots, n$

Comúnmente se usa una representación matricial para el problema de programación lineal, el cual puede ser expresado como:

$$\begin{aligned} \max/\min \quad z &= c^t x \\ \text{sujeto a:} & \\ & Ax = b \\ & x \geq 0 \end{aligned} \quad (3.2)$$

donde:

- x : es el vector de actividades o variables de decisión ($1 \times n$);
- z : es el valor de la función objetivo a ser maximizada.
- c : es el vector de costos asociados a las actividades ($1 \times n$)
- b : es el vector de niveles de recursos escasos ($1 \times n$) donde $b \geq 0$;
- A es la matriz que representa cuanto los recursos son consumidos por las actividades ($m \times n$).

En relación a la dimensión de la matriz A pueden existir tres tipos de situaciones:

1. $n > m$: el sistema ofrece infinidad de soluciones, es decir, existe un espacio de soluciones factibles y normalmente los métodos como el SIMPLEX identifican solo una solución óptima;
2. $n = m$: la matriz de coeficientes A es cuadrada y en caso la matriz A sea no singular, el sistema tendrá una solución única, es decir el espacio de

soluciones factibles es un conjunto con un solo elemento, no existiendo más alternativas de elección;

3. $n < m$: no tiene sentido práctica, es decir, no existe espacio de soluciones factibles, indicando que existen restricciones redundantes en el sistema, las cuales deberían ser descartadas, reduciendo el sistema para los dos casos anteriores.

3.1.3 Ejemplo aplicativo – programación lineal usando representación gráfica

Considere el siguiente problema de programación lineal:

$$\max \quad z = 4x_1 + x_2$$

sujeto a:

$$x_1 - x_2 \leq 2 \quad (R1)$$

$$x_1 + 2x_2 \leq 8 \quad (R2)$$

$$x_1, x_2 \geq 0 \quad (R3)$$

En la Fig. 3.1 se puede observar la representación geométrica del problema de programación lineal en el plano de coordenadas (x_1, x_2) .

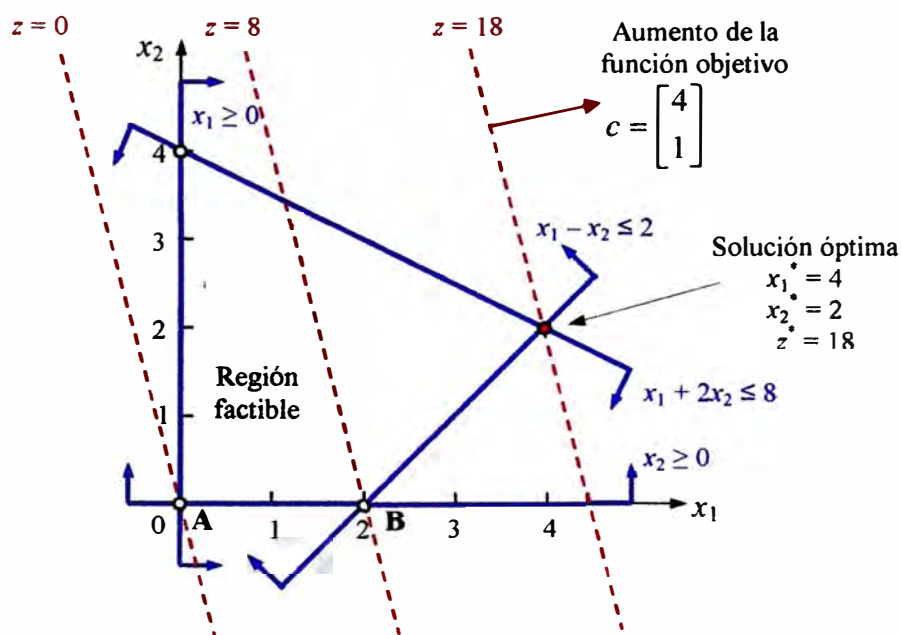


Fig. 3.1 Representación geométrica del ejemplo aplicativo de programación lineal.

La región factible del ejemplo es equivalente a la región de todos los puntos (x_1, x_2) que cumplen con las restricciones (R1), (R2) y (R3). En la Fig. 3.1 observa la región factible obtenida como la interior a las regiones formadas por cada restricción. Se observa que la restricción (R3) es equivalente a todos los puntos en el primer cuadrante.

El problema de programación lineal se puede resolver pensando en lo siguiente: se quiere

encontrar uno o más puntos dentro de la región factible tal que se obtenga el máximo valor de la función objetivo. Geométricamente se puede dibujar la función objetivo en el plano (x_1, x_2) para varios valores de z . De la figura se observa que los puntos A y B están contenidos en las rectas con $z = 0$ y $z = 8$, respectivamente. Como se observa, la función objetivo va aumentando en la dirección del vector c .

De la Fig. 3.1 se observa que el máximo valor que la función puede tomar es $z^* = 8$, donde $x_1^* = 4$ y $x_2^* = 2$. Esta es la solución óptima del problema, es única y cae en la frontera de la región factible. En programación lineal se puede demostrar que si existen soluciones óptimas, estas se encuentran contenidas en la frontera de la región factible.

3.1.4 Método SIMPLEX

Cuando se pretende resolver problemas con más de dos variables, la solución no se puede obtener mediante la representación gráfica. De esta forma se hace necesario aplicar otro procedimiento para la búsqueda de soluciones. En este sentido George B. Dantzig en 1947 desarrolló el universalmente conocido método SIMPLEX para la resolución de problemas de programación lineal [6].

La aplicación de este método comenzó a crecer con el aumento de la capacidad computacional de los computadores, permitiendo así la resolución de problemas con un creciente número de variables en un tiempo menor. Este método es iterativo, es decir, se basa en un algoritmo para obtener algebraicamente la solución óptima de un problema de programación lineal.

Dentro de las premisas de este método se tiene:

- ◆ El conjunto de todas las soluciones compatibles del modelo de programación lineal es un conjunto convexo cuyos vértices (también llamados puntos extremos) corresponden a las soluciones básicas factibles;
- ◆ Si la función objetivo posee un máximo (o mínimo) finito, entonces por lo menos la solución óptima es un punto extremo del conjunto convexo.

El proceso iterativo es convergente y busca los vértices del poliedro de restricciones, pasando en cada iteración de un vértice (solución básica factible) para otro vértice con valor asociado a la función objetivo mejor que la anterior.

En un número finito de iteraciones, el algoritmo alcanza:

- ◆ La solución óptima o soluciones óptimas, o
- ◆ La indicación que no existe la solución.

Como el método SIMPLEX garantiza que en cada iteración el valor asociado de la función

objetivo no será peor que el encontrado en el punto anterior, y como el número de vértices del poliedro es finito, la búsqueda de vértices sucesivos converge a un número finito de iteraciones [7].

Como el método SIMPLEX garantiza que en cada iteración el valor asociado de la función objetivo no será peor que el encontrado en el punto anterior, y como el número de vértices del poliedro es finito, la búsqueda de vértices sucesivos converge a un número finito de iteraciones.

En este trabajo no se pretende desarrollar el método SIMPLEX, pero a modo de introducción se puede decir que el método comprende de los siguientes pasos:

Paso 1: Encontrar una solución factible básica inicial;

Paso 2: Verificar si la solución actual es óptima. Si fuera, parar. Caso contrario siga para el Paso 3.

Paso 3: Determinar la variable no básica que debe entrar en la base.

Paso 4: Determinar la variable básica que debe salir de la base.

Paso 5: Encontrar una nueva solución factible básica, y regresar al Paso 2.

Aplicación al ejemplo aplicativo

Para explicar de alguna forma el método SIMPLEX con el ejemplo aplicativo, primero se representa en forma estándar el problema de programación lineal asignando a cada restricción (R1) y (R2) una variable adicional como lo siguiente:

$$\text{máx. } z = 4x_1 + x_2$$

sujeto a:

$$x_1 - x_2 + x_3 = 2 \quad (R1)$$

$$x_1 + 2x_2 + x_4 = 8 \quad (R2)$$

$$x_1, x_2, x_3, x_4 \geq 0 \quad (R3)$$

En la Fig. 3.2 se muestra el proceso de convergencia del método representado gráficamente para la búsqueda de la solución óptima.

El método SIMPLEX debe comenzar con una solución básica, la cual puede ser rápidamente vista en el origen (Punto A) donde x_1, x_2 son las variables no básicas (con valor cero) y x_3, x_4 son variables básicas (con valor mayor a cero). Desde el punto A el método SIMPLEX tiene dos opciones para moverse: ir al punto B con un valor de $z = 8$ o ir al punto C con un valor de $z = 4$. El método elige moverse donde existe el mayor incremento de la función objetivo, es decir, avanza hasta el punto B. En este punto la variable x_1 entra a la base y la variable x_3 sale de la base. Desde el punto B solo queda ir al

punto D, siempre verificando que exista un incremento de la función objetivo. En este punto la variable x_2 entra a la base y la variable x_4 sale de la base. Desde el punto D el método no va ir al punto C debido que verifica que la función objetivo no puede ser mejorada, así el método concluye que el punto D es la solución del problema.

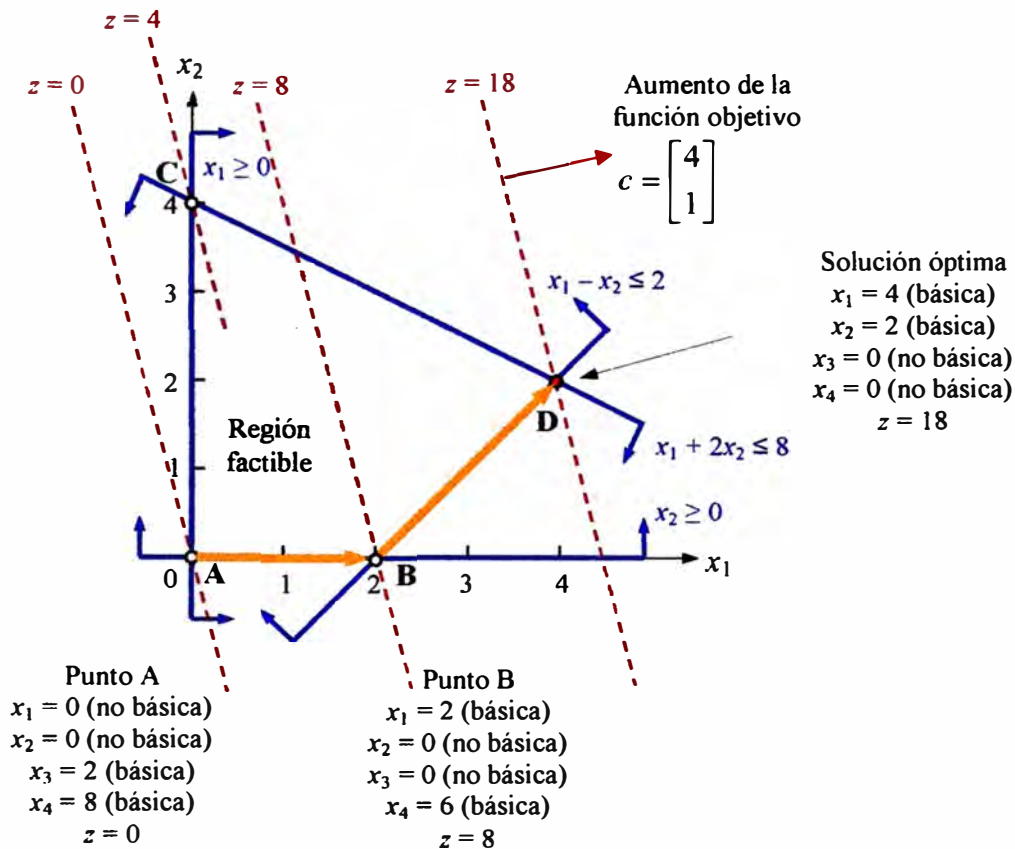


Fig. 3.2 Representación geométrica del proceso de búsqueda del método SIMPLEX para el ejemplo aplicativo de programación lineal.

3.2 Flujo de potencia óptimo

En los años 60 se dieron grandes avances en los métodos de optimización y su aplicación a diversos problemas de ingeniería. Dentro del área de sistemas de potencia esto se caracterizó por la definición de un concepto nuevo llamado “Flujo de Potencia Óptimo” (FPO), el cual se constituye como un problema de optimización no lineal, con modelo en régimen permanente, que estima los ajustes óptimos de diversas variables eléctricas teniendo en cuenta que deben ser cumplidas diversas condiciones de operación y límites de algunas variables.

La primera formulación matemática de un FPO fue presentada en 1962 por Carpentier, en el cual el problema fue resuelto por la aplicación de las condiciones de Karush-Kuhn-Tucker (KKT) [8]. En esa misma década, en 1968, Dommel y Tinney usaron el método del

gradiente reducido definiendo las variables de control del problema [9].

En la década de los 70's, varias mejoras fueron propuestas para las formulaciones originales y aquí se destaca la utilización de técnicas de programación lineal (optimización lineal) como lo realizado por Stott en [10]. En la década de los 80's se avanzó con la solución del problema de FPO usando métodos de segundo orden (método del Langrangeano aumentado proyectado) [11]. En la década de los 90's fue presentada la metodología de programación cuadrática secuencial usando técnicas de desacoplamiento de los subproblemas de potencia activa y reactiva. También en esta década el FPO fue modelado usando el método de puntos interiores [12] creado por Karmarkar.

3.2.1 Formulación matemática no lineal

La formulación genérica no lineal del problema de FPO para un sistema de potencia de nb barras es la siguiente:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & z = f(x, u) \\ \text{sujeto a:} \quad & \\ & g_P(x, u) = 0 \\ & g_Q(x, u) = 0 \\ & f(x, u) \leq 0 \end{aligned} \tag{3.3}$$

donde:

- x es el vector de variables de estado del sistema, es decir, módulos y ángulos de las tensiones en barras ($1 \times nx$);
- u es el vector de variables de control del sistema, por ejemplo: tensiones especificadas en las barras de generación, potencia activa de generación, capacitores shunt de barra, entre otros ($1 \times nu$);
- $f(x, u)$ es la función objetivo, por ejemplo: pérdidas eléctricas totales, costo total de combustible, entre otros (1×1);
- $g_P(x, u)$ es la función vectorial no lineal de restricciones de balance de potencia activa ($1 \times ngp$);
- $g_Q(x, u)$ es la función vectorial no lineal de restricciones de balance de potencia reactiva ($1 \times ngq$);
- $h(x, u)$ es la función vectorial no lineal de restricciones de desigualdad, por ejemplo: límites de tensiones en barras de carga, límites de potencia activa de generación, límites de flujo de potencia aparente de las líneas de transmisión, entre otras ($1 \times nh$).

El problema de optimización (3.3) representa lo siguiente: se desea encontrar un conjunto de variables de control u (variables independientes) tal que la función objetivo $f(x, u)$ sea mínima, además el vector de variables de estado x es dependiente de u (variables dependientes).

Existen actualmente diversas formulaciones del problema (3.3), las cuales depende del tipo de problema de optimización y de las exigencias de operación (restricciones de desigualdad) que se desean analizar. Dentro de estas formulaciones se pueden mencionar las siguientes características:

- ◆ El tipo de barra (*slack*, *PV*, *PQ*) de las formulaciones de flujo de potencia no lineal no definen los conjuntos de funciones de g_P y g_Q . Por ejemplo, en la formulación de flujo de potencia g_P debe ser definido para todas las barras excepto la barra *slack*, en cambio si el vector u contiene la potencia de generación de la barra *slack*, será necesario incluir el balance de potencia en la barra *slack* en g_P .
- ◆ Las restricciones de operación pueden definir los límites de todas las variables de estado x y de control u . Además, las restricciones operacionales pueden contener otras magnitudes que están en función de las variables x y u , por ejemplo, límites de flujo de potencia de las líneas de transmisión.

En este trabajo se optó por una formulación de FPO del tipo lineal, esto principalmente para asociar el modelo de flujo de potencia lineal o CC, que permite facilidad de formulación y obtención de resultados, y finalmente llegar a una estructura de optimización lineal, la cual permite alcanzar robustez en la obtención de soluciones de problemas para sistemas de gran porte (sistemas con cientos de variables).

3.2.2 Formulación matemática lineal

La formulación genérica de FPO no lineal (3.3) puede ser convertido en lineal utilizando el modelo de flujo de potencia lineal o CC. Para definir el FPO lineal las variables de estado se definen como $x = \theta$ y las variables de control como $u = P_g$, así la formulación puede ser expresada como:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & z = f(\theta, P_g) \\ \text{sujeto a:} \quad & g_P(\theta, P_g) = B'\theta - I_g P_g + P_c = 0 \\ & h(\theta, P_g) \leq 0 \\ & \theta, P_g \geq 0 \end{aligned} \tag{3.4}$$

donde:

- θ : es el vector de todos los ángulos de las tensiones en barras ($1 \times nb$), donde nb es el número total de barras;
- P_g : es el vector de potencias activas de generación ($1 \times ng$), incluyendo la barra *slack*, donde ng es el número total de generadores;
- $f(\theta, P_g)$: es la función objetivo lineal (1×1);
- $g_p(\theta, P_g)$: es la función vectorial lineal de restricciones de balance de potencia activa ($1 \times nb$);
- $h(\theta, P_g)$: es la función vectorial lineal de restricciones de desigualdad, por ejemplo: límites de potencia activa de generación, límites de flujo de potencia activa de las líneas de transmisión, entre otras ($1 \times nh$).
- P_c : es el vector de potencias activas de carga ($1 \times nb$), para las barras que no tienen carga el valor será cero;
- I_g : es la matriz de incidencia barras – generadores ($nb \times ng$), donde el elemento $I_g(i, j) = 1$ si el generador j está conectado en la barra i , en caso contrario $I_g(i, j) = 0$;

El problema de optimización (3.4) puede seruelto usando técnicas de programación lineal, como el método SIMPLEX. Otro aspecto importante es el hecho que en esta formulación el ángulo de tensión de la barra *slack* θ_{slack} no es definido constante. Puede ser demostrado que debido que todos los ángulos θ deben ser positivos, entonces al solucionar el problema de programación lineal (3.4) una barra k con el menor valor de ángulo en el sistema es elegida como la barra de referencia con $\theta_k = 0$.

3.3 Despacho económico lineal

Antes de definir el problema de despacho económico se revisaran algunos conceptos relacionados a los costos de producción de grupos térmicos.

3.3.1 Costos de producción

Los costos asociados de la producción de energía para un grupo térmico pueden ser clasificados en: costos de inversión, de combustible, y de operación y mantenimiento. En la perspectiva de la operación de un sistema de energía los costos más relevantes son los asociados al combustible utilizado en la producción de energía, por lo que estos costos serán utilizados en este trabajo.

Un grupo térmico de producción de energía eléctrica puede ser representado de la forma simplificada por el esquema presentado en la Fig. 3.3, donde se representa una caldera que

genera vapor para accionar un sistema acoplado de turbina y alternador [13].

La potencia generada por este sistema es suministrada a la red de energía eléctrica para satisfacción del consumo observado en cada momento, siendo una fracción destinada a alimentar los servicios auxiliares del propio grupo. Los valores típicos de consumo relativo de los servicios auxiliares son del orden de 2% a 6% de la producción bruta, que se destinan a alimentar las bombas de circulación de la caldera, las bombas de circulación de agua del condensador, entre otros consumos propios del grupo térmico. De este modo, se distingue que la potencia bruta está a la salida del alternador y la potencia líquida P es la que sale finalmente hacia la red.

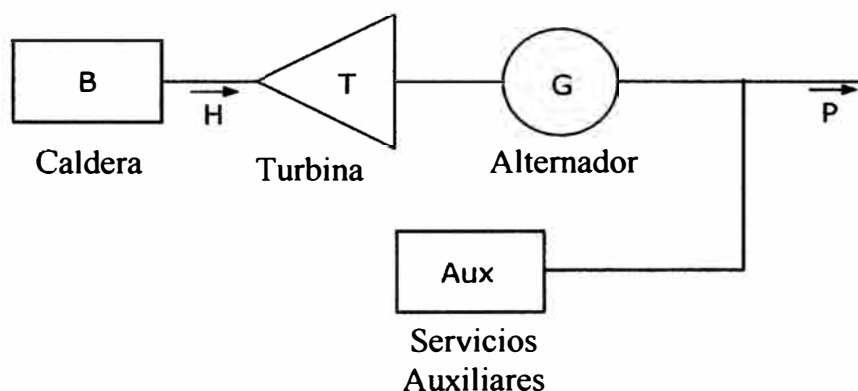


Fig. 3.3 Esquema representativo de un grupo térmico con caldera, turbina y alternador.

La función de costo de producción relativa al grupo térmico está relacionada al combustible quemado de acuerdo a la siguiente expresión:

$$F(P_{g,i}) = a_i + b_i P_{g,i}^2 + c_i P_{g,i} \quad (3.5)$$

donde

- a_i : es el costo fijo del uso de combustible del grupo i , en US \$/h;
- b_i : es el costo del uso de combustible asociado al cuadrado de la potencia generada del grupo i , en US \$/MW²h;
- c_i : es el costo incremental o del uso de combustible del grupo i , en US \$/MWh;
- $P_{g,i}$: es la potencia activa generada por el grupo i , en MW.

Se observa que el costo de producción es una función continua y convexa determinada por la expresión (3.5) evaluada por las potencias comprendidas entre los límites técnicos mínimo y máximo de operación del grupo i ($P_{\min-g,i} \leq P_{g,i} \leq P_{\max-g,i}$).

El costo de producción es una medida integral pues indica el costo total de producir una

determinada cantidad de energía. Otra medida de gran utilidad en la operación económica óptima de un sistema térmico es el costo marginal.

El costo marginal de producción es el costo asociado a la última unidad producida (unidad marginal) y es dado matemáticamente por la derivada de la función de costo total. El costo marginal del grupo i asociado a la expresión de costo en (3.5) es dado por:

$$\frac{dF(P_{g,i})}{dP_{g,i}} = 2b_i P_{g,i} + c_i. \quad (3.6)$$

La función de costo de producción de forma lineal es obtenida asumiendo $b_i = 0$, en la expresión (3.4), entonces el costo marginal del grupo i será igual a c_i .

3.3.2 Definición de despacho económico

Considere un sistema de generación como el representado en la Fig. 3.4 constituido por n grupos térmicos conectados a una barra en común y que satisfacen el consumo total del sistema (P_{carga}). La potencia de salida de cada grupo es dada por $P_{g,i}$ y el costo asociado a ese valor de potencia es F_i .

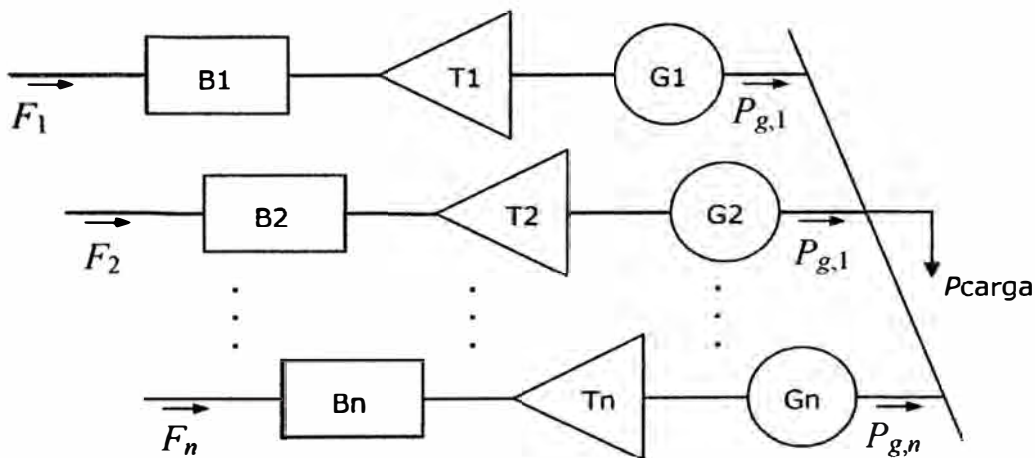


Fig. 3.4 Sistema de generación con n grupos que alimentan una carga.

El problema de despacho económico consiste en determinar el perfil óptimo de producción de los grupos de forma a minimizar el costo total de producción ($F_T = F_1 + F_2 + \dots + F_n$) y teniendo en consideración la satisfacción del consumo y los límites técnicos de operación de los grupos térmicos.

El problema de despachar grupos térmicos e hidráulicos es conocido como coordinación hidrotérmica, el cual no será abordado en este trabajo.

La formulación de despacho económico puede ser convertida en lineal utilizando el modelo de flujo de potencia lineal o CC e incorporando la red de transmisión

conjuntamente con la restricciones de operación de la red (a parte de los grupos térmicos).

3.3.3 Formulación de despacho económico lineal en FPO

El despacho económico lineal puede ser representado como un FPO lineal como lo mostrado en la formulación (3.4) usando la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 \text{Min} \quad & z = c^t P_g \\
 \text{sujeto a:} \quad & \\
 & g_P(\theta, P_g) = 100 \times B^t \theta - I_g P_g + P_c = 0 \\
 & P_g - P_{\max-g} \leq 0 \\
 & P_{\min-g} - P_g \leq 0 \\
 & I_\theta \theta - \varphi_{\max} \leq 0 \\
 & -I_\theta \theta - \varphi_{\max} \leq 0 \\
 & \theta, P_g \geq 0
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

donde:

- θ : es el vector de todos los ángulos de las tensiones en barras ($1 \times nb$) en radianes, donde nb es el número total de barras;
- P_g : es el vector de potencias activas de generación térmica ($1 \times ng$) en MW, incluyendo la barra *slack* si fuese el caso, donde ng es el número total de generadores;
- c : es el vector de costos incrementales de generación térmica ($1 \times ng$) en US \$/MWh;
- $g_P(\theta, P_g)$: es la función vectorial lineal de restricciones de balance de potencia activa del modelo de flujo de potencia lineal ($1 \times nb$), incluyendo la barra *slack*;
- B' : es una matriz tipo susceptancia nodal ($nb \times nb$) en p.u., como definido en el Capítulo 2;
- I_g : es la matriz de incidencia barras – generadores ($nb \times ng$), donde el elemento $I_g(i, j) = 1$ si el generador j está conectado en la barra i , en caso contrario $I_g(i, j) = 0$;
- P_c : es el vector de potencias activas de carga ($1 \times nb$) en MW, para las barras que no tienen carga el valor será cero;
- $P_{\max-g}$: es el vector de potencias activas máximas de generación térmica ($1 \times ng$) en MW;
- $P_{\min-g}$: es el vector de potencias activas mínimas de generación térmica ($1 \times ng$)

- en MW;
- I_θ es la matriz de incidencia ramas – barras ($nr \times nb$), nr es el número total de ramas (líneas de transmisión y transformadores), donde el elemento $I_\theta(r, i) = 1$ para la barra inicial i de la rama r , $I_\theta(r, i) = -1$ para la barra final i de la rama r , en caso contrario $I_\theta(r, i) = 0$;
- φ_{\max} es el vector de abertura angular máxima de todas las ramas ($1 \times nr$) en radianes, también $\varphi_{\max}(r) = 0.01 \times x_{ij} f_{\max,ij}$ donde r es una rama con barra inicial i y barra final j , x_{ij} es la reactancia de la rama r en p.u., y $f_{\max,ij}$ es el flujo máximo de potencia activa en la rama r en MW.

El problema de optimización (3.6) tiene una g_p con el término $B'\theta$ multiplicado por 100 para transformar valores de p.u. a MW. Análogamente $f_{\max,ij}$ es multiplicado por 0.01 para transformar valores de MW a p.u.

De la formulación anterior se puede observar que fueron incluidos los límites de potencia activa de generación máxima y mínima. Es importante resaltar que P_g es definido para los generadores de centrales térmicas, es decir, los generadores de centrales hidroeléctricas se suponen con un valor definido antes del despacho. Los valores de estos generadores son sumados algebraicamente en el vector P_c con valores negativos.

Es importante mencionar que la formulación (3.7) contiene restricciones en los flujos de potencia activa en las líneas de transmisión que son colocados en función de aberturas angulares máximas para evitar definir nuevas variables en la formulación. Existen dos restricciones para los flujos de potencia activas, esto para limitar el flujo en el sentido de barra i hacia barra j e inverso. También, estas restricciones de flujos de potencia en las líneas de transmisión incorporan el problema de congestión a la formulación de despacho económico lineal.

3.3.4 Ejemplo aplicativo 1 – despacho económico sin congestión – sistema 3 barras

A modo de ejemplo, se usa el sistema de 3 barras mostrado en el Capítulo II para resolver el problema de despacho económico considerando esta vez que los generadores en las barras 1 y 2 no tienen especificadas sus potencias activas de generación.

En la Fig. 3.5 se muestra el sistema de 3 barras con los datos para despacho económico. El generador 1 usa carbón con un costo incremental de combustible $c_1 = 15$ US \$/MWh menor que el generador 2, el cual usa gas con un costo incremental de combustible $c_2 = 22$ US \$/MWh. Todas las líneas de transmisión tienen un límite de flujo de potencia activa

máximo de $f_{\max, ij} = 100$ MW, en ambos sentidos de flujo.

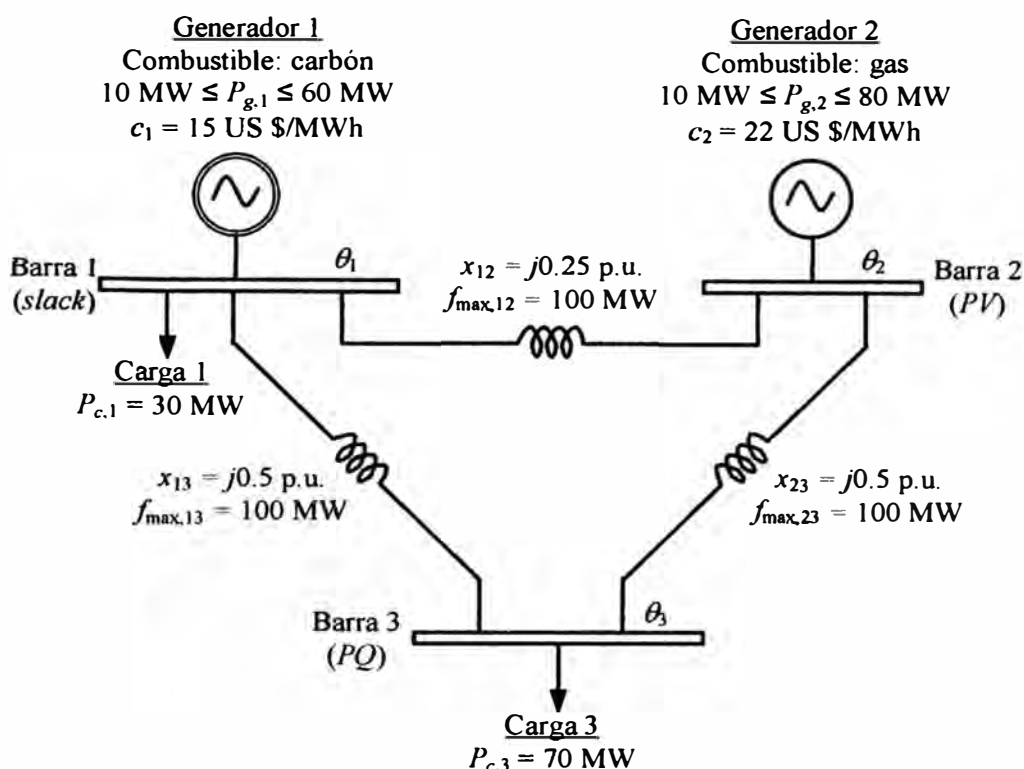


Fig. 3.5 Datos para despacho económico del sistema de 3 barras.

El problema de despacho económico considera las siguientes variables: $\theta_1, \theta_2, \theta_3, P_{g,1}, P_{g,2}$. Como lo dicho anteriormente, θ_1 no es considerada una constante a pesar que es el ángulo de la barra *slack* del sistema. Las máximas aberturas angulares en las líneas son: $\varphi_{\max, 12} = 0.25 \text{ rad.}$ y $\varphi_{\max, 13} = \varphi_{\max, 13} = 0.50 \text{ rad.}$, debido a que los flujos máximos son 1 p.u. en todas las líneas. La formulación de despacho económico del ejemplo aplicativo es expresada de la siguiente forma:

$$\text{Min} \quad z = 15P_{g,1} + 22P_{g,2}$$

sujeto a:

$$g_P(\theta, P_g) = 100 \times \begin{bmatrix} +6 & -4 & -2 \\ -4 & +6 & -2 \\ -2 & -2 & +4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} P_{g,1} \\ P_{g,2} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 30 \\ 0 \\ 70 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$P_{g,1} - 60 \leq 0$$

$$10 - P_{g,1} \leq 0$$

$$P_{g,2} - 80 \leq 0$$

$$10 - P_{g,2} \leq 0$$

$$(\theta_1 - \theta_2) - 0.25 \leq 0$$

$$(\theta_2 - \theta_3) - 0.5 \leq 0$$

$$(\theta_1 - \theta_3) - 0.5 \leq 0$$

$$\begin{aligned}
-(\theta_1 - \theta_2) - 0.25 &\leq 0 \\
-(\theta_1 - \theta_3) - 0.5 &\leq 0 \\
-(\theta_2 - \theta_3) - 0.5 &\leq 0 \\
\theta_1, \theta_2, \theta_3, P_{g,1}, P_{g,2} &\geq 0
\end{aligned}$$

El problema de programación lineal anterior puede ser resuelto a través de técnicas como el SIMPLEX. En este trabajo se usa el toolbox de optimización de programa MATLAB, específicamente la función `linprog` que resuelve problemas de programación lineal de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
\min_x \quad & f^T x \quad \text{such that} \quad A \cdot x \leq b \\
& Aeq \cdot x = beq \\
& lb \leq x \leq ub
\end{aligned}$$

Para mayores detalles acerca de esta función de MATLAB ver el manual del toolbox de optimización [14].

En la Fig. 3.6 se muestra la solución del problema de despacho económico del sistema de 3 barras. Se observa que todos los flujos de potencia activa en las líneas de transmisión están dentro de los límites (menor a 100 MW), por lo tanto no existe congestión.

Se observa que la solución del despacho económico equivale a despachar al máximo de potencia el generador 1 de carbón ($P_{g,1} = P_{\max-g,1} = 60$ MW) en vez que el generador 2 de gas debido que el costo incremental del generador 1 ($c_1 = 15$ US \$/MWh) es menor que del generador 2 ($c_2 = 22$ US \$/MWh). Al no poder despachar más de su potencia máxima el generador 1, el generador 2 despacha lo restante ($P_{g,2} = 40$ MW) para cubrir la demanda total de carga de 100 MW. El costo total de operación del sistema llega a 1780 US \$/h.

Otro aspecto importante para reconocer en la solución óptima son los multiplicadores de Lagrange asociados a las ecuaciones de balance de potencia activa por barra (λ_{p_i} , donde $i = 1, 2, 3$), los cuales tienen una interpretación particular. En la solución del sistema se cumple lo siguiente:

- ◆ El sistema tiene λ_{p_i} en todas las barras iguales al costo marginal del generador 2, es decir, $\lambda_{p_i} = c_2 = 22$ US \$/MWh, para $i = 1, 2, 3$. Un punto importante es que esta solución no presenta congestión en la red eléctrica debido que los flujos de potencia activa son menores a sus valores máximos. Bajo esta situación, se dice que el sistema tiene un costo marginal λ_{sis} igual a c_2 . En la práctica comúnmente se entiende lo anterior como lo siguiente: el generador 2 es el último en completar el despacho, por ser el más caro, entonces este generador es el que “margina” o hace que el costo

marginal del sistema sea igual a su costo incremental de producción.

- ◆ El costo marginal de producción del generador 1 es igual a $dF_1/dP_{g,1} = c_1$ y menor que λ_{sis} . ($dF_1/dP_{g,1} < \lambda_{sis}$). Esta solución puede interpretarse como sigue: si el costo marginal de producción de un grupo generador es menor que el costo marginal del sistema, entonces este generador alcanzó su límite máximo.
- ◆ Como todos los ángulos θ deben ser positivos, entonces al solucionar el problema de programación lineal la barra 3, con el menor valor de ángulo en el sistema, es elegida como la barra de referencia con $\theta_3 = 0$.

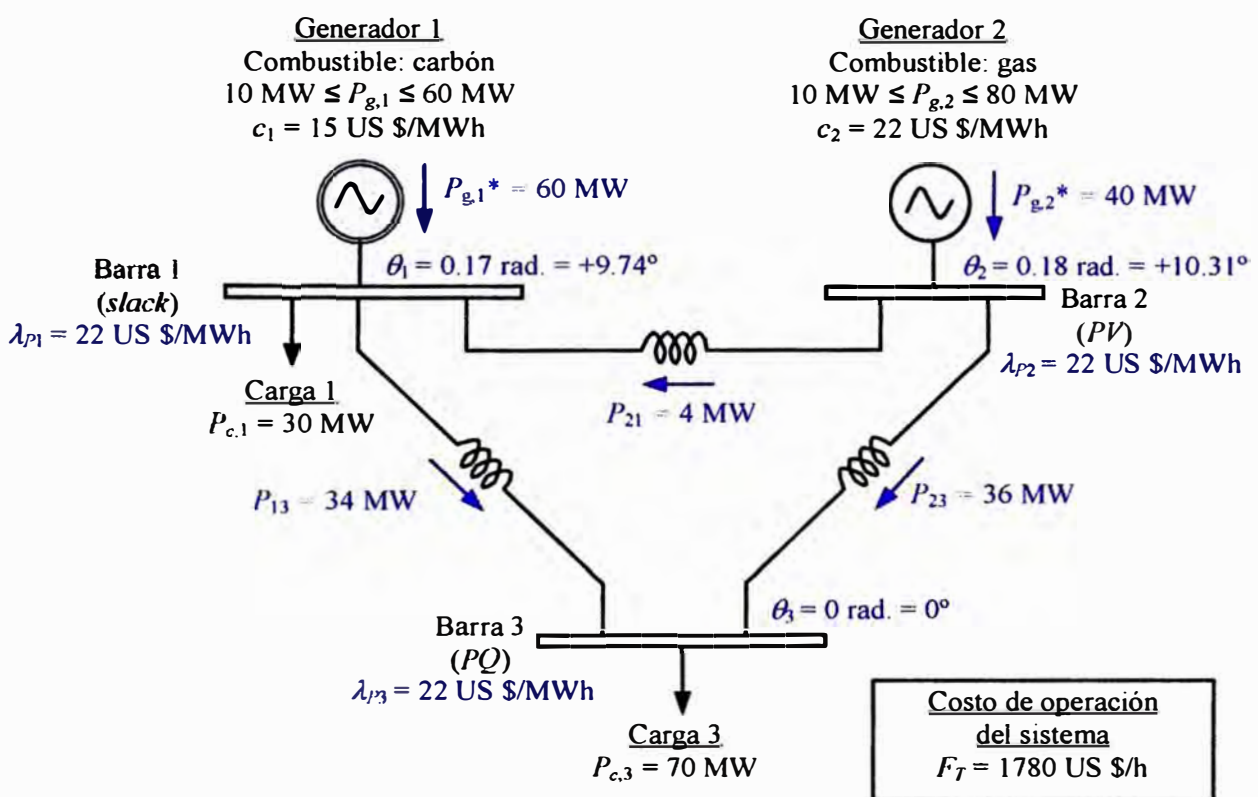


Fig. 3.6 Solución del despacho económico sin congestión del sistema de 3 barras.

3.3.5 Ejemplo aplicativo 2 – despacho económico con congestión – sistema 3 barras

Dentro del ejemplo aplicativo 1, esta vez el límite de flujo máximo de potencia activa viene a ser $f_{\max, 13} = 30 \text{ MW}$. Todos los costos incrementales de combustible de los generadores 1 y 2 se mantienen, así como los límites de potencia activa.

En la Fig. 3.7 se muestra la solución del problema de despacho económico del sistema de 3 barras. Se observa que no todos los flujos de potencia activa en las líneas de transmisión están dentro de los límites, porque la línea 1-3 tiene el flujo de potencia activa en su máximo valor (30 MW), por lo tanto existe congestión.

Se observa que la solución del despacho económico equivale a despachar al máximo de potencia el generador 1 de carbón en vez que el generador 2 de gas. Al no poder despachar más de 40 MW el generador 1 debido a la congestión de la línea 1-3, el generador 2 despacha lo restante ($P_{g,2} = 60$ MW) para cubrir la demanda total de carga de 100 MW.

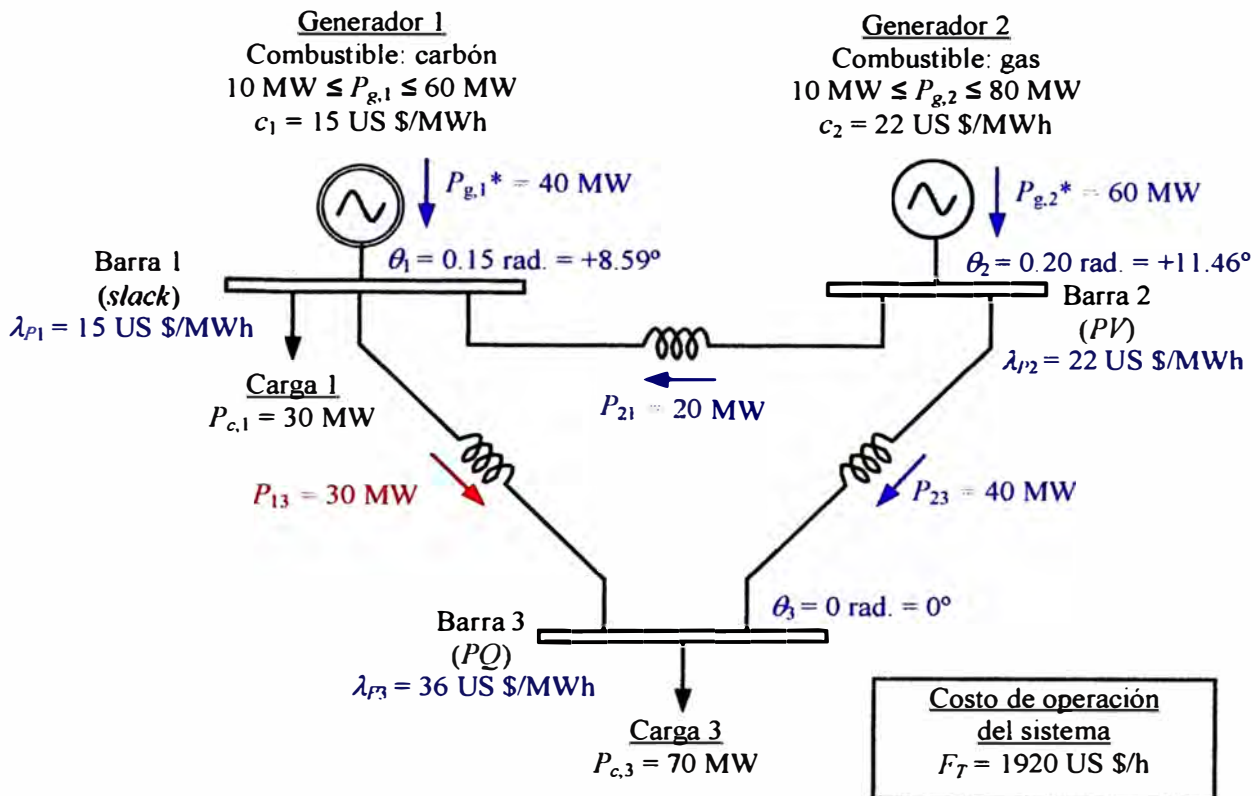


Fig. 3.7 Solución del despacho económico con congestión del sistema de 3 barras.

El costo total de operación del sistema llega a 1920 US \$/h, mayor que el caso sin congestión.

Otro aspecto importante para reconocer en la solución óptima son los multiplicadores de Lagrange asociados a las ecuaciones de balance de potencia activa por barra. En la solución del sistema se cumple lo siguiente:

- ♦ El sistema tiene λ_{p_i} en todas las barras diferentes debido que existe congestión. Para las barras de generación los λ_{p_i} son iguales a los costos marginales de combustible en cada caso, es decir, para el generador 1 se tiene $\lambda_{p1} = c_1 = 15 \text{ US } \$/\text{MWh}$ y para el generador 2 se tiene $\lambda_{p2} = c_2 = 22 \text{ US } \$/\text{MWh}$. El λ_{p2} acumula el efecto de la congestión en los costos de potencia en la barra 3.
- ♦ Como todos los ángulos θ deben ser positivos, entonces al solucionar el problema de programación lineal la barra 3, con el menor valor de ángulo en el sistema, es elegida

como la barra de referencia con $\theta_3 = 0$. Este caso puede verse similar al ejemplo aplicativo del Capítulo II, con la diferencia que estos son diferentes en los valores de los ángulos de barra.

3.4 Despacho económico lineal con restricciones ambientales

Actualmente es importante llevar en cuenta el impacto ambiental en las diversas actividades en el sector eléctrico, así dentro del modelo de despacho económico lineal pueden ser incluidas las restricciones ambientales en función de las emisiones de contaminantes de cada generador. Estos datos de emisiones serán los que se manejan a nivel internacional [15].

Para el desarrollo de un despacho económico considerando aspectos ambientales se considera la emisión contaminante de CO₂ de los grupos generadores. La función de emisiones de CO₂ relativa al grupo térmico está relacionada al combustible quemado de acuerdo a la siguiente expresión:

$$E(P_{g,i}) = d_i + f_i P_{g,i}^2 + e_i P_{g,i} \quad (3.8)$$

donde

- d_i : es la emisión fija de CO₂ por el uso de combustible del grupo i , en kg-CO₂/h;
- b_i : es la emisión de CO₂ por el uso de combustible asociado al cuadrado de la potencia generada del grupo i , en kg-CO₂/MW²h;
- c_i : es la emisión incremental de CO₂ por el uso de combustible del grupo i , en kg-CO₂/MWh;
- $P_{g,i}$: es la potencia activa generada por el grupo i , en MW.

Se observa que la emisión de CO₂ es una función continua y convexa determinada por la expresión (3.8) evaluada por las potencias comprendidas entre los límites técnicos mínimo y máximo de operación del grupo i ($P_{\min-g,i} \leq P_{g,i} \leq P_{\max-g,i}$).

La emisión marginal de producción es la emisión asociada a la última unidad producida (unidad marginal) y es dado matemáticamente por la derivada de la función de emisión total. La emisión marginal del grupo i asociado a la expresión de emisión en (3.5) es dado por:

$$\frac{dE(P_{g,i})}{dP_{g,i}} = 2f_i P_{g,i} + e_i \quad (3.9)$$

La función de emisión de CO₂ de producción de forma lineal es obtenida asumiendo $f_i = 0$, en la expresión (3.7), entonces la emisión marginal del grupo i será igual a e_i .

3.4.1 Formulación FPO del despacho ambiental

Antes de considerar las restricciones ambientales en el problema de despacho económico, es de utilidad tener como resultado el despacho ambiental. El despacho ambiental lineal puede ser representado como un FPO lineal como lo mostrado en la formulación (3.7) usando la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 \text{Min} \quad & z = e' P_g \\
 \text{sujeto a:} \quad & \\
 & g_P(\theta, P_g) = 100 \times B' \theta - I_g P_g + P_c = 0 \\
 & P_g - P_{\max-g} \leq 0 \\
 & P_{\min-g} - P_g \leq 0 \\
 & I_\theta \theta - \varphi_{\max} \leq 0 \\
 & -I_\theta \theta - \varphi_{\max} \leq 0 \\
 & \theta, P_g \geq 0
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

donde:

- θ : es el vector de todos los ángulos de las tensiones en barras ($1 \times nb$) en radianes, donde nb es el número total de barras;
- P_g : es el vector de potencias activas de generación térmica ($1 \times ng$) en MW, incluyendo la barra *slack* si fuese el caso, donde ng es el número total de generadores;
- e : es el vector de emisiones incrementales de CO₂ de generación térmica ($1 \times ng$) en kg-CO₂/MWh;
- $g_P(\theta, P_g)$: es la función vectorial lineal de restricciones de balance de potencia activa del modelo de flujo de potencia lineal ($1 \times nb$), incluyendo la barra *slack*;
- B' : es una matriz tipo susceptancia nodal ($nb \times nb$) en p.u., como definido en el Capítulo 2;
- I_g : es la matriz de incidencia barras – generadores ($nb \times ng$), donde el elemento $I_g(i, j) = 1$ si el generador j está conectado en la barra i , en caso contrario $I_g(i, j) = 0$;
- P_c : es el vector de potencias activas de carga ($1 \times nb$) en MW, para las barras que no tienen carga el valor será cero;
- $P_{\max-g}$: es el vector de potencias activas máximas de generación térmica ($1 \times ng$) en MW;

- $P_{\min-g}$: es el vector de potencias activas mínimas de generación térmica ($1 \times ng$) en MW;
- I_{θ} : es la matriz de incidencia ramas – barras ($nr \times nb$), nr es el número total de ramas (líneas de transmisión y transformadores), donde el elemento $I_{\theta}(r, i) = 1$ para la barra inicial i de la rama r , $I_{\theta}(r, i) = -1$ para la barra final i de la rama r , en caso contrario $I_{\theta}(r, i) = 0$;
- φ_{\max} : es el vector de abertura angular máxima de todas las ramas ($1 \times nr$) en radianes, también $\varphi_{\max}(r) = 0.01 \times x_{ij} f_{\max,ij}$ donde r es una rama con barra inicial i y barra final j , x_{ij} es la reactancia de la rama r en p.u., y $f_{\max,ij}$ es el flujo máximo de potencia activa en la rama r en MW.

Es importante mencionar que la formulación (3.10) es similar a la formulación (3.7) con excepción que la función de costos es cambiada por la función de emisiones de CO₂.

3.4.2 Ejemplo aplicativo 3 – despacho ambiental – sistema 3 barras

A modo de ejemplo, se usa el sistema de 3 barras mostrado en el Capítulo II para resolver el problema de despacho ambiental considerando esta vez que los generadores en las barras 1 y 2 no tienen especificadas sus potencias activas de generación.

En la Fig. 3.8 se muestra el sistema de 3 barras con los datos para despacho ambiental.

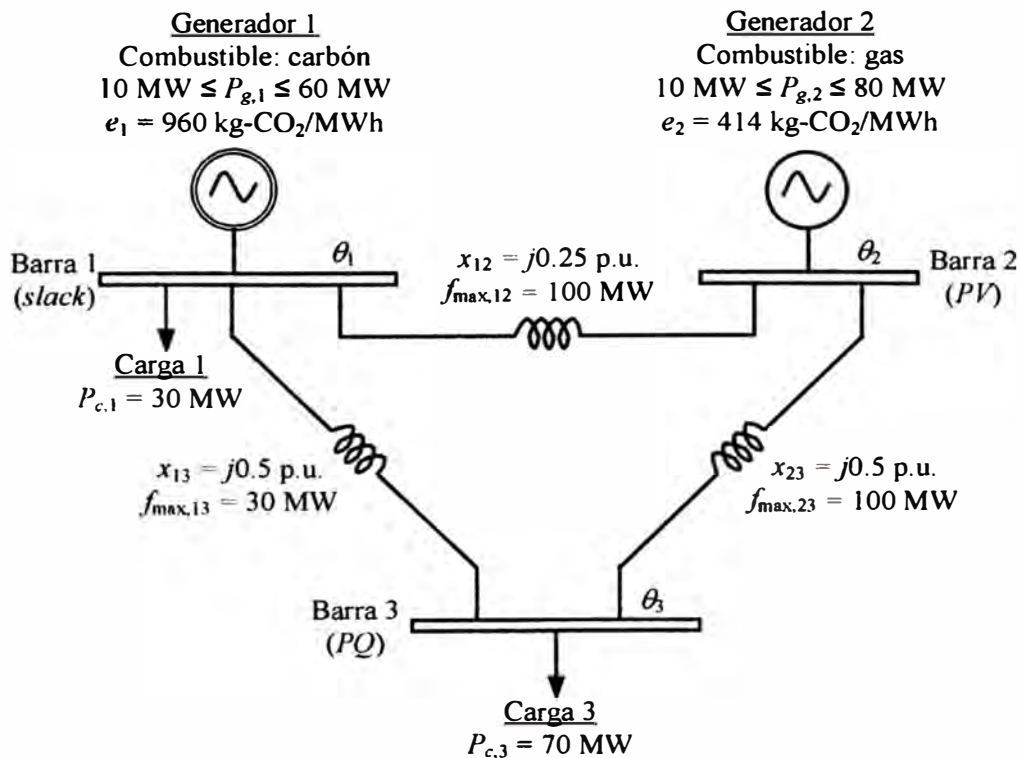


Fig. 3.8 Datos para despacho ambiental del sistema de 3 barras.

El generador 1 usa carbón con una emisión incremental de $e_1 = 960$ kg-CO₂/MWh mayor que el generador 2, el cual usa gas con una emisión incremental de $e_2 = 414$ US \$/MWh. Todas las líneas tienen un límite de flujo de potencia activa máximo de $f_{\max,ij} = 100$ MW, en ambos sentidos de flujo, excepto en la línea 1-3 que viene a ser $f_{\max,13} = 30$ MW (similar a ejemplo aplicativo 2).

El problema de despacho ambiental considera las siguientes variables: $\theta_1, \theta_2, \theta_3, P_{g,1}, P_{g,2}$. Las máximas aberturas angulares en las líneas son similares al problema de despacho económico con congestión. La formulación de despacho ambiental del ejemplo aplicativo es expresada de la siguiente forma:

$$\text{Min} \quad z = 960P_{g,1} + 414P_{g,2}$$

sujeto a:

$$g_P(\theta, P_g) = 100 \times \begin{bmatrix} +6 & -4 & -2 \\ -4 & +6 & -2 \\ -2 & -2 & +4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} P_{g,1} \\ P_{g,2} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 30 \\ 0 \\ 70 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$P_{g,1} - 60 \leq 0$$

$$10 - P_{g,1} \leq 0$$

$$P_{g,2} - 80 \leq 0$$

$$10 - P_{g,2} \leq 0$$

$$(\theta_1 - \theta_2) - 0.25 \leq 0$$

$$(\theta_1 - \theta_3) - 0.15 \leq 0$$

$$(\theta_2 - \theta_3) - 0.5 \leq 0$$

$$-(\theta_1 - \theta_2) - 0.25 \leq 0$$

$$-(\theta_1 - \theta_3) - 0.15 \leq 0$$

$$-(\theta_2 - \theta_3) - 0.5 \leq 0$$

$$\theta_1, \theta_2, \theta_3, P_{g,1}, P_{g,2} \geq 0$$

En la Fig. 3.9 se muestra la solución del problema de despacho ambiental del sistema de 3 barras. Se observa que todos los flujos de potencia activa en las líneas de transmisión están dentro de los límites, por lo tanto no existe congestión.

Se observa que la solución del despacho ambiental equivale a despachar al máximo de potencia el generador 2 de gas ($P_{g,2} = P_{\max-g,2} = 80$ MW) en vez que el generador 1 de carbón debido que la emisión incremental del generador 1 ($e_1 = 960$ kg-CO₂/MWh) es mayor que del generador 2 ($e_2 = 414$ kg-CO₂/MWh). Al no poder despachar más de su potencia máxima el generador 2, el generador 1 despacha lo restante ($P_{g,1} = 20$ MW) para cubrir la demanda total de carga de 100 MW. La emisión total de operación del sistema

llega a 52 320 kg-CO₂/h.

Otro aspecto importante para reconocer en la solución óptima son los multiplicadores de Lagrange, los cuales tienen una interpretación particular similar al despacho económico.

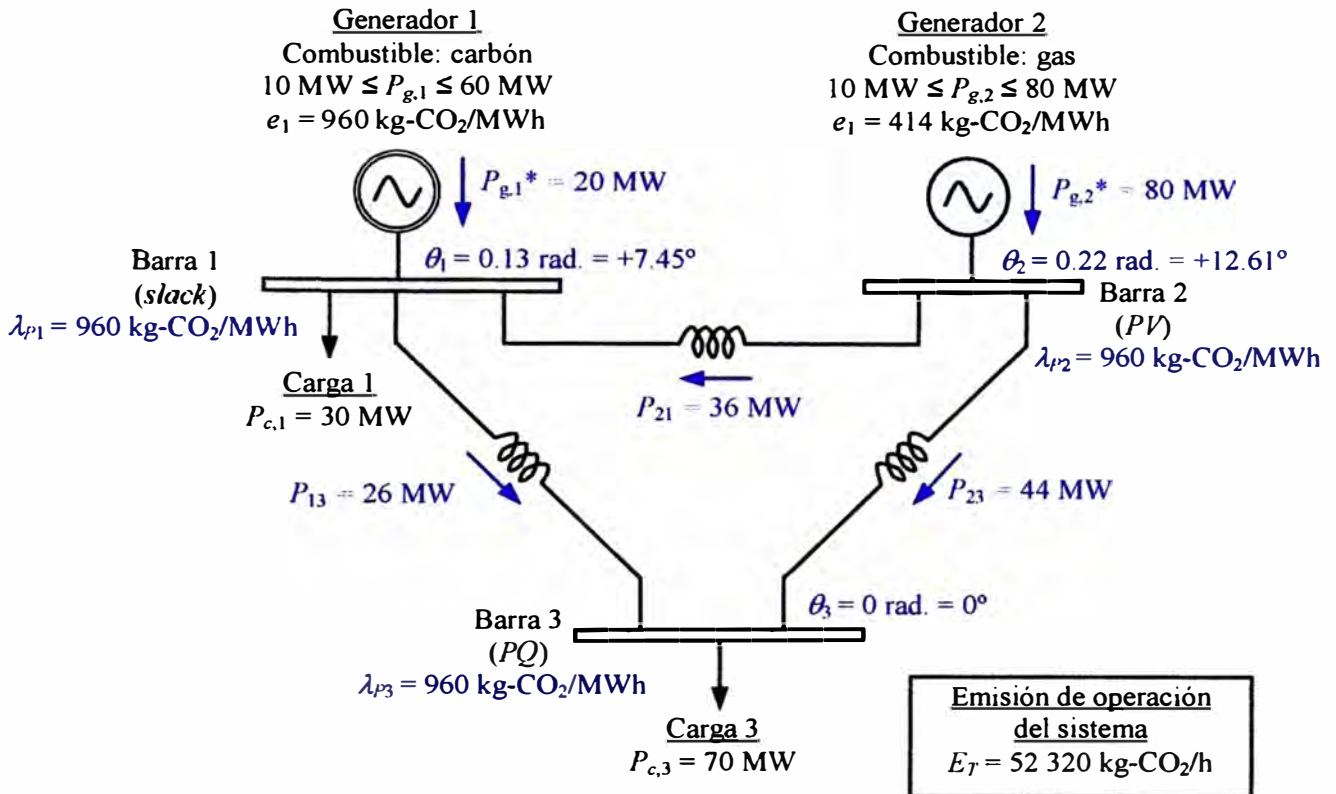


Fig. 3.9 Solución del despacho ambiental del sistema de 3 barras.

En la solución del sistema se cumple lo siguiente:

- ♦ El sistema tiene λ_{p_i} en todas las barras iguales a la emisión marginal del generador 1, es decir, $\lambda_{p_i} = e_1 = 960 \text{ kg-CO}_2/\text{MWh}$, para $i = 1, 2, 3$. Un punto importante es que esta solución no presenta congestión en la red eléctrica debido que los flujos de potencia activa menores a sus valores máximos. Bajo esta situación, se dice que el sistema tiene una emisión marginal λ_{sis} igual a e_1 .
- ♦ La emisión marginal del generador 2 es igual a $dE_2/dP_{g,2} = e_2$ y menor que λ_{sis} . ($dE_2/dP_{g,2} < \lambda_{sis}$). Esta solución puede interpretarse como sigue: si la emisión marginal de un grupo generador es menor que la emisión marginal del sistema, entonces este generador alcanzó su límite máximo.

3.4.3 Formulación FPO con restricciones ambientales

El modelo de despacho económico lineal con restricciones ambientales fue tomado de la referencia [16]. Este modelo presenta una formulación similar a (3.7), pero se adiciona una

restricción para limitar la emisión total de contaminantes. En este caso se usa la siguiente formulación:

$$\begin{aligned}
 \text{Min} \quad & z = c' P_g \\
 \text{sujeto a:} \quad & \\
 & g_p(\theta, P_g) = 100 \times B' \theta - I_g P_g + P_c = 0 \\
 & P_g - P_{\max-g} \leq 0 \\
 & P_{\min-g} - P_g \leq 0 \\
 & I_\theta \theta - \varphi_{\max} \leq 0 \\
 & -I_\theta \theta - \varphi_{\max} \leq 0 \\
 & e' P_g \leq E_{\max} \\
 & \theta, P_g \geq 0
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

donde:

- θ : es el vector de todos los ángulos de las tensiones en barras ($1 \times nb$) en radianes, donde nb es el número total de barras;
- P_g : es el vector de potencias activas de generación térmica ($1 \times ng$) en MW, incluyendo la barra *slack* si fuese el caso, donde ng es el número total de generadores;
- c : es el vector de costos incrementales de generación térmica ($1 \times ng$) en US \$/MWh;
- $g_p(\theta, P_g)$: es la función vectorial lineal de restricciones de balance de potencia activa del modelo de flujo de potencia lineal ($1 \times nb$), incluyendo la barra *slack*;
- B' : es una matriz tipo susceptancia nodal ($nb \times nb$) en p.u., como definido en el Capítulo 2;
- I_g : es la matriz de incidencia barras – generadores ($nb \times ng$), donde el elemento $I_g(i, j) = 1$ si el generador j está conectado en la barra i , en caso contrario $I_g(i, j) = 0$;
- P_c : es el vector de potencias activas de carga ($1 \times nb$) en MW, para las barras que no tienen carga el valor será cero;
- $P_{\max-g}$: es el vector de potencias activas máximas de generación térmica ($1 \times ng$) en MW;
- $P_{\min-g}$: es el vector de potencias activas mínimas de generación térmica ($1 \times ng$) en MW;

I_θ	es la matriz de incidencia ramas – barras ($nr \times nb$), nr es el número total de ramas (líneas de transmisión y transformadores), donde el elemento $I_\theta(r, i) = 1$ para la barra inicial i de la rama r , $I_\theta(r, i) = -1$ para la barra final i de la rama r , en caso contrario $I_\theta(r, i) = 0$;
φ_{\max}	es el vector de abertura angular máxima de todas las ramas ($1 \times nr$) en radianes, también $\varphi_{\max}(r) = 0.01 \times x_{ij} f_{\max,ij}$ donde r es una rama con barra inicial i y barra final j , x_{ij} es la reactancia de la rama r en p.u., y $f_{\max,ij}$ es el flujo máximo de potencia activa en la rama r en MW.
e	es el vector de emisiones incrementales de CO ₂ de generación térmica ($1 \times ng$) en kg-CO ₂ /MWh;
E_{\max}	es el valor máximo de la emisión total de contaminantes en el sistema, en kg-CO ₂ /MWh.

Es importante mencionar que el valor de E_{\max} de la formulación (3.11) puede ser definido como un valor intermedio entre las emisiones totales del despacho económico y despacho ambiental. Este valor es definido a partir de las políticas de protección del medio ambiental con el objetivo de disminuir los contaminantes del sistema.

3.4.4 Ejemplo aplicativo 4 – despacho económico con restricciones ambientales – sistema 3 barras

A modo de ejemplo, se usa el sistema de 3 barras mostrado anteriormente. En la Fig. 3.10 se muestra el sistema de 3 barras con los datos para despacho económico y ambiental a la vez, usando los datos de los ejemplos aplicativos anteriores.

Para la definición de E_{\max} se tomaron en cuenta las soluciones del despacho económico y ambiental por separado de la siguiente forma:

- ◆ Despacho económico: $F_T = 1920$ US \$/h, $E_T = 63\ 240$ kg-CO₂/h.
- ◆ Despacho ambiental: $F_T = 2060$ US \$/h, $E_T = 52\ 320$ kg-CO₂/h.

Se puede observar que E_{\max} no podría ser menor que el valor de despacho ambiental y no mayor que el valor del despacho económico ($52\ 320$ kg-CO₂/h $< E_{\max} < 63\ 240$ kg-CO₂/h). Se eligió el valor de $E_{\max} = 55\ 000$ kg-CO₂/h.

El problema de despacho económico con restricciones ambientales considera las siguientes variables: $\theta_1, \theta_2, \theta_3, P_{g,1}, P_{g,2}$. Las máximas aberturas angulares en las líneas son similares al problema de despacho económico con congestión.

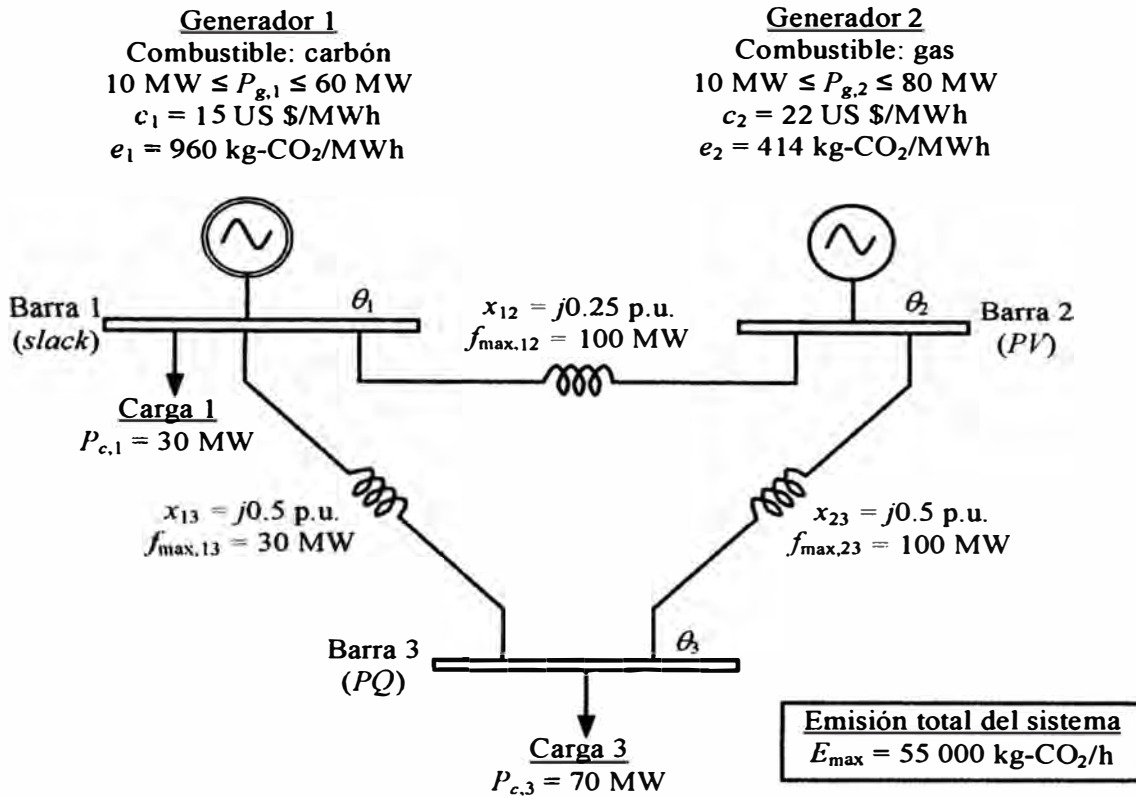


Fig. 3.10 Datos para despacho económico y ambiental del sistema de 3 barras.

La formulación de despacho económico con restricciones ambientales del ejemplo aplicativo es expresada de la siguiente forma:

$$\text{Min} \quad z = 15P_{g,1} + 22P_{g,2}$$

sujeto a:

$$g_P(\theta, P_g) = 100 \times \begin{bmatrix} +6 & -4 & -2 \\ -4 & +6 & -2 \\ -2 & -2 & +4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} P_{g,1} \\ P_{g,2} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 30 \\ 0 \\ 70 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$P_{g,1} - 60 \leq 0$$

$$10 - P_{g,1} \leq 0$$

$$P_{g,2} - 80 \leq 0$$

$$10 - P_{g,2} \leq 0$$

$$(\theta_1 - \theta_2) - 0.25 \leq 0$$

$$(\theta_1 - \theta_3) - 0.15 \leq 0$$

$$(\theta_2 - \theta_3) - 0.5 \leq 0$$

$$-(\theta_1 - \theta_2) - 0.25 \leq 0$$

$$-(\theta_1 - \theta_3) - 0.15 \leq 0$$

$$960P_{g,1} + 414P_{g,2} < 55000$$

$$-(\theta_2 - \theta_3) - 0.5 \leq 0$$

$$\theta_1, \theta_2, \theta_3, P_{g,1}, P_{g,2} \geq 0$$

En la Fig. 3.11 se muestra la solución del problema de despacho económico con restricciones ambientales del sistema de 3 barras. Se observa que todos los flujos de potencia activa en las líneas de transmisión están dentro de los límites, por lo tanto no existe congestión.

En esta solución se puede observar que la emisión total de operación del sistema alcanza el valor límite de 55 000 kg-CO₂/h, de esta forma el despacho económico con restricciones ambientales lleva en cuenta la limitación de la emisión de contaminantes en el sistema y la operación económica a la vez.

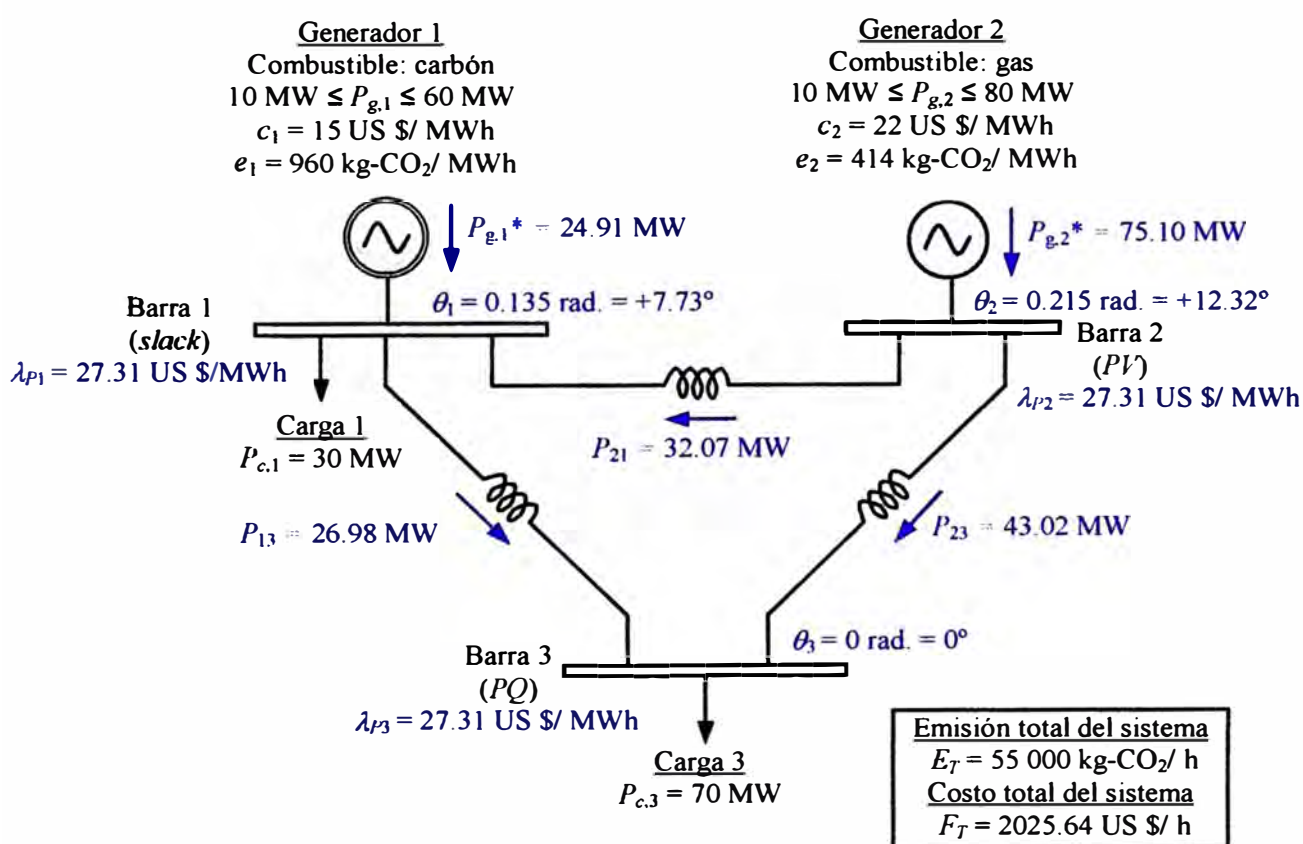


Fig. 3.11 Solución del despacho económico con restricciones ambientales del sistema de 3 barras.

Debido que el sistema no presenta congestión, los λ_{p_i} en todas las barras iguales. Esta vez los valores de λ_{p_i} no son iguales al costo marginal del generador 2 (22 US \$/MWh) sino un valor mayor (27.31 US \$/MWh) que considera el costo marginal del generador 2 y el efecto de mantener la emisión total del sistema al valor límite.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE DESPACHO ECONÓMICO CON RESTRICCIONES AMBIENTALES APLICADO AL SEIN

En este capítulo se muestra la aplicación del modelo de despacho económico con restricciones ambientales, el cual fue desarrollado en el capítulo III, al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN). Para esto, inicialmente se describen los datos del SEIN que fueron tomados para la operación del sistema en 2010, resaltando la etapa de pre despacho y datos de costos y emisión de generadores térmicos. Para mostrar los resultados fueron analizados en conjunto los modelos de despacho económico, despacho ambiental y el despacho económico con restricciones ambientales.

4.1 Sistema de potencia SEIN 2010

Para la aplicación de los modelos de despacho se usa el sistema de potencia SEIN 2010, el cual representa la operación del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional Peruano en el día lunes 18 de Enero de 2010. Los datos principales para evaluación de flujo de potencia de este sistema fueron obtenidos del programa de mantenimiento mensual de Enero de 2010. Dentro de los principales datos del sistema SEIN 2010 se puede mencionar lo siguiente:

- ◆ **Dimensión del sistema:** 512 barras (desde niveles de tensión en MT hasta AT) y 622 ramas (entre 305 transformadores y 317 líneas de transmisión). En la operación del sistema en el día 18 de Enero de 2010 se reportó 11 líneas fuera de servicio.
- ◆ **Carga del sistema:** Potencia activa de carga de 3824.65 MW, con unas pérdidas de potencia activa de 147.38 MW.
- ◆ **Generación del sistema:** 115 centrales de generación (conformados por grupos hidráulicos y térmicos). En la operación del sistema en el día 18 de Enero de 2010 se reportó que solo 59 centrales despachaban con un total de máxima y mínima potencia activa de generación de 4071.47 MW y 2917.60 MW, respectivamente.

En la Fig. 4.1 se presenta el diagrama unifilar del sistema SEIN 2010 considerando la operación del día lunes 18 de Enero de 2010, usando la información de despacho que fue

definido en ese escenario.

4.1.1 Datos de demanda

Las demandas son modeladas como potencias activas constantes conectadas a las barras del sistema. Para que el modelo de FPO desarrollado en este informe sea lineal se asume la formulación de flujo de potencia CC, la cual no considera las pérdidas eléctricas en líneas y transformadores. Es importante resaltar que actualmente existen formulaciones del flujo de potencia CC considerando aproximaciones de las pérdidas eléctricas, es decir, se lleva en cuenta que la pérdida de potencia activa en la rama (k, m) es igual a $g_{km} (\theta_k - \theta_m)^2$, donde g_{km} es la conductancia de la rama (k, m) en p.u. y θ_i es el ángulo de tensión de la barra i en radianes. Si se adicionan las ecuaciones de pérdidas de potencia activa de todas las ramas en la formulación de FPO se obtiene un modelo no lineal.

Para seguir trabajando con la formulación de FPO lineal, se consideran las pérdidas de potencia activa distribuidas en las barras del sistema a través de las cargas. Considerando las pérdidas totales de potencia activa en 147.38 MW (solución de un flujo de potencia CC con pérdidas eléctricas aproximadas), se tiene un total de carga considerando las pérdidas eléctricas de 3972.03 MW.

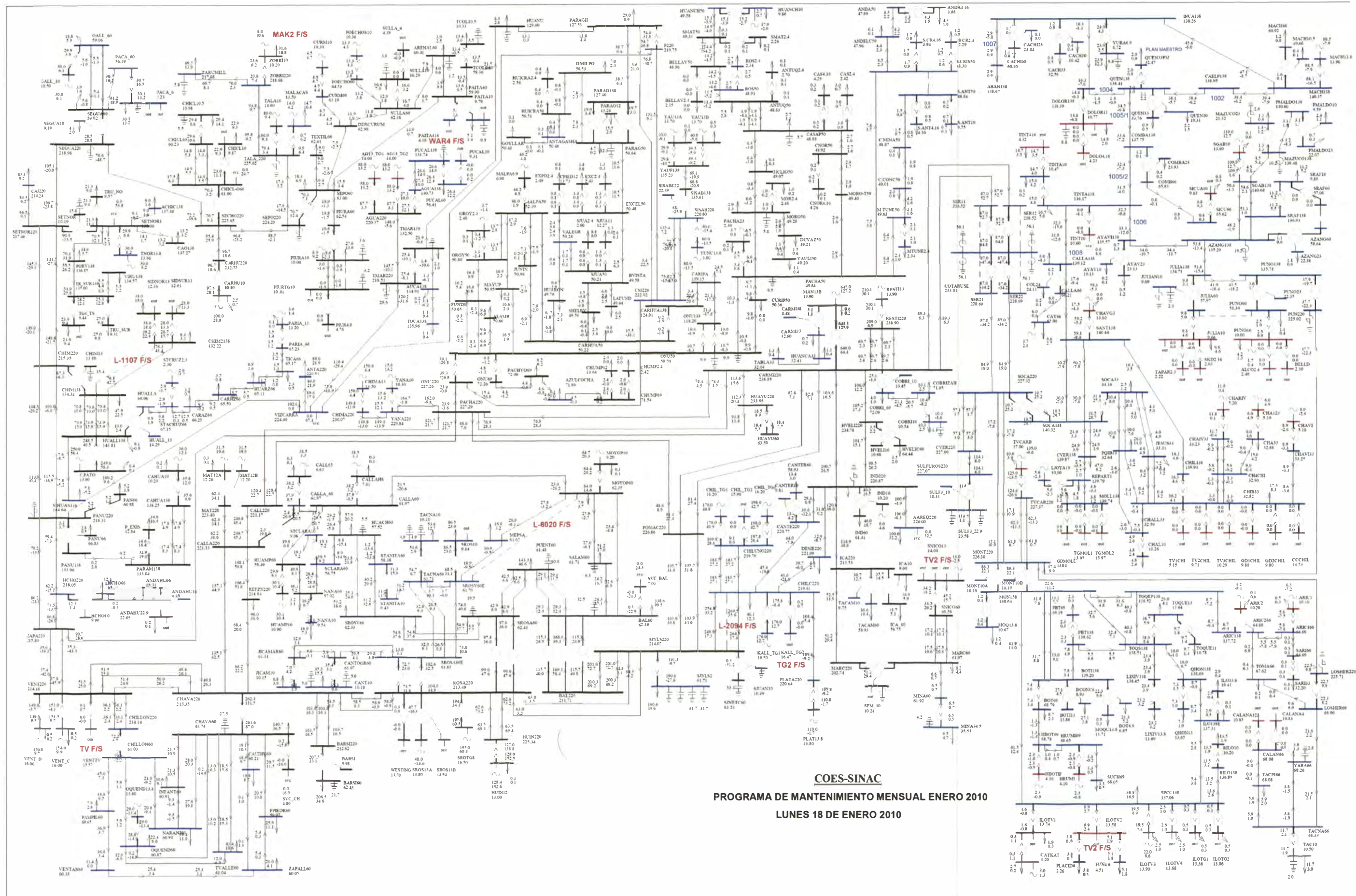
En la Tabla N° 4.1 se muestran algunos datos de demanda considerando las cargas mayores a 20 MW. En el Anexo A (Datos del sistema SEIN 2010 para análisis de despacho económico y ambiental) se muestran las informaciones completas de los datos de demandas.

4.1.2 Datos de ramas

Los datos de ramas (transformadores y líneas de transmisión) comprenden las siguientes informaciones: barra inicial, barra final, número de circuitos o ternas, resistencia (p.u.), reactancia (p.u.), tap (p.u.) y flujo máximo (MW) por circuito. En servicio se tienen 611 ramas, pero simplificando los circuitos paralelos se obtuvieron 560 ramas.

En la Tabla N° 4.2 se muestran algunos datos de ramas con flujos máximos mayores a 200 MW. Algunas reactancias de los transformadores de tres devanados pueden ser negativas debido al modelo de admitancias con un neutro central (nodo ficticio).

En el Anexo A (Datos del sistema SEIN 2010 para análisis de despacho económico y ambiental) se muestran las informaciones completas de los datos de ramas, considerando los transformadores de potencia.



COES-SINAC
PROGRAMA DE MANTENIMIENTO MENSUAL ENERO 2010
LUNES 18 DE ENERO 2010

Fig. 4.1 Diagrama unifilar del sistema SEIN 2010 considerando la operación del día lunes 18 de Enero de 2010.

Tabla N° 4.1 Datos de demanda de cargas mayores a 20 MW.

Número Barra	Código WinFlu	Nombre de Subestación	Nivel de Tensión (kV)	Demanda (MW)
2	CHICL10.	CHICLAYO 10.5 kV	10.5	29.4
8	CHICL10	CHICLAYO 10 kV	10	22.9
12	PIURA10	PIURA 10 kV	10	27.6
22	CHIM138	CHIMBOTE 1 138 kV	138	47.9
35	CHAVA60	CHAVARRIA 60 kV	60	140.7
37	REFZN220	REFINERIA ZINC 220 kV	220	98.0
49	HUIN12	HUINCO 220 kV	12.5	147.8
50	BAL60	BALNEARIOS 60 kV	60	338.6
56	IND60	INDEPENDENCIA 60 kV	60	40.0
62	SNICO13	SAN NICOLAS 13.8 kV	13.8	45.2
77	BARSI60	BARSI 60 kV	60	206.5
85	SALAM60	SALAMANCA 60 kV	60	51.2
86	PUENT60	DERIVACION PUENTE 60 kV	60	143.3
90	HUACH60	HUACHIPA 60 kV	60	57.9
95	SIDNOR13	SIDER NORTE 13.8 kV	13.8	38.0
96	SIDSUR13	SIDER SUR 13.8 kV	13.8	28.0
115	CARIPA	CARIPA 138 kV	138	24.5
122	PARAGII	PARAGSHA 2 138 kV	138	25.0
127	P EXIS	PARAMONGA EXISTENTE 13.8 kV	13.8	34.6
129	SROSV60	SANTA ROSA VIEJA 60 kV	60	53.2
133	TRU_NO	TRUJILLO NORTE 10 kV	10	21.3
135	TG4 TS	CENTRAL TRUJILLO SUR 10 kV	10	23.9
136	TRU_SUR	TRUJILLO SUR 10 kV	10	25.0
141	PACA_6	PACASMAYO 6.3 kV	6.3	30.1
152	SJNLS2	SAN JUAN 2 60 kV	60	190.6
196	ZORRI10	ZORRITOS 10 kV	10	31.6
204	ANTA220	ANTAMINA 220 kV	220	89.0
248	CVER138	CERRO VERDE 138 kV	138	47.0
250	TOQUE13	TOQUEPALA 13.8 kV	13.8	29.0
258	SPCC138	ILO 1 138 kV	138	38.8
279	BCONC6	BOTIFLACA 6 kV	6.9	27.1
322	BOT6.9	BOTIFLACA 6.9 kV	6.9	21.3
325	PQIB33	PARQUE INDUSTRIAL (SEAL) 33 kV	33	26.0
353	YURA6.9	YURA 6.9 kV	6.8	23.9
355	CAJ220	CAJAMARCA 220 kV	220	83.3
375	PUCAL60	PUCALLPA 60 kV	60	26.4
398	ZARUMILL	ZARUMILLA 220 kV	220	69.7
410	LIXIV13.	LIXIVIACION 13.8 kV	13.8	23.2
417	TACAM60	TACAMA 60 kV	60	30.6
422	SROS10	SANTA ROSA 10 kV	10	86.5
426	CANT10	CANTO GRANDE 10 kV	10	35.3
428	TACNA10	TACNA 10 kV	10	53.6
433	STANITA1	SANTA ANITA 10 kV	10	31.2
435	SULF3_22	SULFUROS 22.9 kV	22.9	113.7
442	CHILC220	CHILCA 220 kV	220	40.1
451	PPIEDR60	PUENTE PIEDRA 60 kV	60	25.9
453	OQUEND60	OQUENDO 60 kV	60	22.4
454	TVALLE60	TOMAS VALLE 60 kV	60	43.4
455	NARANJ60	NARANJAL 60 kV	60	39.4
456	INFANT60	INFANTAS 60 kV	60	30.6
472	AAREQ220	ACEROS AREQUIPA 220 kV	220	100.0

Tabla N° 4.2 Datos de ramas con flujos máximos mayores a 200 MW.

Núm. Barra		Código Barra		Número de ckts	Resistencia c/ckto (p.u.)	Reactancia c/ckto (p.u.)	Tap c/ckto (p.u.)	Flujo máximo c/ckto (MW)
Inicial	Final	Inicial	Final					
19	21	CHIM220	PANU220	2	0.03521	0.22535		200.0
19	473	CHIM220	NEUTRO0	1	0.00004	0.04677	1.0046	240.0
21	207	PANU220	HCHO220	1	0.00913	0.06019		228.6
22	473	CHIM138	NEUTRO0	1	0.00075	-0.00085	1.0000	240.0
23	24	HUALL138	C.PATO	1	0.00080	0.02700	1.0500	300.0
30	32	ZAPA220	VENT220	2	0.00219	0.01981		228.6
30	207	ZAPA220	HCHO220	1	0.01838	0.12230		228.6
32	130	VENT220	VENT C	1	0.00153	0.05581	0.9773	215.0
32	145	VENT220	VENT D	1	0.00153	0.05581	0.9773	215.0
32	411	VENT220	VENTTV	1	0.00133	0.05492	1.0000	260.0
32	446	VENT220	CHILLON2	2	0.00019	0.00130		250.0
33	34	CHAVA220	ROSA220	2	0.00108	0.00859		228.6
33	35	CHAVA220	CHAVA60	1	0.00031	0.02762	0.9164	420.0
33	36	CHAVA220	BARS1220	2	0.00150	0.01001		228.6
33	37	CHAVA220	REFZN220	1	0.00331	0.02050		370.4
33	89	CHAVA220	CALLA220	1	0.00857	0.05302		370.4
34	48	ROSA220	HUIN220	2	0.00958	0.06663		342.9
34	53	ROSA220	SJNLS220	2	0.00339	0.02674		228.6
34	471	ROSA220	SROTG8	1	0.00018	0.06091	1.0000	230.0
36	475	BARS1220	NEUTRO2	1	0.00108	0.06059	0.9546	255.0
37	89	REFZN220	CALLA220	1	0.00563	0.03483		370.4
38	89	MAT220	CALLA220	1	0.00349	0.02330		228.6
45	129	SROSA60	SROSV60	2	0.00042	0.00286		228.6
48	49	HUIN220	HUIN12	1	0.00088	0.03529	1.0347	340.0
52	53	BAL220	SJNLS220	2	0.00150	0.01040		228.6
53	152	SJNLS220	SJNLS2	1	0.00046	0.04196	0.9528	280
53	442	SJNLS220	CHILC220	2	0.00621	0.03614		360
55	472	IND220	AAREQ220	1	0.00422	0.02490		220
64	117	CARM1220	MAN13B	1	0.00044	0.01400	1.0955	720
64	335	CARM1220	SER11	1	0.02635	0.22487		304
64	337	CARM1220	SER12	1	0.02635	0.22487		304
65	66	RESTI220	RESTI13	1	0.00121	0.05051	1.0909	247.5
68	69	PACHA220	ONU220	1	0.00235	0.02274		258.1
68	205	PACHA220	YANA220	1	0.01064	0.09319		380
77	475	BARS160	NEUTRO2	1	0.00037	-0.01510	1.0417	255
83	481	SETNOR22	NEUTRO8	1	0.00020	0.03800	1.0000	200
88	89	CALL220	CALLA220	1	0.00002	0.00021		381.1
131	481	SETNOR1	NEUTRO8	1	0.00090	-0.00440	1.0000	200
205	210	YANA220	CHIMA220	1	0.00332	0.02881		380
244	297	SOCA138	SOCA220	2	0.00000	0.06750	1.0000	200
297	305	SOCA220	SER21	1	0.02846	0.24399		304
297	338	SOCA220	SER22	1	0.02846	0.24399		304
301	504	MON138	NEUTRO31	1	0.00000	-0.00260	1.0000	300
301	505	MON138	NEUTRO32	1	0.00000	-0.00260	1.0000	300
302	304	TVCAR220	MONT220	2	0.01277	0.04676		400
304	504	MONT220	NEUTRO31	1	0.00000	0.04780	1.0000	300
304	505	MONT220	NEUTRO32	1	0.00000	0.04780	1.0000	300
305	334	SER21	COTARUSE	1	0.00000	-0.15036	1.0400	300
334	335	COTARUSE	SER11	1	0.00000	-0.11499	1.0000	300
334	337	COTARUSE	SER12	1	0.00000	-0.11499	1.0000	300
334	338	COTARUSE	SER22	1	0.00000	-0.15036	0.9615	300
376	395	CM220	SISAB220	2	0.00559	0.05351		339.1
412	434	CVER220	SULFUROS	1	0.00006	0.00040		200
413	414	CHILUNO2	CHIL TG1	1	0.00020	0.03919	1.0000	210
413	441	CHILUNO2	CHIL TG2	1	0.00020	0.03919	1.0000	210
413	442	CHILUNO2	CHILC220	2	0.00012	0.00070		450
413	465	CHILUNO2	CHIL TG3	1	0.00020	0.03919	1.0000	210
420	421	SROSA60E	SROSV60E	1	0.00086	0.00392		228.6
434	509	SULFUROS	NEUTRO36	1	0.00048	0.00814	1.0000	249
435	509	SULF3 22	NEUTRO36	1	0.00049	0.03243	1.0000	249
442	444	CHILC220	KALL TG1	1	0.00020	0.06571	1.0000	210
442	466	CHILC220	KALL TG2	1	0.00018	0.06000	1.0000	230
442	469	CHILC220	PLATA220	1	0.01160	0.10982		300
469	470	PLATA220	PLAT13.8	1	0.00017	0.05625	1.0000	240

4.1.3 Datos de generación para despacho económico y ambiental

En el escenario de operación del día 18 de Enero de 2010 se despacharon 59 centrales de generación en servicio, 39 de ellas contienen grupos hidráulicos y 20 contienen grupos térmicos.

Antes de definir los datos de generación, es importante mencionar que en el despacho económico se asumen las siguientes condiciones:

- ◆ El despacho económico se realiza posterior a la etapa de pre despacho.
 - En esta etapa se determina el conjunto de centrales o grupos de generación que van a arrancar y, en consecuencia, van a intervenir en el despacho, con una potencia de generación dentro de los límites mínimos y máximos.
 - Para este informe se asume que conjunto de centrales o grupos de generación del pre despacho es similar al encontrado en la operación del día 18 de Enero de 2010.
- ◆ En la etapa despacho económico solo intervienen centrales o grupos térmicos, así el despacho de las centrales hidroeléctricas fue definido anterior a este.
 - En la formulación del problema de FPO se asumen que las centrales hidroeléctricas despachan potencias activas fijas, la cuales no son reprogramadas en el problema de optimización.
 - Para este informe se asume el despacho de las centrales hidroeléctricas similar a las condiciones de operación encontradas en la de operación del día 18 de Enero de 2010.
- ◆ Bajo las condiciones anteriores se tiene que un total de potencia activa de generación de centrales hidráulicas de 2364.55 MW.
 - Respecto a las centrales o grupos térmicos, se tiene un total de máxima y mínima potencia activa de generación de 1706.92 MW y 553.05 MW, respectivamente.

En la Tabla N° 4.3 se muestran los datos de generación de las centrales y grupos que conforman el pre despacho. Los datos de costos y emisiones fueron obtenidos de la referencia [15], los cuales fueron seleccionados de características típicas de generadores térmicos de los sistemas *New York Power Pool* (NYPP) y *New England Power Pool* (NEPOOL). Posteriormente fueron modificados estos datos para las centrales y grupos térmicos del SEIN 2010 de acuerdo al tipo de combustible que consumen.

Tabla N° 4.3 Datos de generación de las centrales y grupos (hidráulicos y térmicos) que conforman el pre despacho.

Número Barra	Código WinFlu	Datos de central de generación		Tipo Central	Combustible	Gen. Máx. (MW)	Gen. Min. (MW)	Costo (US \$/MWh)	Emisión (kg-CO2/MWh)
		Nombre	Grupo(s)						
7	CARHU10	Carhuauero	G1, G2, G3	H		100	100		
12	PIURA10	Piura	GMT1, GMT2	T	Diesel	9.8	3	30	700
24	C.PATO	Cañon del Pato	G1, G2, G3, G4, G5, G6	H		250	250		
29	CAHUA10	Cahua	G-1, G-2	H		35.97	35.97		
39	MAT12A	Matucana	G-1	H		31.5	31.5		
40	MAT12B	Matucana	G-2	H		31.5	31.5		
42	HUAMP10	Huampani	G-1, G-2	H		30.1	30.1		
43	CALL65	Callahuanca	G-1, G-2, G-3	H		38.5	38.5		
44	CALLAH8	Callahuanca	G-4	H		38.5	38.5		
47	SROSI3A	San Rosa Nueva	UTI5	T	Diesel	52.8	30	30.5	702
49	HUN12	Huinco	G-1-4	H		27.56	27.56		
51	MOYOPI0	Moyopampa	G-1-3	H		64.7	64.7		
57	IND10	Independencia	Compensador Sincrono	CS		0	0		
62	SNICO13	San Nicolas	TV-1	T	Diesel	20.2	10	31	704
66	RESTI13	Restitucion	G-1-3	H		210.06	210.06		
100	OROY2.3	Oroya	G-1-3	H		3.66	3.66		
102	MALPA6.9	Malpaso	G-1-4	H		46.21	46.21		
113	YAU13A	Yaupi	G-1-3	H		30	30		
117	MAN13B	Mantaro	G-1-7	H		647	647		
118	PACHA23	Pachachaca	G-1-3	H		3.66	3.66		
121	YAU13B	Yaupi	G-4-5	H		40	40		
125	TALA10	Malacas	TGN4	T	Gas Natural	98.1	6	20	400
130	VENT C	Ventaniilla	TG3	T	Gas Natural	152.2	70	20.5	402
143	GALL 10	Galito Ciego	G-1, G-2	H		30	30		
145	VENT D	Ventaniilla	TG4	T	Gas Natural	156.2	70	21	404
146	AG13 TG2	Aguaytia	TG2	T	Gas Natural	85.9	40	21.5	406
149	MALACAS	Malacas	TG1, TG2	T	Gas Natural	32	10	22	408
158	CURM10	Curumuy	G-1, G-2	H		4.5	4.5		
196	ZORRI10	Tumbes	Mack1	T	Diesel	9.2	5	31.5	706
202	PARIA 13	Pariac	CH-1, CH-2, CH-3, CH-4	H		3.59	3.59		
206	YANA10	Yanango	G-1	H		15.63	15.63		
211	CHMA13	Chimay	G-1, G-2	H		150	150		
216	PUNO10	Bellavista 2	MAN1	T	Diesel	1.9	1.05	32	708
247	CHAVG3	Charcani V	G-1, G-2, G-3	H		59.25	59.25		
256	HBOTF	Botiflaca	Hydro1	H		2.3	2.3		
257	HRUM1	Botiflaca	Hydro2	H		2.3	2.3		
263	ARIC2	Aricota 2	G-3	H		3.16	3.16		
266	ARIC1	Aricota 1	G1, G2	H		6.32	6.32		
280	CHARIV	Charcani IV	G-1-3	H		11.77	11.77		
281	CHA123	Charcani I, II, III	G-1-2, G-1-3, G-1-2	H		6.04	6.04		
283	CHAVI	Charcani VI	G-1	H		8.94	8.94		
292	ILOTV3	Ilo 1	TV3	T	Diesel	66	22	32.5	710
295	CATKAT	Ilo 1	CAT	T	Diesel	3.3	1	33	712
299	SGAB10	San Gaban II	G-1, G-2	H		110	110		
303	TVCARB	Ilo 2	TV21	T	Carbon	141	50	10	960
343	MACH13.8	Machu Picchu	G-1, G-2, G-3	H		88.5	88.5		
372	HUANCH10	Huanchor	G-1, G-2	H		17.85	17.85		
381	CAY66	Arcata, Ares	G-1-4, G-1-6	H		3.65	3.65		
388	AG13 TG1	Aguaytia	TG1	T	Gas Natural	87.6	40	21.5	406
397	YUNC13.8	Yuncan	G-1-3	H		80	80		
403	POECHOS1	Poechos	G-1, G-2	H		13.3	13.3		
414	CHIL TG1	Chilca Uno	TG1	T	Gas Natural	174	45	22.5	410
444	KALL TG1	Kallpa	TG1	T	Gas Natural	171	40	23	412
463	STCRUZ2	Santa Cruz	G1, G2	H		2.92	2.92		
464	OQUENDI.3	Oquendo	G1	T	Gas Natural	29.6	10	23.5	414
465	CHIL TG3	Chilca Uno	TG3	T	Gas Natural	174	45	24	416
467	TNOR13.8	Trujillo Norte	G1, G2	T	Diesel	70.12	10	33.5	714
468	LJOYA10	La Jova	G1, G2	H		5.61	5.61		
470	PLAT13.8	Platanal	G1, G2	H		110	110		
471	SROTG8	Santa Rosa	TG8	T	Gas Natural	172	45	24.5	418

En la Tabla N° 4.3 se observa que existe un compensador síncrono en la barra Independencia 10 kV, este generador no entrega potencia activa.

4.2 Despacho económico

Para el análisis de despacho económico se toman en cuenta dos escenarios de operación:

i. Operación normal:

Este escenario es idéntico a la operación del día 18 de Enero de 2010, usando los mismos flujos máximos de todas las líneas de transmisión y transformadores de potencia del sistema.

ii. Operación en alerta:

Este escenario se define incorporando una restricción de seguridad en el sistema, la cual consiste en limitar el flujo de potencia activa en las líneas de transmisión San Juan – Chilca 220 kV en 250 MW (originalmente el flujo máximo fue definido en 360 MW).

4.2.1 Resultados para operación normal

Flujos en ramas

En la Tabla N° 4.4 se muestran los resultados de flujos en ramas con flujos máximos mayores a 200 MW para el despacho económico. Se observa que ningún flujo en las líneas alcanza su respectivo valor máximo, lo que indica que no existe congestión en el sistema.

Costos marginales en barra

En la Tabla N° 4.5 se muestran los resultados de barras de demanda mayor a 20 MW para el despacho económico. Debido que no existe congestión, los costos marginales de las barras son idénticos e iguales a 32.5 US \$/MWh, también este valor es igual al costo incremental de combustible del grupo TV3 de la central Ilo 1. Por tanto, se concluye que este grupo es el que margina y define el costo de energía en todas las barras del sistema.

Costos y emisiones

En la Tabla N° 4.6 se muestran los resultados de generación de las centrales y grupos térmicos para el despacho económico. Se observa que el sistema alcanza un costo total de operación de 35331.1 US \$/h y una emisión total de contaminantes de 775125.1 kg-CO₂/h. La central Ilo 2 (grupo TV21) entrega su máxima potencia, debido que es la más barata en comparación a las demás por utilizar carbón, pero es la que contamina más 135360 kg-CO₂/h. Algunas centrales de Diesel, que son las más caras, operan con su mínima potencia de generación como el caso de la central Ilo 1 grupo CAT y de la central Trujillo Norte grupos G1 y G2.

Tabla N° 4.4 Resultados de flujos en ramas con flujos máximos mayores a 200 MW –
despacho económico, operación normal.

Núm. Barra		Código Barra		Número de cktos	Flujo sol. Total (MW)	Flujo máximo Total (MW)	Congestión?
Inicial	Final	Inicial	Final				
19	21	CHIM220	PANU220	2	-132.49	400.0	
19	473	CHIM220	NEUTRO0	1	-100.91	240.0	
21	207	PANU220	HCHO220	1	-19.61	228.6	
22	473	CHIM138	NEUTRO0	1	100.91	240.0	
23	24	HUALLI38	C.PATO	1	-249.60	300.0	
30	32	ZAPA220	VENT220	2	38.36	457.2	
30	207	ZAPA220	HCHIO220	1	31.91	228.6	
32	130	VENT220	VENT C	1	-151.70	215.0	
32	145	VENT220	VENT D	1	-155.70	215.0	
32	411	VENT220	VENTTV	1	0.00	260.0	
32	446	VENT220	CHILLON2	2	73.88	500.0	
33	34	CHAVA220	ROSA220	2	48.18	457.2	
33	35	CHAVA220	CHAVA60	1	257.02	420.0	
33	36	CHAVA220	BARS1220	2	206.50	457.2	
33	37	CHAVA220	REFZN220	1	-85.85	370.4	
33	89	CHAVA220	CALLA220	1	-153.97	370.4	
34	48	ROSA220	HUIN220	2	120.22	685.8	
34	53	ROSA220	SJNLS220	2	-212.75	457.2	
34	471	ROSA220	SROTG8	1	-172.00	230.0	
36	475	BARS1220	NEUTRO2	1	206.50	255.0	
37	89	REFZN220	CALLA220	1	-183.85	370.4	
38	89	MAT220	CALLA220	1	62.70	228.6	
45	129	SROSA60	SROSV60	2	95.79	457.2	
48	49	HUIN220	HUIN12	1	120.22	340.0	
52	53	BAL220	SJNLS220	2	-375.34	457.2	
53	152	SJNLS220	SJNLS2	1	190.60	280.0	
53	442	SJNLS220	CHILC220	2	-534.00	720.0	
55	472	IND220	AAREQ220	1	100.00	220.0	
64	117	CARM1220	MAN13B	1	-643.30	720.0	
64	335	CARM1220	SER11	1	68.27	304.0	
64	337	CARM1220	SER12	1	68.27	304.0	
65	66	RESTI220	RESTI13	1	-210.06	247.5	
68	69	PACHA220	ONU220	1	-5.44	258.1	
68	205	PACHA220	YANA220	1	-165.63	380.0	
77	475	BARS160	NEUTRO2	1	-206.50	255.0	
83	481	SETNOR22	NEUTRO8	1	107.70	200.0	
88	89	CALL220	CALLA220	1	283.37	381.1	
131	481	SETNOR1	NEUTRO8	1	-107.70	200.0	
205	210	YANA220	CHIMA220	1	-150.00	380.0	
244	297	SOCA138	SOCA220	2	-10.42	400.0	
297	305	SOCA220	SER21	1	-72.57	304.0	
297	338	SOCA220	SER22	1	-63.96	304.0	
301	504	MON138	NEUTRO31	1	-83.86	300.0	
301	505	MON138	NEUTRO32	1	-83.86	300.0	
302	304	TVCAR220	MONT220	2	131.00	800.0	
304	504	MONT220	NEUTRO31	1	83.86	300.0	
304	505	MONT220	NEUTRO32	1	83.86	300.0	
305	334	SER21	COTARUSE	1	-72.57	300.0	
334	335	COTARUSE	SER11	1	-68.27	300.0	
334	337	COTARUSE	SER12	1	-68.27	300.0	
334	338	COTARUSE	SER22	1	63.96	300.0	
376	395	CM220	SISAB220	2	-149.40	678.2	
412	434	CVER220	SULFUROS	1	113.67	200.0	
413	414	CHILUNO2	CHIL TG1	1	-174.00	210.0	
413	441	CHILUNO2	CHIL TG2	1	0.00	210.0	
413	442	CHILUNO2	CHILC220	2	348.00	900.0	
413	465	CHILUNO2	CHIL TG3	1	-174.00	210.0	
420	421	SROSA60E	SROSV60E	1	67.92	228.6	
434	509	SULFUROS	NEUTRO36	1	113.67	249.0	
435	509	SULF3 22	NEUTRO36	1	-113.67	249.0	
442	444	CHILC220	KALL TG1	1	-171.00	210.0	
442	466	CHILC220	KALL TG2	1	0.00	230.0	
442	469	CHILC220	PLATA220	1	-110.00	300.0	
469	470	PLATA220	PLAT13.8	1	-110.00	240.0	

Tabla N° 4.5 Resultados de barras de demanda mayor a 20 MW – despacho económico, operación normal.

Número Barra	Código WinFlu	Nombre de Subestación	Theta (rad)	Costo Marg. (US \$/MWh)	Demanda (MW)
2	CHICL10.	CHICLAYO 10.5 kV	0.165	32.5	29.4
8	CHICL10	CHICLAYO 10 kV	0.184	32.5	22.9
12	PIURA10	PIURA 10 kV	0.117	32.5	27.6
22	CHIM138	CHIMBOTE 1 138 kV	0.576	32.5	47.9
35	CHAVA60	CHAVARRIA 60 kV	0.651	32.5	140.7
37	REFZN220	REFINERIA ZINC 220 kV	0.733	32.5	98.0
49	HUINI2	HUINCO 220 kV	0.63	32.5	147.8
50	BAL60	BALNEARIOS 60 kV	0.602	32.5	338.6
56	IND60	INDEPENDENCIA 60 kV	0.764	32.5	40.0
62	SNICO13	SAN NICOLAS 13.8 kV	0.606	32.5	45.2
77	BARS160	BARSI 60 kV	0.618	32.5	206.5
85	SALAM60	SALAMANCA 60 kV	0.591	32.5	51.2
86	PUENT60	DERIVACION PUENTE 60 kV	0.585	32.5	143.3
90	HUACH60	HUACHIPA 60 kV	0.591	32.5	57.9
95	SIDNOR13	SIDER NORTE 13.8 kV	0.487	32.5	38.0
96	SIDSUR13	SIDER SUR 13.8 kV	0.506	32.5	28.0
115	CARIPA	CARIPA 138 kV	0.827	32.5	24.5
122	PARAGII	PARAGSHA 2 138 kV	0.84	32.5	25.0
127	P EXIS	PARAMONGA EXISTENTE 13.8 kV	0.613	32.5	34.6
129	SROSV60	SANTA ROSA VIEJA 60 kV	0.626	32.5	53.2
133	TRU NO	TRUJILLO NORTE 10 kV	0.264	32.5	21.3
135	TG4 TS	CENTRAL TRUJILLO SUR 10 kV	0.238	32.5	23.9
136	TRU SUR	TRUJILLO SUR 10 kV	0.234	32.5	25.0
141	PACA 6	PACASMAYO 6.3 kV	0.135	32.5	30.1
152	SJNLS2	SAN JUAN 2 60 kV	0.666	32.5	190.6
196	ZORRI10	ZORRITOS 10 kV	0.079	32.5	31.6
204	ANTA220	ANTAMINA 220 kV	0.762	32.5	89.0
248	CVER138	CERRO VERDE 138 kV	0.949	32.5	47.0
250	TOQUE13	TOQUEPALA 13.8 kV	0.819	32.5	29.0
258	SPCC138	ILO 1 138 kV	0.858	32.5	38.8
279	BCONC6	BOTIFLACA 6 kV	0.86	32.5	27.1
322	BOT6.9	BOTIFLACA 6.9 kV	0.842	32.5	21.3
325	PQIB33	PARQUE INDUSTRIAL (SEAL) 33 kV	0.908	32.5	26.0
353	YURA6.9	YURA 6.9 kV	1.247	32.5	23.9
355	CAJ220	CAJAMARCA 220 kV	0.29	32.5	83.3
375	PUCAL60	PUCALLPA 60 kV	0.92	32.5	26.4
398	ZARUMILL	ZARUMILLA 220 kV	0.081	32.5	69.7
410	LIXIV13.	LIXIVIACION 13.8 kV	0.849	32.5	23.2
417	TACAM60	TACAMA 60 kV	0.685	32.5	30.6
422	SROS10	SANTA ROSA 10 kV	0.526	32.5	86.5
426	CANT10	CANTO GRANDE 10 kV	0.514	32.5	35.3
428	TACNA10	TACNA 10 kV	0.54	32.5	53.6
433	STANITA I	SANTA ANITA 10 kV	0.527	32.5	31.2
435	SULF3 22	SULFUROS 22.9 kV	0.907	32.5	113.7
442	CHILC220	CHILCA 220 kV	0.839	32.5	40.1
451	PPIEDR60	PUENTE PIEDRA 60 kV	0.614	32.5	25.9
453	OQUEND60	OQUENDO 60 kV	0.652	32.5	22.4
454	TVALLE60	TOMAS VALLE 60 kV	0.642	32.5	43.4
455	NARANJ60	NARANJAL 60 kV	0.638	32.5	39.4
456	INFANT60	INFANTAS 60 kV	0.633	32.5	30.6
472	AAREQ220	ACEROS AREQUIPA 220 kV	0.776	32.5	100.0

Tabla N° 4.6 Resultados de generación de las centrales y grupos térmicos – despacho económico, operación normal.

Núm. Barra	Código WinFlu	Datos de central de generación		Combustible	Gen. Máx. (MW)	Gen. Mín. (MW)	Gen. sol. (MW)	Costo (US \$/h)	Emisión (kg-CO ₂ /h)	
		Nombre	Grupo(s)							
12	PIURA10	Piura	GMT1, GMT2	Diesel	9.8	3	9.8	294.0	6860.0	
47	SROS13A	San Rosa Nueva	UT15	Diesel	52.8	30	52.8	1610.4	37065.6	
62	SNICO13	San Nicolas	TV-1	Diesel	20.2	10	20.2	626.2	14220.8	
125	TALA10	Malacas	TGN4	Gas Natural	98.1	6	98.1	1962.0	39240.0	
130	VENT C	Ventanilla	TG3	Gas Natural	152.2	70	152.2	3120.1	61184.4	
145	VENT D	Ventanilla	TG4	Gas Natural	156.2	70	156.2	3280.2	63104.8	
146	AG13 TG2	Aguaytia	TG2	Gas Natural	85.9	40	85.9	1846.9	34875.4	
149	MALACAS	Malacas	TG1, TG2	Gas Natural	32	10	32.0	704.0	13056.0	
196	ZORR10	Tumbes	Mack1	Diesel	9.2	5	9.2	289.8	6495.2	
216	PUNO10	Bellavista 2	MAN1	Diesel	1.9	1.05	1.9	60.8	1345.2	
292	ILOTV3	Ilo 1	TV3	Diesel	66	22	29.0	941.8	20573.7	
295	CATKAT	Ilo 1	CAT	Diesel	3.3	1	1.0	33.0	712.0	
303	TVCARB	Ilo 2	TV21	Carbón	141	50	141.0	1410.0	135360.0	
388	AG13 TG1	Aguaytia	TG1	Gas Natural	87.6	40	87.6	1883.4	35565.6	
414	CHIL TG1	Chilca Uno	TG1	Gas Natural	174	45	174.0	3915.0	71340.0	
444	KALL TG1	Kallpa	TG1	Gas Natural	171	40	171.0	3933.0	70452.0	
464	OQUEND13	Oquendo	G1	Gas Natural	29.6	10	29.6	695.6	12254.4	
465	CHIL TG3	Chilca Uno	TG3	Gas Natural	174	45	174.0	4176.0	72384.0	
467	TNOR13.8	Trujillo Norte	G1, G2	Diesel	70.12	10	10.0	335.0	7140.0	
471	SROTG8	Santa Rosa	TG8	Gas Natural	172	45	172.0	4214.0	71896.0	
Total								1607.5	35331.1	775125.1

4.2.2 Resultados para operación en alerta

Flujos en ramas

En la Tabla N° 4.7 se muestran los resultados de flujos en ramas con flujos máximos mayores a 200 MW para el despacho económico. Se observa que los flujos de las líneas de transmisión San Juan – Chilca 220 kV alcanzan su valor máximo de 200 MW, lo que indica que existe congestión en el sistema.

Costos marginales en barra

En la Tabla N° 4.8 se muestran los resultados de barras de demanda mayor a 20 MW para el despacho económico. Debido que existe congestión, los costos marginales de las barras son diferentes y existen diferentes costos de energía en todas las barras del sistema definidos por la congestión de la línea San Juan – Chilca 220 kV.

Costos y emisiones

En la Tabla N° 4.9 se muestran los resultados de generación de las centrales y grupos térmicos para el despacho económico. Se observa que el sistema alcanza un costo total de operación de 35641.7 US \$/h, mayor que el caso sin congestión, y una emisión total de contaminantes de 783942.7 kg-CO₂/h, mayor que el caso sin congestión. La central Ilo 2 (grupo TV21) sigue entregando su máxima potencia, debido que es la más barata en comparación a las demás por utilizar carbón. Algunas centrales de Diesel, que son las más caras, operan con su mínima potencia de generación como el caso de la central San Nicolás grupo TV-1, Bellavista grupo MAN1 y de la central Ilo 1 grupos TV3 y CAT.

Tabla N° 4.7 Resultados de flujos en ramas con flujos máximos mayores a 200 MW – despacho económico, operación en alerta.

Num. Barra	Código Barra		Número de cktos	Flujo sol. Total (MW)	Flujo máximo Total (MW)	Congestión?	
	Inicial	Final					
19	21	CHIM220	PANU220	2	-85.33	400.0	
19	473	CHIM220	NEUTRO0	1	-100.91	240.0	
21	207	PANU220	HCHO220	1	-2.04	228.6	
22	473	CHIMI38	NEUTRO0	1	100.91	240.0	
23	24	HUALLI38	C.PATO	1	-249.60	300.0	
30	32	ZAPA220	VENT220	2	72.01	457.2	
30	207	ZAPA220	HCHO220	1	14.34	228.6	
32	130	VENT220	VENT C	1	-151.70	215.0	
32	145	VENT220	VENT D	1	-155.70	215.0	
32	411	VENT220	VENTTV	1	0.00	260.0	
32	446	VENT220	CHILLON2	2	74.57	500.0	
33	34	CHAVA220	ROSA220	2	78.54	457.2	
33	35	CHAVA220	CHAVA60	1	256.33	420.0	
33	36	CHAVA220	BARS1220	2	206.50	457.2	
33	37	CHAVA220	REFZN220	1	-84.24	370.4	
33	89	CHAVA220	CALLA220	1	-152.29	370.4	
34	48	ROSA220	HUIN220	2	120.22	685.8	
34	53	ROSA220	SJNLS220	2	-184.61	457.2	
34	471	ROSA220	SROTG8	1	-172.00	230.0	
36	475	BARS1220	NEUTRO2	1	206.50	255.0	
37	89	REFZN220	CALLA220	1	-182.24	370.4	
38	89	MAT220	CALLA220	1	62.70	228.6	
45	129	SROSA60	SROSV60	2	95.68	457.2	
48	49	HUIN220	HUINI2	1	120.22	340.0	
52	53	BAL220	SJNLS220	2	-372.55	457.2	
53	152	SJNLS220	SJNLS2	1	190.60	280.0	
53	442	SJNLS220	CHILC220	2	-500.00	500.0	X
55	472	IND220	AAREQ220	1	100.00	220.0	
64	117	CARM1220	MANT3B	1	-643.30	720.0	
64	335	CARM1220	SER11	1	72.18	304.0	
64	337	CARM1220	SER12	1	72.18	304.0	
65	66	REST1220	REST113	1	-210.06	247.5	
68	69	PACHA220	ONU220	1	-15.43	258.1	
68	205	PACHA220	YANA220	1	-165.63	380.0	
77	475	BARS160	NEUTRO2	1	-206.50	255.0	
83	481	SETNOR22	NEUTRO8	1	60.54	200.0	
88	89	CALL220	CALLA220	1	280.65	381.1	
131	481	SETNOR1	NEUTRO8	1	-60.54	200.0	
205	210	YANA220	CHIMA220	1	-150.00	380.0	
244	297	SOCA138	SOCA220	2	-10.93	400.0	
297	305	SOCA220	SER21	1	-76.74	304.0	
297	338	SOCA220	SER22	1	-67.62	304.0	
301	504	MON138	NEUTRO31	1	-87.28	300.0	
301	505	MON138	NEUTRO32	1	-87.28	300.0	
302	304	IVCAR220	MONT220	2	131.00	800.0	
304	504	MONT220	NEUTRO31	1	87.28	300.0	
304	505	MONT220	NEUTRO32	1	87.28	300.0	
305	334	SER21	COTARUSE	1	-76.74	300.0	
334	335	COTARUSE	SER11	1	-72.18	300.0	
334	337	COTARUSE	SER12	1	-72.18	300.0	
334	338	COTARUSE	SER22	1	67.62	300.0	
376	395	CM220	SISAB220	2	-149.40	678.2	
412	434	CVER220	SULFUROS	1	113.67	200.0	
413	414	CHILUNO2	CHIL TG1	1	-174.00	210.0	
413	441	CHILUNO2	CHIL TG2	1	0.00	210.0	
413	442	CHILUNO2	CHILC220	2	318.86	900.0	
413	465	CHILUNO2	CHIL TG3	1	-144.86	210.0	
420	421	SROSA60E	SROSV60E	1	68.03	228.6	
434	509	SULFUROS	NEUTRO36	1	113.67	249.0	
435	509	SULF3 22	NEUTRO36	1	-113.67	249.0	
442	444	CHILC220	KALL TG1	1	-171.00	210.0	
442	466	CHILC220	KALL TG2	1	0.00	230.0	
442	469	CHILC220	PLATA220	1	-110.00	300.0	
469	470	PLATA220	PLATI3.8	1	-110.00	240.0	

Tabla N° 4.8 Resultados de barras de demanda mayor a 20 MW – despacho económico, operación en alerta.

Número Barra	Código WinFlu	Nombre de Subestación	Theta (rad)	Costo Marg. (US \$/MWh)	Demanda (MW)
2	CHICL10.	CHICLAYO 10.5 kV	0.165	33.5	29.4
8	CHICL10	CHICLAYO 10 kV	0.184	33.5	22.9
12	PIURA10	PIURA 10 kV	0.117	33.5	27.6
22	CHIM138	CHIMBOTE 1 138 kV	0.544	33.5	47.9
35	CHAVA60	CHAVARRIA 60 kV	0.53	33.71	140.7
37	REFZN220	REFINERIA ZINC 220 kV	0.612	33.61	98.0
49	HUIN12	HUINCO 220 kV	0.508	33.78	147.8
50	BAL60	BALNEARIOS 60 kV	0.477	33.93	338.6
56	IND60	INDEPENDENCIA 60 kV	0.627	26.78	40.0
62	SNICO13	SAN NICOLAS 13.8 kV	0.423	26.78	45.2
77	BARS160	BARSI 60 kV	0.498	33.71	206.5
85	SALAM60	SALAMANCA 60 kV	0.466	33.91	51.2
86	PUENT60	DERIVACION PUENTE 60 kV	0.461	33.87	143.3
90	HUACH60	HUACHIPA 60 kV	0.468	33.77	57.9
95	SIDNOR13	SIDER NORTE 13.8 kV	0.456	33.5	38.0
96	SIDSUR13	SIDER SUR 13.8 kV	0.475	33.5	28.0
115	CARIPA	CARIPA 138 kV	0.712	33.1	24.5
122	PARAG11	PARAGSHA 2 138 kV	0.729	33.15	25.0
127	P EXIS	PARAMONGA EXISTENTE 13.8 kV	0.529	33.5	34.6
129	SROSV60	SANTA ROSA VIEJA 60 kV	0.503	33.82	53.2
133	TRU NO	TRUJILLO NORTE 10 kV	0.28	33.5	21.3
135	TG4 TS	CENTRAL TRUJILLO SUR 10 kV	0.254	33.5	23.9
136	TRU SUR	TRUJILLO SUR 10 kV	0.25	33.5	25.0
141	PACA 6	PACASMAYO 6.3 kV	0.135	33.5	30.1
152	SJNLS2	SAN JUAN 2 60 kV	0.54	34	190.6
196	ZORRI10	ZORRITOS 10 kV	0.079	33.5	31.6
204	ANTA220	ANTAMINA 220 kV	0.662	33.31	89.0
248	CVERI38	CERRO VERDE 138 kV	0.812	31.5	47.0
250	TOQUE13	TOQUEPALA 13.8 kV	0.675	31.5	29.0
258	SPCC138	ILO 1 138 kV	0.709	31.5	38.8
279	BCONC6	BOTIFLACA 6 kV	0.716	31.5	27.1
322	BOT6.9	BOTIFLACA 6.9 kV	0.698	31.5	21.3
325	PQIB33	PARQUE INDUSTRIAL (SEAL) 33 kV	0.771	31.5	26.0
353	YURA6.9	YURA 6.9 kV	1.107	31.5	23.9
355	CAJ220	CAJAMARCA 220 kV	0.29	33.5	83.3
375	PUCAL60	PUCALLPA 60 kV	0.818	33.28	26.4
398	ZARUMILL	ZARUMILLA 220 kV	0.081	33.5	69.7
410	LIXIV13.	LIXIVIACION 13.8 kV	0.706	31.5	23.2
417	TACAM60	TACAMA 60 kV	0.543	26.78	30.6
422	SROS10	SANTA ROSA 10 kV	0.404	33.77	86.5
426	CANT10	CANTO GRANDE 10 kV	0.392	33.77	35.3
428	TACNA10	TACNA 10 kV	0.418	33.77	53.6
433	STANITA1	SANTA ANITA 10 kV	0.404	33.79	31.2
435	SULF3 22	SULFUROS 22.9 kV	0.771	31.5	113.7
442	CHILC220	CHILCA 220 kV	0.707	24	40.1
451	PPIEDR60	PUENTE PIEDRA 60 kV	0.493	33.7	25.9
453	OQUEND60	OQUENDO 60 kV	0.531	33.7	22.4
454	TVALLE60	TOMAS VALLE 60 kV	0.521	33.7	43.4
455	NARANJ60	NARANJAL 60 kV	0.518	33.7	39.4
456	INFANT60	INFANTAS 60 kV	0.513	33.7	30.6
472	AAREQ220	ACEROS AREQUIPA 220 kV	0.64	26.78	100.0

Tabla N° 4.9 Resultados de generación de las centrales y grupos térmicos – despacho económico, operación en alerta.

Núm. Barra	Código WinFlu	Datos de central de generación		Combustible	Gen. Máx. (MW)	Gen. Min. (MW)	Gen. sol. (MW)	Costo (US \$/h)	Emisión (kg-CO ₂ /h)	
		Nombre	Grupo(s)							
12	PIURA10	Piura	GMT1, GMT2	Diesel	9.8	3	9.8	294.0	6860.0	
47	SROS13A	San Rosa Nueva	UT15	Diesel	52.8	30	52.8	1610.4	37065.6	
62	SNICO13	San Nicolas	TV-1	Diesel	20.2	10	10.0	310.0	7040.0	
125	TALA10	Malacas	TGN4	Gas Natural	98.1	6	98.1	1962.0	39240.0	
130	VENT C	Ventanilla	TG3	Gas Natural	152.2	70	152.2	3120.1	61184.4	
145	VENT D	Ventanilla	TG4	Gas Natural	156.2	70	156.2	3280.2	63104.8	
146	AG13 TG2	Aguaytia	TG2	Gas Natural	85.9	40	85.9	1846.9	34875.4	
149	MALACAS	Malacas	TG1, TG2	Gas Natural	32	10	32.0	704.0	13056.0	
196	ZORR10	Tumbes	Mack1	Diesel	9.2	5	9.2	289.8	6495.2	
216	PUNO10	Bellavista 2	MAN1	Diesel	1.9	1.05	1.1	33.6	743.4	
292	LOTV3	llo 1	TV3	Diesel	66	22	22.0	715.0	15620.0	
295	CATKAT	llo 1	CAT	Diesel	3.3	1	1.0	33.0	712.0	
303	TVCARB	llo 2	TV21	Carbón	141	50	141.0	1410.0	135360.0	
388	AG13 TG1	Aguaytia	TG1	Gas Natural	87.6	40	87.6	1883.4	35565.6	
414	CHIL TG1	Chilca Uno	TG1	Gas Natural	174	45	174.0	3915.0	71340.0	
444	KALL TG1	Kallpa	TG1	Gas Natural	171	40	171.0	3933.0	70452.0	
464	OQUEND13	Oquendo	G1	Gas Natural	29.6	10	29.6	695.6	12254.4	
465	CHIL TG3	Chilca Uno	TG3	Gas Natural	174	45	144.9	3476.7	60263.3	
467	TNOR13.8	Trujillo Norte	G1, G2	Diesel	70.12	10	57.2	1915.0	40814.5	
471	SROTG8	Santa Rosa	TG8	Gas Natural	172	45	172.0	4214.0	71896.0	
Total								1607.5	35641.7	783942.7

4.3 Despacho ambiental

4.3.1 Resultados para operación normal

Flujos en ramas

En la Tabla N° 4.10 se muestran los resultados de flujos en ramas con flujos máximos mayores a 200 MW para el despacho ambiental. Se observa que ningún flujo en las líneas alcanza su respectivo valor máximo, lo que indica que no existe congestión en el sistema.

Emisiones marginales en barra

En la Tabla N° 4.11 se muestran los resultados de barras de demanda mayor a 20 MW para el despacho ambiental. Debido que no existe congestión, las emisiones marginales de las barras son idénticas e iguales a 714 kg-CO₂/MWh, también este valor es igual a la emisión incremental del grupo G1 y G2 de la central Trujillo Norte.

Costos y emisiones

En la Tabla N° 4.12 se muestran los resultados de generación de las centrales y grupos térmicos para el despacho económico. Se observa que el sistema alcanza un costo total de operación de 37431.4 US \$/h y una emisión total de contaminantes de 752586.4 kg-CO₂/h. Esta vez la central llo 2 (grupo TV21) entrega su mínima potencia, debido que es la más contaminante en comparación a las demás por utilizar carbón.

Tabla N° 4.10 Resultados de flujos en ramas con flujos máximos mayores a 200 MW – despacho ambiental, operación normal.

Núm. Barra		Código Barra		Número de cktos	Flujo sol. Total (MW)	Flujo máximo Total (MW)	Congestión?
Inicial	Final	Inicial	Final				
19	21	CHIM220	PANU220	2	-80.81	400.0	
19	473	CHIM220	NEUTRO0	1	-100.91	240.0	
21	207	PANU220	HCHO220	1	-0.85	228.6	
22	473	CHIM138	NEUTRO0	1	100.91	240.0	
23	24	HUALL138	C.PATO	1	-249.60	300.0	
30	32	ZAPA220	VENT220	2	69.27	457.2	
30	207	ZAPA220	HCHO220	1	13.15	228.6	
32	130	VENT220	VENT_C	1	-151.70	215.0	
32	145	VENT220	VENT_D	1	-155.70	215.0	
32	411	VENT220	VENTTV	1	0.00	260.0	
32	446	VENT220	CHILLON2	2	74.51	500.0	
33	34	CHAVA220	ROSA220	2	67.44	457.2	
33	35	CHAVA220	CHAVA60	1	256.39	420.0	
33	36	CHAVA220	BARS1220	2	206.50	457.2	
33	37	CHAVA220	REFZN220	1	-80.15	370.4	
33	89	CHAVA220	CALLA220	1	-148.02	370.4	
34	48	ROSA220	HUIN220	2	120.22	685.8	
34	53	ROSA220	SJNLS220	2	-195.34	457.2	
34	471	ROSA220	SROTG8	1	-172.00	230.0	
36	475	BARS1220	NEUTRO2	1	206.50	255.0	
37	89	REFZN220	CALLA220	1	-178.15	370.4	
38	89	MAT220	CALLA220	1	62.70	228.6	
45	129	SROSA60	SROSV60	2	96.03	457.2	
48	49	HUIN220	HUIN12	1	120.22	340.0	
52	53	BAL220	SJNLS220	2	-373.93	457.2	
53	152	SJNLS220	SJNLS2	1	190.60	280.0	
53	442	SJNLS220	CHILC220	2	-524.27	720.0	
55	472	IND220	AAREO220	1	100.00	220.0	
64	117	CARM1220	MAN13B	1	-643.30	720.0	
64	335	CARM1220	SER11	1	94.10	304.0	
64	337	CARM1220	SER12	1	94.10	304.0	
65	66	REST1220	REST113	1	-210.06	247.5	
68	69	PACHA220	ONU220	1	-17.44	258.1	
68	205	PACHA220	YANA220	1	-165.63	380.0	
77	475	BARS160	NEUTRO2	1	-206.50	255.0	
83	481	SETNOR22	NEUTRO8	1	56.02	200.0	
88	89	CALL220	CALLA220	1	271.28	381.1	
131	481	SETNOR1	NEUTRO8	1	-56.02	200.0	
205	210	YANA220	CHIMA220	1	-150.00	380.0	
244	297	SOCA138	SOCA220	2	-12.68	400.0	
297	305	SOCA220	SER21	1	-100.04	304.0	
297	338	SOCA220	SER22	1	-88.17	304.0	
301	504	MON138	NEUTRO31	1	-64.63	300.0	
301	505	MON138	NEUTRO32	1	-64.63	300.0	
302	304	TVCAR220	MONT220	2	40.00	800.0	
304	504	MONT220	NEUTRO31	1	64.63	300.0	
304	505	MONT220	NEUTRO32	1	64.63	300.0	
305	334	SER21	COTARUSE	1	-100.04	300.0	
334	335	COTARUSE	SER11	1	-94.10	300.0	
334	337	COTARUSE	SER12	1	-94.10	300.0	
334	338	COTARUSE	SER22	1	88.17	300.0	
376	395	CM220	SISAB220	2	-149.40	678.2	
412	434	CVFR220	SULFUROS	1	113.67	200.0	
413	414	CHILUNO2	CHIL TG1	1	-174.00	210.0	
413	441	CHILUNO2	CHIL TG2	1	0.00	210.0	
413	442	CHILUNO2	CHILC220	2	348.00	900.0	
413	465	CHILUNO2	CHIL TG3	1	-174.00	210.0	
420	421	SROSA60E	SROSV60E	1	68.13	228.6	
434	509	SULFUROS	NEUTRO36	1	113.67	249.0	
435	509	SULF3 22	NEUTRO36	1	-113.67	249.0	
442	444	CHILC220	KALL TG1	1	-171.00	210.0	
442	466	CHILC220	KALL TG2	1	0.00	230.0	
442	469	CHILC220	PLATA220	1	-110.00	300.0	
469	470	PLATA220	PLAT13.8	1	-110.00	240.0	

Tabla N° 4.11 Resultados de barras de demanda mayor a 20 MW – despacho ambiental, operación normal.

Número Barra	Código WinFlu	Nombre de Subestación	Theta (rad)	Emisión Marg. (US \$/MWh)	Demanda (MW)
2	CHICL10.	CHICLAYO 10.5 kV	0.396	714	29.4
8	CHICL10	CHICLAYO 10 kV	0.415	714	22.9
12	PIURA10	PIURA 10 kV	0.348	714	27.6
22	CHIMI38	CHIMBOTE 1 138 kV	0.772	714	47.9
35	CHAVA60	CHAVARRIA 60 kV	0.751	714	140.7
37	REFZN220	REFINERIA ZINC 220 kV	0.832	714	98.0
49	HUIN12	HUINCO 220 kV	0.729	714	147.8
50	BAL60	BALNEARIOS 60 kV	0.7	714	338.6
56	IND60	INDEPENDENCIA 60 kV	0.851	714	40.0
62	SNICO13	SAN NICOLAS 13.8 kV	0.694	714	45.2
77	BARSI60	BARSI 60 kV	0.719	714	206.5
85	SALAM60	SALAMANCA 60 kV	0.688	714	51.2
86	PUENT60	DERIVACION PUENTE 60 kV	0.683	714	143.3
90	HUACH60	HUACHIPA 60 kV	0.689	714	57.9
95	SIDNOR13	SIDER NORTE 13.8 kV	0.684	714	38.0
96	SIDSUR13	SIDER SUR 13.8 kV	0.703	714	28.0
115	CARIPA	CARIPA 138 kV	0.929	714	24.5
122	PARAGII	PARAGSHA 2 138 kV	0.946	714	25.0
127	P EXIS	PARAMONGA EXISTENTE 13.8 kV	0.751	714	34.6
129	SROSV60	SANTA ROSA VIEJA 60 kV	0.725	714	53.2
133	TRU_NO	TRUJILLO NORTE 10 kV	0.512	714	21.3
135	TG4 TS	CENTRAL TRUJILLO SUR 10 kV	0.487	714	23.9
136	TRU_SUR	TRUJILLO SUR 10 kV	0.482	714	25.0
141	PACA_6	PACASMAYO 6.3 kV	0.366	714	30.1
152	SJNLS2	SAN JUAN 2 60 kV	0.763	714	190.6
196	ZORRI10	ZORRITOS 10 kV	0.31	714	31.6
204	ANTA220	ANTAMINA 220 kV	0.882	714	89.0
248	CVERI38	CERRO VERDE 138 kV	0.969	714	47.0
250	TOQUE13	TOQUEPALA 13.8 kV	0.821	714	29.0
258	SPCC138	ILO 1 138 kV	0.894	714	38.8
279	BCONC6	BOTIFLACA 6 kV	0.858	714	27.1
322	BOT6.9	BOTIFLACA 6.9 kV	0.84	714	21.3
325	PQIB33	PARQUE INDUSTRIAL (SEAL) 33 kV	0.929	714	26.0
353	YURA6.9	YURA 6.9 kV	1.256	714	23.9
355	CAJ220	CAJAMARCA 220 kV	0.521	714	83.3
375	PUCAL60	PUCALLPA 60 kV	1.038	714	26.4
398	ZARUMILL	ZARUMILLA 220 kV	0.312	714	69.7
410	LIXIV13.	LIXIVIACION 13.8 kV	0.851	714	23.2
417	TACAM60	TACAMA 60 kV	0.772	714	30.6
422	SROSIO	SANTA ROSA 10 kV	0.625	714	86.5
426	CANTIO	CANTO GRANDE 10 kV	0.613	714	35.3
428	TACNAI0	TACNA 10 kV	0.639	714	53.6
433	STANITAI	SANTA ANITA 10 kV	0.625	714	31.2
435	SULF3_22	SULFUROS 22.9 kV	0.929	714	113.7
442	CHILC220	CHILCA 220 kV	0.934	714	40.1
451	PIEDR60	PUENTE PIEDRA 60 kV	0.714	714	25.9
453	OQUEND60	OQUENDO 60 kV	0.752	714	22.4
454	TVALLE60	TOMAS VALLE 60 kV	0.742	714	43.4
455	NARANJ60	NARANJAL 60 kV	0.739	714	39.4
456	INFANT60	INFANTAS 60 kV	0.734	714	30.6
472	AAREQ220	ACEROS AREQUIPA 220 kV	0.863	714	100.0

Tabla N° 4.12 Resultados de generación de las centrales y grupos térmicos – despacho ambiental, operación normal.

Núm. Barra	Código WinFlu	Datos de central de generación		Combustible	Gen. Máx. (MW)	Gen. Mín. (MW)	Gen. sol. (MW)	Costo (US \$/h)	Emisión (kg-CO ₂ /h)	
		Nombre	Grupo(s)							
12	PIURA10	Piura	GMT1, GMT2	Diesel	9.8	3	9.8	294.0	6860.0	
47	SROS13A	San Rosa Nueva	UT15	Diesel	52.8	30	52.8	1610.4	37065.6	
62	SNICO13	San Nicolas	TV-1	Diesel	20.2	10	20.2	626.2	14220.8	
125	TALAI0	Malacas	TGN4	Gas Natural	98.1	6	98.1	1962.0	39240.0	
130	VENT C	Ventanilla	TG3	Gas Natural	152.2	70	152.2	3120.1	61184.4	
145	VENT D	Ventanilla	TG4	Gas Natural	156.2	70	156.2	3280.2	63104.8	
146	AG13 TG2	Aguaytia	TG2	Gas Natural	85.9	40	85.9	1846.9	34875.4	
149	MALACAS	Malacas	TG1, TG2	Gas Natural	32	10	32.0	704.0	13056.0	
196	ZORR10	Tumbes	Mack1	Diesel	9.2	5	9.2	289.8	6495.2	
216	PUNO10	Bellavista 2	MAN1	Diesel	1.9	1.05	1.9	60.8	1345.2	
292	ILOTV3	Ilo 1	TV3	Diesel	66	22	66.0	2145.0	46860.0	
295	CATKAT	Ilo 1	CAT	Diesel	3.3	1	3.3	108.9	2349.6	
303	TVCARB	Ilo 2	TV21	Carbón	141	50	50.0	500.0	48000.0	
388	AG13 TG1	Aguaytia	TG1	Gas Natural	87.6	40	87.6	1883.4	35565.6	
414	CHIL TG1	Chilca Uno	TG1	Gas Natural	174	45	174.0	3915.0	71340.0	
444	KALL TG1	Kallpa	TG1	Gas Natural	171	40	171.0	3933.0	70452.0	
464	OQUEND13	Oquendo	G1	Gas Natural	29.6	10	29.6	695.6	12254.4	
465	CHIL TG3	Chilca Uno	TG3	Gas Natural	174	45	174.0	4176.0	72384.0	
467	TNOR13.8	Trujillo Norte	G1, G2	Diesel	70.12	10	61.7	2066.2	44037.4	
471	SROTG8	Santa Rosa	TG8	Gas Natural	172	45	172.0	4214.0	71896.0	
Total								1607.5	37431.4	752586.4

4.3.2 Resultados para operación en alerta

Flujos en ramas

En la Tabla N° 4.13 se muestran los resultados de flujos en ramas con flujos máximos mayores a 200 MW para el despacho ambiental. Se observa que los flujos de las líneas de transmisión San Juan – Chilca 220 kV alcanzan su valor máximo de 200 MW, lo que indica que existe congestión en el sistema.

Emisiones marginales en barra

En la Tabla N° 4.14 se muestran los resultados de barras de demanda mayor a 20 MW para el despacho ambiental. Debido que existe congestión, las emisiones marginales de las barras son diferentes.

Costos y emisiones

En la Tabla N° 4.15 se muestran los resultados de generación de las centrales y grupos térmicos para el despacho ambiental. Se observa que el sistema alcanza un costo total de operación de 37056.1 US \$/h y una emisión total de contaminantes de 767091.2 kg-CO₂/h, mayor que el caso sin congestión. Debido a la congestión, la central Ilo 2 (grupo TV21) debió entregar una potencia mayor a su potencia mínima, esto por circunstancias topológicas del sistema.

Tabla N° 4.13 Resultados de flujos en ramas con flujos máximos mayores a 200 MW – despacho ambiental, operación en alerta.

Núm. Barra		Código Barra		Número de ckts	Flujo sol. Total (MW)	Flujo máximo Total (MW)	Congestión?
Inicial	Final	Inicial	Final				
19	21	CHIM220	PANU220	2	-72.37	400.0	
19	473	CHIM220	NEUTRO0	1	-100.91	240.0	
21	207	PANU220	HCHO220	1	2.62	228.6	
22	473	CHIM138	NEUTRO0	1	100.91	240.0	
23	24	HUALL138	C.PATO	1	-249.60	300.0	
30	32	ZAPA220	VENT220	2	79.23	457.2	
30	207	ZAPA220	HCHO220	1	9.68	228.6	
32	130	VENT220	VENT C	1	-151.70	215.0	
32	145	VENT220	VENT D	1	-155.70	215.0	
32	411	VENT220	VENTTV	1	0.00	260.0	
32	446	VENT220	CHILLON2	2	74.72	500.0	
33	34	CHAVA220	ROSA220	2	82.12	457.2	
33	35	CHAVA220	CHAVA60	1	256.18	420.0	
33	36	CHAVA220	BARS220	2	206.50	457.2	
33	37	CHAVA220	REFZN220	1	-82.46	370.4	
33	89	CHAVA220	CALLA220	1	-150.43	370.4	
34	48	ROSA220	HUIN220	2	120.22	685.8	
34	53	ROSA220	SJNLS220	2	-181.43	457.2	
34	471	ROSA220	SROTG8	1	-172.00	230.0	
36	475	BARS220	NEUTRO2	1	206.50	255.0	
37	89	REFZN220	CALLA220	1	-180.46	370.4	
38	89	MAT220	CALLA220	1	62.70	228.6	
45	129	SROSA60	SROSV60	2	95.77	457.2	
48	49	HUIN220	HUIN12	1	120.22	340.0	
52	53	BAL220	SJNLS220	2	-372.34	457.2	
53	152	SJNLS220	SJNLS2	1	190.60	280.0	
53	442	SJNLS220	CHILC220	2	-500.00	500.0	X
55	472	IND220	AAREQ220	1	100.00	220.0	
64	117	CARM220	MAN13B	1	-643.30	720.0	
64	335	CARM220	SER11	1	80.39	304.0	
64	337	CARM220	SER12	1	80.39	304.0	
65	66	RESTI220	RESTI13	1	-210.06	247.5	
68	69	PACHA220	ONU220	1	-18.53	258.1	
68	205	PACHA220	YANA220	1	-165.63	380.0	
77	475	BARS160	NEUTRO2	1	-206.50	255.0	
83	481	SETNOR2	NEUTRO8	1	47.58	200.0	
88	89	CALI.220	CALLA220	1	276.81	381.1	
131	481	SETNOR1	NEUTRO8	1	-47.58	200.0	
205	210	YANA220	CHIMA220	1	-150.00	380.0	
244	297	SOCA138	SOCA220	2	-11.48	400.0	
297	305	SOCA220	SER21	1	-85.46	304.0	
297	338	SOCA220	SER22	1	-75.31	304.0	
301	504	MON138	NEUTRO31	1	-64.63	300.0	
301	505	MON138	NEUTRO32	1	-64.63	300.0	
302	304	TVCAR220	MONT220	2	67.44	800.0	
304	504	MONT220	NEUTRO31	1	64.63	300.0	
304	505	MONT220	NEUTRO32	1	64.63	300.0	
305	334	SER21	COTARUSE	1	-85.46	300.0	
334	335	COTARUSE	SER11	1	-80.39	300.0	
334	337	COTARUSE	SER12	1	-80.39	300.0	
334	338	COTARUSE	SER22	1	75.31	300.0	
376	395	CM220	SISAB220	2	-149.40	678.2	
412	434	CVER220	SULFUROS	1	113.67	200.0	
413	414	CHILUNO2	CHIL TG1	1	-174.00	210.0	
413	441	CHILUNO2	CHIL TG2	1	0.00	210.0	
413	442	CHILUNO2	CHILC220	2	322.32	900.0	
413	465	CHILUNO2	CHIL TG3	1	-148.32	210.0	
420	421	SROSA60E	SROSV60E	1	68.09	228.6	
434	509	SULFUROS	NEUTRO36	1	113.67	249.0	
435	509	SULF3 22	NEUTRO36	1	-113.67	249.0	
442	444	CHILC220	KALL TG1	1	-171.00	210.0	
442	466	CHILC220	KALL TG2	1	0.00	230.0	
442	469	CHILC220	PLATA220	1	-110.00	300.0	
469	470	PLATA220	PLAT13.8	1	-110.00	240.0	

Tabla N° 4.14 Resultados de barras de demanda mayor a 20 MW – despacho ambiental, operación en alerta.

Número Barra	Código WinFlu	Nombre de Subestación	Theta (rad)	Emisión Marg. (US \$/MWh)	Demanda (MW)
2	CHICL10.	CHICLAYO 10.5 kV	0.37	1105.06	29.4
8	CHICL10	CHICLAYO 10 kV	0.389	1105.06	22.9
12	PIURA10	PIURA 10 kV	0.323	1105.06	27.6
22	CHIM138	CHIMBOTE 1 138 kV	0.741	1105.06	47.9
35	CHAVA60	CHAVARRIA 60 kV	0.703	1119.97	140.7
37	REFZN220	REFINERIA ZINC 220 kV	0.784	1113.05	98.0
49	HUIN12	HUINCO 220 kV	0.68	1125.6	147.8
50	BAL60	BALNEARIOS 60 kV	0.649	1136.15	338.6
56	IND60	INDEPENDENCIA 60 kV	0.797	617.8	40.0
62	SNICO13	SAN NICOLAS 13.8 kV	0.592	617.8	45.2
77	BARSI60	BARSI 60 kV	0.67	1120.24	206.5
85	SALAM60	SALAMANCA 60 kV	0.638	1134.64	51.2
86	PUENT60	DERIVACION PUENTE 60 kV	0.633	1132.21	143.3
90	HUACH60	HUACHIPA 60 kV	0.64	1124.44	57.9
95	SIDNOR13	SIDER NORTE 13.8 kV	0.653	1105.06	38.0
96	SIDSUR13	SIDER SUR 13.8 kV	0.671	1105.06	28.0
115	CARIPA	CARIPA 138 kV	0.885	1076.39	24.5
122	PARAGII	PARAGSHA 2 138 kV	0.902	1079.82	25.0
127	P EXIS	PARAMONGA EXISTENTE 13.8 kV	0.711	1105.06	34.6
129	SROSV60	SANTA ROSA VIEJA 60 kV	0.675	1128.23	53.2
133	TRU NO	TRUJILLO NORTE 10 kV	0.489	1105.06	21.3
135	TG4 TS	CENTRAL TRUJILLO SUR 10 kV	0.464	1105.06	23.9
136	TRU SUR	TRUJILLO SUR 10 kV	0.459	1105.06	25.0
141	PACA 6	PACASMAYO 6.3 kV	0.34	1105.06	30.1
152	SJNLS2	SAN JUAN 2 60 kV	0.712	1141.61	190.6
196	ZORRI10	ZORRITOS 10 kV	0.284	1105.06	31.6
204	ANTA220	ANTAMINA 220 kV	0.84	1091.13	89.0
248	CVER138	CERRO VERDE 138 kV	0.959	960	47.0
250	TOQUE13	TOQUEPALA 13.8 kV	0.828	960	29.0
258	SPCC138	ILO 1 138 kV	0.901	960	38.8
279	BCONC6	BOTIFLACA 6 kV	0.865	960	27.1
322	BOT6.9	BOTIFLACA 6.9 kV	0.848	960	21.3
325	PQIB33	PARQUE INDUSTRIAL (SEAL) 33 kV	0.919	960	26.0
353	YURA6.9	YURA 6.9 kV	1.252	960	23.9
355	CAJ220	CAJAMARCA 220 kV	0.495	1105.06	83.3
375	PUCAL60	PUCALLPA 60 kV	0.995	1088.92	26.4
398	ZARUMILL	ZARUMILLA 220 kV	0.286	1105.06	69.7
410	LIXIV13.	LIXIVIACION 13.8 kV	0.858	960	23.2
417	TACAM60	TACAMA 60 kV	0.712	617.8	30.6
422	SROS10	SANTA ROSA 10 kV	0.576	1124.96	86.5
426	CANTIO	CANTO GRANDE 10 kV	0.564	1124.99	35.3
428	TACNA10	TACNA 10 kV	0.59	1124.98	53.6
433	STANITAI	SANTA ANITA 10 kV	0.576	1125.94	31.2
435	SULF3 22	SULFUROS 22.9 kV	0.918	960	113.7
442	CHILC220	CHILCA 220 kV	0.879	416	40.1
451	PPIEDR60	PUENTE PIEDRA 60 kV	0.666	1119.74	25.9
453	OQUEND60	OQUENDO 60 kV	0.704	1119.76	22.4
454	TVALLE60	TOMAS VALLE 60 kV	0.693	1119.91	43.4
455	NARANJ60	NARANJAL 60 kV	0.69	1119.79	39.4
456	INFANT60	INFANTAS 60 kV	0.685	1119.85	30.6
472	AAREQ220	ACEROS AREQUIPA 220 kV	0.809	617.8	100.0

Tabla N° 4.15 Resultados de generación de las centrales y grupos térmicos – despacho ambiental, operación en alerta.

Núm. Barra	Código WinFlu	Datos de central de generación		Combustible	Gen. Máx. (MW)	Gen. Mín. (MW)	Gen. sol. (MW)	Costo (US \$/h)	Emisión (kg-CO ₂ /h)
		Nombre	Grupo(s)						
12	PIURA10	Piura	GMT1, GMT2	Diesel	9.8	3	9.8	294.0	6860.0
47	SROS13A	San Rosa Nueva	UT15	Diesel	52.8	30	52.8	1610.4	37065.6
62	SNICO13	San Nicolas	TV-1	Diesel	20.2	10	10.0	310.0	7040.0
125	TALAI0	Malacas	TGN4	Gas Natural	98.1	6	98.1	1962.0	39240.0
130	VENT C	Ventanilla	TG3	Gas Natural	152.2	70	152.2	3120.1	61184.4
145	VENT D	Ventanilla	TG4	Gas Natural	156.2	70	156.2	3280.2	63104.8
146	AG13 TG2	Aguaytia	TG2	Gas Natural	85.9	40	85.9	1846.9	34875.4
149	MALACAS	Malacas	TG1, TG2	Gas Natural	32	10	32.0	704.0	13056.0
196	ZORR110	Tumbes	Mack1	Diesel	9.2	5	9.2	289.8	6495.2
216	PUNO10	Bellavista 2	MAN1	Diesel	1.9	1.05	1.9	60.8	1345.2
292	ILOTV3	Ilo 1	TV3	Diesel	66	22	66.0	2145.0	46860.0
295	CATKAT	Ilo 1	CAT	Diesel	3.3	1	3.3	108.9	2349.6
303	TVCARB	Ilo 2	TV21	Carbón	141	50	77.4	774.4	74340.8
388	AG13 TG1	Aguaytia	TG1	Gas Natural	87.6	40	87.6	1883.4	35565.6
414	CHIL TG1	Chilca Uno	TG1	Gas Natural	174	45	174.0	3915.0	71340.0
444	KALL TG1	Kallpa	TG1	Gas Natural	171	40	171.0	3933.0	70452.0
464	OQUEND13	Oquendo	G1	Gas Natural	29.6	10	29.6	695.6	12254.4
465	CHIL TG3	Chilca Uno	TG3	Gas Natural	174	45	148.3	3559.7	61700.6
467	TNOR13.8	Trujillo Norte	G1, G2	Diesel	70.12	10	70.1	2349.0	50065.7
471	SROTG8	Santa Rosa	TG8	Gas Natural	172	45	172.0	4214.0	71896.0
Total							1607.5	37056.1	767091.2

4.4 Despacho económico con restricciones ambientales

Dentro de la formulación del despacho económico con restricciones ambientales se hace necesario definir un límite de emisión de contaminantes E_{\max} , para lo cual se tomaron en cuenta las soluciones del despacho económico y ambiental (para la operación en alerta) por separado de la siguiente forma:

- ◆ Despacho económico:

$$F_T = 35641.7 \text{ US } \$/\text{h}, \quad E_T = 783942.7 \text{ kg-CO}_2/\text{h}.$$

- ◆ Despacho ambiental:

$$F_T = 37056.1 \text{ US } \$/\text{h}, \quad E_T = 767091.2 \text{ kg-CO}_2/\text{h}.$$

Se observa que E_{\max} no podría ser menor que el valor de despacho ambiental, debido que esta es la emisión óptima en el sistema, y no mayor que el valor del despacho económico ($767091.2 \text{ kg-CO}_2/\text{h} < E_{\max} < 783942.7 \text{ kg-CO}_2/\text{h}$).

Para el análisis del sistema SEIN 2010 se eligió el valor de $E_{\max} = 770000 \text{ kg-CO}_2/\text{h}$.

4.4.1 Resultados para operación normal

Flujos en ramas

En la Tabla N° 4.16 se muestran los resultados de flujos en ramas con flujos máximos mayores a 200 MW para el despacho económico con restricciones ambientales. Se observa que no existe congestión en el sistema.

Costos marginales en barra

En la Tabla N° 4.17 se muestran los resultados de barras de demanda mayor a 20 MW para el despacho económico con restricciones ambientales.

Debido que no existe congestión, los costos marginales de las barras son idénticos e iguales a 96.4 US \$/MWh.

Esta vez los costos marginales de las barras no son iguales al costo marginal de algún generador en particular sino un valor que considera el efecto de mantener la emisión total del sistema al valor límite.

Costos y emisiones

En la Tabla N° 4.18 se muestran los resultados de generación de las centrales y grupos térmicos para el despacho económico con restricciones ambientales.

Se observa que el sistema alcanza un costo total de operación de 35792.4 US \$/h y una emisión total de contaminantes de 770000.0 kg-CO₂/h, de esta forma el despacho económico con restricciones ambientales lleva en cuenta la limitación de la emisión de contaminantes en el sistema y la operación económica a la vez. La central Ilo 2 (grupo TV21) entrega una potencia menor que la máxima potencia.

Algunas centrales de Diesel, que son las más caras, operan con su mínima potencia de generación como el caso de la central Ilo 1 grupo CAT y de la central Trujillo Norte grupos G1 y G2.

Comparación de despachos económicos

Para el despacho económico se puede mencionar lo siguiente:

- ◆ Se verifica que los grupos más baratos son los que despachan más.
- ◆ No importa la emisión total de contaminantes, porque el objetivo es minimizar el costo de operación del sistema.

Para el despacho económico con restricciones ambientales se puede mencionar lo siguiente:

- ◆ Se verifica que los grupos más baratos y menos contaminantes se combinan para despachar.
- ◆ El límite de emisión de contaminantes adiciona un efecto regulador al despacho de generadores que más contaminan.
- ◆ En el caso sin congestión existe un costo marginal único en el sistema impuesto por el grupo generador que margina (que entra por último al despacho) y un efecto adicional por mantener la emisión total del sistema en un límite determinado.

Tabla N° 4.16 Resultados de flujos en ramas con flujos máximos mayores a 200 MW – despacho económico con restricciones ambientales, operación normal.

Núm. Barra		Código Barra		Número de cktos	Flujo sol. Total (MW)	Flujo máximo Total (MW)	Congestión?
Inicial	Final	Inicial	Final				
19	21	CHIM220	PANU220	2	-132.49	400.0	
19	473	CHIM220	NEUTRO0	1	-100.91	240.0	
21	207	PANU220	HCHO220	1	-19.61	228.6	
22	473	CHIM138	NEUTRO0	1	100.91	240.0	
23	24	HUALL138	C.PATO	1	-249.60	300.0	
30	32	Z.APA220	VENT220	2	38.36	457.2	
30	207	ZAPA220	HCHO220	1	31.91	228.6	
32	130	VENT220	VENT C	1	-151.70	215.0	
32	145	VENT220	VENT D	1	-155.70	215.0	
32	411	VENT220	VENTTV	1	0.00	260.0	
32	446	VENT220	CHILLON2	2	73.88	500.0	
33	34	CHAVA220	ROSA220	2	48.18	457.2	
33	35	CHAVA220	CHAVA60	1	257.02	420.0	
33	36	CHAVA220	BARS1220	2	206.50	457.2	
33	37	CHAVA220	REFZN220	1	-85.85	370.4	
33	89	CHAVA220	CALLA220	1	-153.97	370.4	
34	48	ROSA220	HUIN220	2	120.22	685.8	
34	53	ROSA220	SJNLS220	2	-212.75	457.2	
34	471	ROSA220	SROTG8	1	-172.00	230.0	
36	475	BARS1220	NEUTRO2	1	206.50	255.0	
37	89	REFZN220	CALLA220	1	-183.85	370.4	
38	89	MAT220	CALLA220	1	62.70	228.6	
45	129	SROSA60	SROSV60	2	95.79	457.2	
48	49	HUIN220	HUIN12	1	120.22	340.0	
52	53	BAL 220	SJNLS220	2	-375.34	457.2	
53	152	SJNLS220	SJNLS2	1	190.60	280.0	
53	442	SJNLS220	CHILC220	2	-534.00	720.0	
55	472	IND220	AAREQ220	1	100.00	220.0	
64	117	CARM1220	MAN13B	1	-643.30	720.0	
64	335	CARM1220	SER11	1	68.27	304.0	
64	337	CARM1220	SER12	1	68.27	304.0	
65	66	REST1220	REST113	1	-210.06	247.5	
68	69	PACHA220	ONU220	1	-5.44	258.1	
68	205	PACHA220	YANA220	1	-165.63	380.0	
77	475	BARS160	NEUTRO2	1	-206.50	255.0	
83	481	SETNOR22	NEUTRO8	1	107.70	200.0	
88	89	CALL220	CALLA220	1	283.37	381.1	
131	481	SETNOR1	NEUTRO8	1	-107.70	200.0	
205	210	YANA220	CHIMA220	1	-150.00	380.0	
244	297	SOCA138	SOCA220	2	-10.42	400.0	
297	305	SOCA220	SER21	1	-72.57	304.0	
297	338	SOCA220	SER22	1	-63.96	304.0	
301	504	MON138	NEUTRO31	1	-73.83	300.0	
301	505	MON138	NEUTRO32	1	-73.83	300.0	
302	304	TVCAR220	MONT220	2	110.50	800.0	
304	504	MONT220	NEUTRO31	1	73.83	300.0	
304	505	MONT220	NEUTRO32	1	73.83	300.0	
305	334	SER21	COTARUSE	1	-72.57	300.0	
334	335	COTARUSE	SER11	1	-68.27	300.0	
334	337	COTARUSE	SER12	1	-68.27	300.0	
334	338	COTARUSE	SER22	1	63.96	300.0	
376	395	CM220	SISAB220	2	-149.40	678.2	
412	434	CVER220	SULFUROS	1	113.67	200.0	
413	414	CHILUNO2	CHIL_TG1	1	-174.00	210.0	
413	441	CHILUNO2	CHIL_TG2	1	0.00	210.0	
413	442	CHILUNO2	CHILC220	2	348.00	900.0	
413	465	CHILUNO2	CHIL_TG3	1	-174.00	210.0	
420	421	SROSA60E	SROSV60E	1	67.92	228.6	
434	509	SULFUROS	NEUTRO36	1	113.67	249.0	
435	509	SULF3_22	NEUTRO36	1	-113.67	249.0	
442	444	CHILC220	KALI_TG1	1	-171.00	210.0	
442	466	CHILC220	KALL_TG2	1	0.00	230.0	
442	469	CHILC220	PLATA220	1	-110.00	300.0	
469	470	PLATA220	PLAT13.8	1	-110.00	240.0	

Tabla N° 4.17 Resultados de barras de demanda mayor a 20 MW – despacho económico con restricciones ambientales, operación normal.

Número Barra	Código WinFlu	Nombre de Subestación	Theta (rad)	Costo Marg. (US \$/MWh)	Demanda (MW)
2	CHICL10.	CHICLAYO 10.5 kV	0.165	96.4	29.4
8	CHICL10	CHICLAYO 10 kV	0.184	96.4	22.9
12	PIURAI0	PIURA 10 kV	0.117	96.4	27.6
22	CHIM138	CHIMBOTE 1 138 kV	0.576	96.4	47.9
35	CHAVA60	CHAVARRIA 60 kV	0.651	96.4	140.7
37	REFZN220	REFINERIA ZINC 220 kV	0.733	96.4	98.0
49	HUIN12	HUINCO 220 kV	0.63	96.4	147.8
50	BAL60	BALNEARIOS 60 kV	0.602	96.4	338.6
56	IND60	INDEPENDENCIA 60 kV	0.764	96.4	40.0
62	SNICO13	SAN NICOLAS 13.8 kV	0.606	96.4	45.2
77	BARS160	BARSI 60 kV	0.618	96.4	206.5
85	SALAM60	SALAMANCA 60 kV	0.591	96.4	51.2
86	PUENT60	DERIVACION PUENTE 60 kV	0.585	96.4	143.3
90	HUACH60	HUACHIPA 60 kV	0.591	96.4	57.9
95	SIDNOR13	SIDER NORTE 13.8 kV	0.487	96.4	38.0
96	SIDSUR13	SIDER SUR 13.8 kV	0.506	96.4	28.0
115	CARIPA	CARIPA 138 kV	0.827	96.4	24.5
122	PARAGII	PARAGSHA 2 138 kV	0.84	96.4	25.0
127	P EXIS	PARAMONGA EXISTENTE 13.8 kV	0.613	96.4	34.6
129	SROSV60	SANTA ROSA VIEJA 60 kV	0.626	96.4	53.2
133	TRU NO	TRUJILLO NORTE 10 kV	0.264	96.4	21.3
135	TG4 TS	CENTRAL TRUJILLO SUR 10 kV	0.238	96.4	23.9
136	TRU SUR	TRUJILLO SUR 10 kV	0.234	96.4	25.0
141	PACA 6	PACASMAYO 6.3 kV	0.135	96.4	30.1
152	SJNLS2	SAN JUAN 2 60 kV	0.666	96.4	190.6
196	ZORRI10	ZORRITOS 10 kV	0.079	96.4	31.6
204	ANTA220	ANTAMINA 220 kV	0.762	96.4	89.0
248	CVER138	CERRO VERDE 138 kV	0.949	96.4	47.0
250	TOQUE13	TOQUEPALA 13.8 kV	0.826	96.4	29.0
258	SPCC138	ILO 1 138 kV	0.883	96.4	38.8
279	BCONC6	BOTIFLACA 6 kV	0.865	96.4	27.1
322	BOT6.9	BOTIFLACA 6.9 kV	0.847	96.4	21.3
325	PQIB33	PARQUE INDUSTRIAL (SEAL) 33 kV	0.908	96.4	26.0
353	YURA6.9	YURA 6.9 kV	1.247	96.4	23.9
355	CAJ220	CAJAMARCA 220 kV	0.29	96.4	83.3
375	PUCAL60	PUCALLPA 60 kV	0.92	96.4	26.4
398	ZARUMILL	ZARUMILLA 220 kV	0.081	96.4	69.7
410	LIXIV13.	LIXIVIACION 13.8 kV	0.856	96.4	23.2
417	TACAM60	TACAMA 60 kV	0.685	96.4	30.6
422	SROS10	SANTA ROSA 10 kV	0.526	96.4	86.5
426	CANT10	CANTO GRANDE 10 kV	0.514	96.4	35.3
428	TACNA10	TACNA 10 kV	0.54	96.4	53.6
433	STANITA1	SANTA ANITA 10 kV	0.527	96.4	31.2
435	SULF3 22	SULFUROS 22.9 kV	0.907	96.4	113.7
442	CHILC220	CHILCA 220 kV	0.839	96.4	40.1
451	PPIEDR60	PUENTE PIEDRA 60 kV	0.614	96.4	25.9
453	OQUEND60	OQUENDO 60 kV	0.652	96.4	22.4
454	TVALLE60	TOMAS VALLE 60 kV	0.642	96.4	43.4
455	NARANJ60	NARANJAL 60 kV	0.638	96.4	39.4
456	INFANT60	INFANTAS 60 kV	0.633	96.4	30.6
472	AAREQ220	ACEROS AREQUIPA 220 kV	0.776	96.4	100.0

Tabla N° 4.18 Resultados de generación de las centrales y grupos térmicos – despacho económico con restricciones ambientales, operación normal.

Núm. Barra	Código WinFlu	Datos de central de generación		Combustible	Gen. Máx. (MW)	Gen. Min. (MW)	Gen. sol. (MW)	Costo (US \$/h)	Emisión (kg-CO ₂ /h)	
		Nombre	Grupo(s)							
12	PIURA10	Piura	GMT1, GMT2	Diesel	9.8	3	9.8	294.0	6860.0	
47	SROS13A	San Rosa Nueva	UT15	Diesel	52.8	30	52.8	1610.4	37065.6	
62	SNICO13	San Nicolas	TV-1	Diesel	20.2	10	20.2	626.2	14220.8	
125	TALAI10	Malacas	TGN4	Gas Natural	98.1	6	98.1	1962.0	39240.0	
130	VENT C	Ventanilla	TG3	Gas Natural	152.2	70	152.2	3120.1	61184.4	
145	VENT D	Ventanilla	TG4	Gas Natural	156.2	70	156.2	3280.2	63104.8	
146	AG13 TG2	Aguaytia	TG2	Gas Natural	85.9	40	85.9	1846.9	34875.4	
149	MALACAS	Malacas	TG1, TG2	Gas Natural	32	10	32.0	704.0	13056.0	
196	ZORR110	Tumbes	Mack1	Diesel	9.2	5	9.2	289.8	6495.2	
216	PUNO10	Bellavista 2	MAN1	Diesel	1.9	1.05	1.9	60.8	1345.2	
292	ILOTV3	Ilo 1	TV3	Diesel	66	22	49.5	1608.0	35128.9	
295	CATKAT	Ilo 1	CAT	Diesel	3.3	1	1.0	33.0	712.0	
303	TVCARB	Ilo 2	TV21	Carbón	141	50	120.5	1205.0	115679.7	
388	AG13 TG1	Aguaytia	TG1	Gas Natural	87.6	40	87.6	1883.4	35565.6	
414	CHIL TG1	Chilca Uno	TG1	Gas Natural	174	45	174.0	3915.0	71340.0	
444	KALL TG1	Kallpa	TG1	Gas Natural	171	40	171.0	3933.0	70452.0	
464	OQUEND13	Oquendo	G1	Gas Natural	29.6	10	29.6	695.6	12254.4	
465	CHIL TG3	Chilca Uno	TG3	Gas Natural	174	45	174.0	4176.0	72384.0	
467	TNOR13.8	Trujillo Norte	G1, G2	Diesel	70.12	10	10.0	335.0	7140.0	
471	SROTG8	Santa Rosa	TG8	Gas Natural	172	45	172.0	4214.0	71896.0	
Total								1607.5	35792.4	770000.0

4.4.2 Resultados para operación en alerta

Flujos en ramas

En la Tabla N° 4.19 se muestran los resultados de flujos en ramas con flujos máximos mayores a 200 MW para el despacho económico con restricciones ambientales. Se observa que los flujos de las líneas de transmisión San Juan – Chilca 220 kV alcanzan su valor máximo de 200 MW, lo que indica que existe congestión en el sistema.

Costos marginales en barra

En la Tabla N° 4.20 se muestran los resultados de barras de demanda mayor a 20 MW para el despacho económico con restricciones ambientales. Debido que existe congestión, los costos marginales de las barras son diferentes y contienen el efecto de mantener la emisión total del sistema al valor límite, estos son definidos por la congestión de la línea San Juan – Chilca 220 kV.

Costos y emisiones

En la Tabla N° 4.21 se muestran los resultados de generación de las centrales y grupos térmicos para el despacho económico con restricciones ambientales. Se observa que el sistema alcanza un costo total de operación de 36792.8 US \$/h, mayor que el caso sin congestión, y una emisión total de contaminantes de 770000 kg-CO₂/h. La central Ilo 2 (grupo TV21) entrega una potencia menor que la máxima potencia. Algunas centrales de Diesel, que son las más caras, operan con su mínima potencia de generación como el caso de la central Ilo 1 grupo CAT y de la central San Nicolás grupo TV-1.

Tabla N° 4.19 Resultados de flujos en ramas con flujos máximos mayores a 200 MW – despacho económico con restricciones ambientales, operación en alerta.

Núm. Barra		Código Barra		Número de kctos	Flujo sol. Total (MW)	Flujo máximo Total (MW)	Congestión?
Inicial	Final	Inicial	Final				
19	21	CHIM220	PANU220	2	-72.37	400.0	
19	473	CHIM220	NEUTRO0	1	-100.91	240.0	
21	207	PANU220	HCHO220	1	2.62	228.6	
22	473	CHIM138	NEUTRO0	1	100.91	240.0	
23	24	HUALL138	C.PATO	1	-249.60	300.0	
30	32	ZAPA220	VENT220	2	79.23	457.2	
30	207	ZAPA220	HCHO220	1	9.68	228.6	
32	130	VENT220	VENT_C	1	-151.70	215.0	
32	145	VENT220	VENT_D	1	-155.70	215.0	
32	411	VENT220	VENTTV	1	0.00	260.0	
32	446	VENT220	CHILLON2	2	74.72	500.0	
33	34	CHAVA220	ROSA220	2	82.12	457.2	
33	35	CHAVA220	CHAVA60	1	256.18	420.0	
33	36	CHAVA220	BARSI220	2	206.50	457.2	
33	37	CHAVA220	REFZN220	1	-82.46	370.4	
33	89	CHAVA220	CALLA220	1	-150.43	370.4	
34	48	ROSA220	HUIN220	2	120.22	685.8	
34	53	ROSA220	SJNLS220	2	-181.43	457.2	
34	471	ROSA220	SROTG8	1	-172.00	230.0	
36	475	BARSI220	NEUTRO2	1	206.50	255.0	
37	89	REFZN220	CALLA220	1	-180.46	370.4	
38	89	MAT220	CALLA220	1	62.70	228.6	
45	129	SROSA60	SROSV60	2	95.77	457.2	
48	49	HUIN220	HUIN12	1	120.22	340.0	
52	53	BAL220	SJNLS220	2	-372.34	457.2	
53	152	SJNLS220	SJNLS2	1	190.60	280.0	
53	442	SJNLS220	CHILC220	2	-500.00	500.0	X
55	472	IND220	AAREQ220	1	100.00	220.0	
64	117	CARM1220	MAN13B	1	-643.30	720.0	
64	335	CARM1220	SER11	1	80.39	304.0	
64	337	CARM1220	SER12	1	80.39	304.0	
65	66	RESTI220	RESTI13	1	-210.06	247.5	
68	69	PACHA220	ONU220	1	-18.53	258.1	
68	205	PACHA220	YANA220	1	-165.63	380.0	
77	475	BARSI60	NEUTRO2	1	-206.50	255.0	
83	481	SETNOR22	NEUTRO8	1	47.58	200.0	
88	89	CALL220	CALLA220	1	276.81	381.1	
131	481	SETNOR1	NEUTRO8	1	-47.58	200.0	
205	210	YANA220	CHIMA220	1	-150.00	380.0	
244	297	SOCA138	SOCA220	2	-11.48	400.0	
297	305	SOCA220	SER21	1	-85.46	304.0	
297	338	SOCA220	SER22	1	-75.31	304.0	
301	504	MON138	NEUTRO31	1	-70.33	300.0	
301	505	MON138	NEUTRO32	1	-70.33	300.0	
302	304	TVCAR220	MONT220	2	79.09	800.0	
304	504	MONT220	NEUTRO31	1	70.33	300.0	
304	505	MONT220	NEUTRO32	1	70.33	300.0	
305	334	SER21	COTARUSE	1	-85.46	300.0	
334	335	COTARUSE	SER11	1	-80.39	300.0	
334	337	COTARUSE	SER12	1	-80.39	300.0	
334	338	COTARUSE	SER22	1	75.31	300.0	
376	395	CM220	SISAB220	2	-149.40	678.2	
412	434	CVER220	SULFUROS	1	113.67	200.0	
413	414	CHILUNO2	CHIL_TG1	1	-174.00	210.0	
413	441	CHILUNO2	CHIL_TG2	1	0.00	210.0	
413	442	CHILUNO2	CHILC220	2	322.32	900.0	
413	465	CHILUNO2	CHIL_TG3	1	-148.32	210.0	
420	421	SROSA60E	SROSV60E	1	68.09	228.6	
434	509	SULFUROS	NEUTRO36	1	113.67	249.0	
435	509	SULF3_22	NEUTRO36	1	-113.67	249.0	
442	444	CHILC220	KALL_TG1	1	-171.00	210.0	
442	466	CHILC220	KALL_TG2	1	0.00	230.0	
442	469	CHILC220	PLATA220	1	-110.00	300.0	
469	470	PLATA220	PLAT13.8	1	-110.00	240.0	

Tabla N° 4.20 Resultados de barras de demanda mayor a 20 MW – despacho económico con restricciones ambientales, operación en alerta.

Número Barra	Código WinFlu	Nombre de Subestación	Theta (rad)	Costo Marg. (US \$/MWh)	Demanda (MW)
2	CHICLI0.	CHICLAYO 10.5 kV	0.165	105.72	29.4
8	CHICLI0	CHICLAYO 10 kV	0.184	105.72	22.9
12	PIURA10	PIURA 10 kV	0.117	105.72	27.6
22	CHIMI38	CHIMBOTE I 138 kV	0.536	105.72	47.9
35	CHAVA60	CHAVARRIA 60 kV	0.497	106.68	140.7
37	REFZN220	REFINERIA ZINC 220 kV	0.579	106.24	98.0
49	HUIN12	HUINCO 220 kV	0.475	107.04	147.8
50	BAL60	BALNEARIOS 60 kV	0.444	107.72	338.6
56	IND60	INDEPENDENCIA 60 kV	0.591	74.41	40.0
62	SNICO13	SAN NICOLAS 13.8 kV	0.387	74.41	45.2
77	BARS160	BARSI 60 kV	0.465	106.7	206.5
85	SALAM60	SALAMANCA 60 kV	0.433	107.62	51.2
86	PUENT60	DERIVACION PUENTE 60 kV	0.428	107.47	143.3
90	HUACH60	HUACHIPA 60 kV	0.435	106.97	57.9
95	SIDNOR13	SIDER NORTE 13.8 kV	0.447	105.72	38.0
96	SIDSUR13	SIDER SUR 13.8 kV	0.466	105.72	28.0
115	CARIPA	CARIPA 138 kV	0.679	103.88	24.5
122	PARAGII	PARAGSHA 2 138 kV	0.697	104.1	25.0
127	P EXIS	PARAMONGA EXISTENTE 13.8 kV	0.505	105.72	34.6
129	SROSV60	SANTA ROSA VIEJA 60 kV	0.47	107.21	53.2
133	TRU NO	TRUJILLO NORTE 10 kV	0.284	105.72	21.3
135	TG4 TS	CENTRAL TRUJILLO SUR 10 kV	0.259	105.72	23.9
136	TRU SUR	TRUJILLO SUR 10 kV	0.254	105.72	25.0
141	PACA 6	PACASMAYO 6.3 kV	0.135	105.72	30.1
152	SJNLS2	SAN JUAN 2 60 kV	0.507	108.07	190.6
196	ZORRI10	ZORRITOS 10 kV	0.079	105.72	31.6
204	ANTA220	ANTAMINA 220 kV	0.635	104.83	89.0
248	CVER138	CERRO VERDE 138 kV	0.754	96.4	47.0
250	TOQUE13	TOQUEPALA 13.8 kV	0.619	96.4	29.0
258	SPCC138	ILO I 138 kV	0.682	96.4	38.8
279	BCONC6	BOTIFLACA 6 kV	0.657	96.4	27.1
322	BOT6.9	BOTIFLACA 6.9 kV	0.639	96.4	21.3
325	PQIB33	PARQUE INDUSTRIAL (SEAL) 33 kV	0.714	96.4	26.0
353	YURA6.9	YURA 6.9 kV	1.047	96.4	23.9
355	CAJ220	CAJAMARCA 220 kV	0.29	105.72	83.3
375	PUCAL60	PUCALLPA 60 kV	0.79	104.69	26.4
398	ZARUMILL	ZARUMILLA 220 kV	0.081	105.72	69.7
410	LIXIV13.	LIXIVIACION 13.8 kV	0.649	96.4	23.2
417	TACAM60	TACAMA 60 kV	0.507	74.41	30.6
422	SROS10	SANTA ROSA 10 kV	0.371	107	86.5
426	CANT10	CANTO GRANDE 10 kV	0.359	107	35.3
428	TACNA10	TACNA 10 kV	0.385	107	53.6
433	STANITA1	SANTA ANITA 10 kV	0.371	107.06	31.2
435	SULF3 22	SULFUROS 22.9 kV	0.713	96.4	113.7
442	CHILC220	CHILCA 220 kV	0.673	61.44	40.1
451	PPIEDR60	PUENTE PIEDRA 60 kV	0.461	106.67	25.9
453	OQUEND60	OQUENDO 60 kV	0.499	106.67	22.4
454	TVALLE60	TOMAS VALLE 60 kV	0.488	106.68	43.4
455	NARANJ60	NARANJAL 60 kV	0.485	106.67	39.4
456	INFANT60	INFANTAS 60 kV	0.48	106.67	30.6
472	AAREQ220	ACEROS AREQUIPA 220 kV	0.604	74.41	100.0

Tabla N° 4.21 Resultados de generación de las centrales y grupos térmicos – despacho económico con restricciones ambientales, operación en alerta.

Núm. Barra	Código WinFlu	Datos de central de generación		Combustible	Gen. Máx. (MW)	Gen. Mín. (MW)	Gen. sol. (MW)	Costo (US \$/h)	Emisión (kg-CO2/h)	
		Nombre	Grupo(s)							
12	PIURA10	Piura	GMT1, GMT2	Diesel	9.8	3	9.8	294.0	6860.0	
47	SROS13A	San Rosa Nueva	UT15	Diesel	52.8	30	52.8	1610.4	37065.6	
62	SNICO13	San Nicolas	TV-1	Diesel	20.2	10	10.0	310.0	7040.0	
125	TALAI10	Malacas	TGN4	Gas Natural	98.1	6	98.1	1962.0	39240.0	
130	VENT_C	Ventanilla	TG3	Gas Natural	152.2	70	152.2	3120.1	61184.4	
145	VENT_D	Ventanilla	TG4	Gas Natural	156.2	70	156.2	3280.2	63104.8	
146	AG13_TG2	Aguaytia	TG2	Gas Natural	85.9	40	85.9	1846.9	34875.4	
149	MALACAS	Malacas	TG1, TG2	Gas Natural	32	10	32.0	704.0	13056.0	
196	ZORRI10	Tumbes	Mack1	Diesel	9.2	5	9.2	289.8	6495.2	
216	PUNO10	Bellavista 2	MAN1	Diesel	1.9	1.05	1.9	60.8	1345.2	
292	ILOTV3	Ilo 1	TV3	Diesel	66	22	56.6	1841.0	40219.0	
295	CATKAT	Ilo 1	CAT	Diesel	3.3	1	1.0	33.0	712.0	
303	TVCARB	Ilo 2	TV21	Carbón	141	50	89.1	890.9	85528.1	
388	AG13_TG1	Aguaytia	TG1	Gas Natural	87.6	40	87.6	1883.4	35565.6	
414	CHL_TG1	Chilca Uno	TG1	Gas Natural	174	45	174.0	3915.0	71340.0	
444	KALL_TG1	Kallpa	TG1	Gas Natural	171	40	171.0	3933.0	70452.0	
464	OQUEND13	Oquendo	G1	Gas Natural	29.6	10	29.6	695.6	12254.4	
465	CHL_TG3	Chilca Uno	TG3	Gas Natural	174	45	148.3	3559.7	61700.6	
467	TNOR13.8	Trujillo Norte	G1, G2	Diesel	70.12	10	70.1	2349.0	50065.7	
471	SROTG8	Santa Rosa	TG8	Gas Natural	172	45	172.0	4214.0	71896.0	
Total								1607.5	36792.8	770000.0

4.5 Resumen de resultados de generación

Las centrales o grupos térmicos generaron potencia activa en cada análisis de despacho económico o ambiental de diferente forma para cumplir con los objetivos de optimización. A continuación se analiza la variación de la generación en cada despacho que fue presentado en este informe.

4.5.1 Operación normal

En la Fig. 4.2 se muestra la variación de la generación de las centrales o grupos térmicos para la operación normal. Sobre los resultados se puede comentar lo siguiente:

- ◆ El grupo Ilo 1 – TV3 (Diesel) genera 29 MW, 49.5 MW y 66 MW (límite máximo) para el despacho económico, despacho económico con restricciones ambientales y despacho ambiental, respectivamente. Este grupo es caro, pero contamina menos que el grupo Ilo 2 – TV21 (carbón), por lo que despacha más para condiciones ambientales.
- ◆ El grupo Ilo 2 – TV21 (carbón) genera 141 MW (límite máximo), 120.5 MW y 50 MW (límite mínimo) para el despacho económico, despacho económico con restricciones ambientales y despacho ambiental, respectivamente. Este grupo es el más contaminante, pero el más barato, por lo que despacha menos para condiciones ambientales.
- ◆ Los grupos Trujillo Norte – G1 y G2 (Diesel) generan 10 MW (límite mínimo), 10

MW (límite mínimo) y 61.7 MW para el despacho económico, despacho económico con restricciones ambientales y despacho ambiental, respectivamente. Este grupo es caro, pero contamina menos que el grupo Ilo 2 – TV21 (carbón), por lo que despacha más para condiciones ambientales.

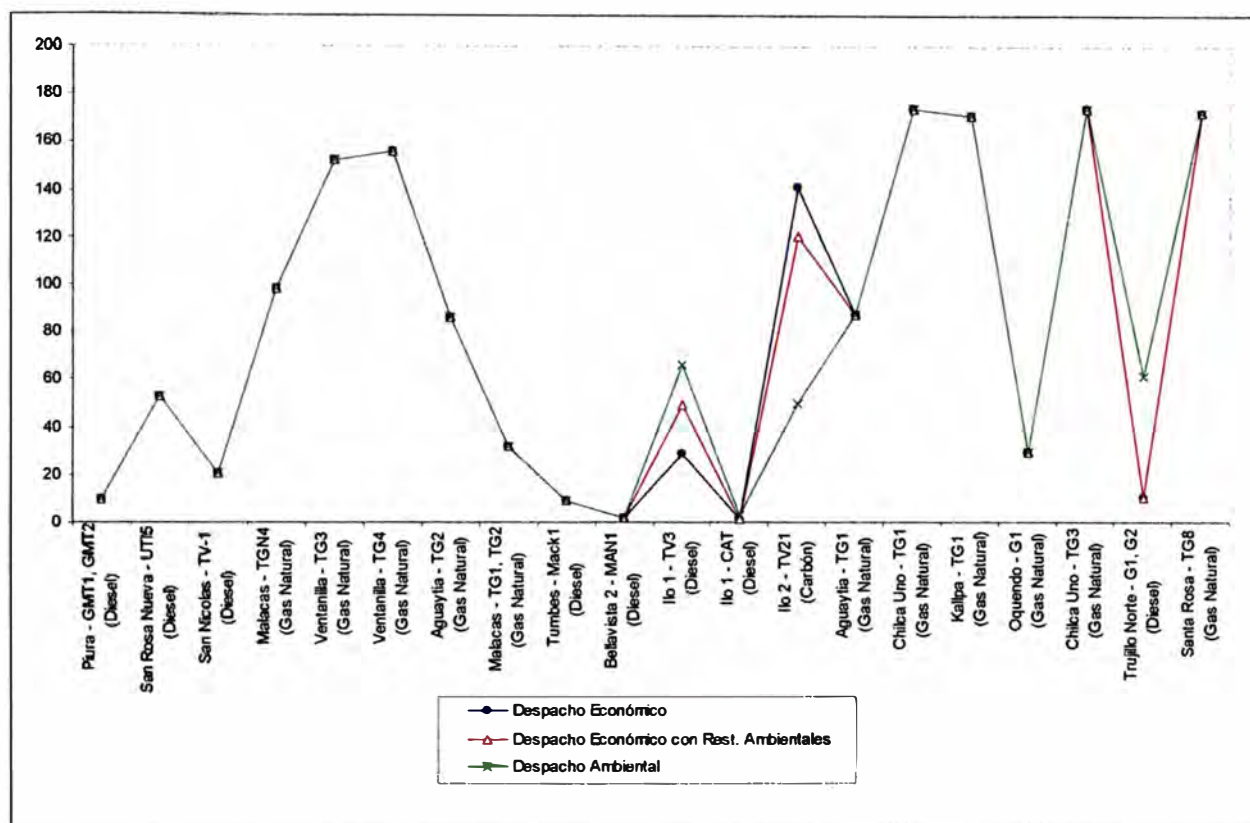


Fig. 4.2 Variación de generación de las centrales o grupos térmicos para operación normal.

- ◆ Los demás grupos tienen una generación que se mantienen en su valor máximo.

4.5.2 Operación en alerta

En la Fig. 4.3 se muestra la variación de la generación de las centrales o grupos térmicos para la operación en alerta. Sobre los resultados se puede comentar lo siguiente:

- ◆ El grupo Ilo 1 – TV3 (Diesel) genera 22 MW, 56.6 MW y 66 MW (límite máximo) para el despacho económico, despacho económico con restricciones ambientales y despacho ambiental, respectivamente. Este grupo es caro, pero contamina menos que el grupo Ilo 2 – TV21 (carbón), por lo que despacha más para condiciones ambientales.
- ◆ El grupo Ilo 2 – TV21 (carbón) genera 141 MW (límite máximo), 89.1 MW y 77.4 MW para el despacho económico, despacho económico con restricciones ambientales y despacho ambiental, respectivamente. Este grupo es el más contaminante, pero el

más barato, por lo que despacha menos para condiciones ambientales. En comparación a los resultados de la operación normal, este grupo no alcanza el valor mínimo para el despacho ambiental, esto debido a la restricción en los flujos que impone la congestión en el sistema.

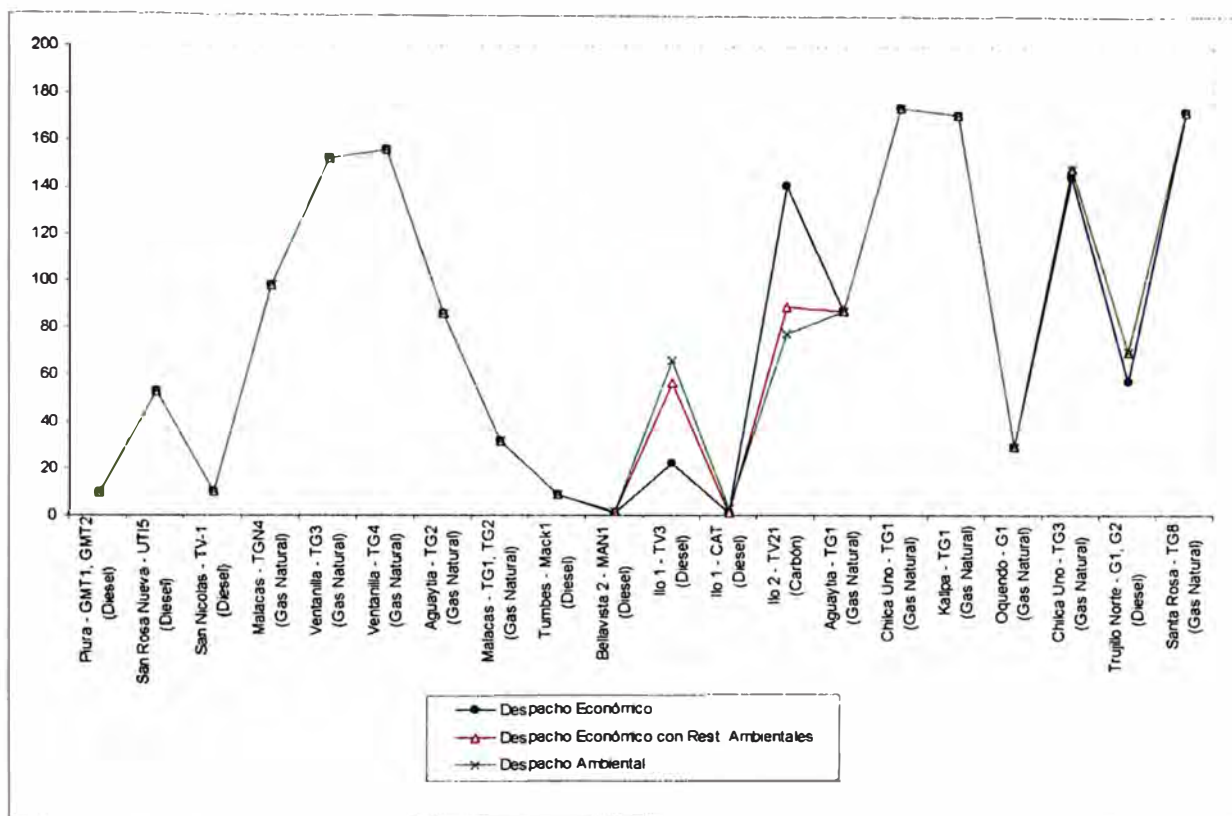


Fig. 4.3 Variación de generación de las centrales o grupos térmicos para operación en alerta.

- ◆ Los grupos Trujillo Norte – G1 y G2 (Diesel) generan 57.2 MW, 70.1 MW (límite máximo) y 70.1 MW (límite máximo) para el despacho económico, despacho económico con restricciones ambientales y despacho ambiental, respectivamente. Este grupo es caro, pero contamina menos que el grupo Ilo 2 – TV21 (carbón), por lo que despacha más para condiciones ambientales. En comparación a los resultados de la operación normal, este grupo alcanza el valor máximo para el despacho ambiental, esto debido a la restricción en los flujos que impone la congestión en el sistema.
- ◆ Los demás grupos tienen una generación que se mantiene en su valor máximo, con excepción del grupo San Nicolas – TV1.

CONCLUSIONES

Respecto al análisis de despacho económico con restricciones ambientales realizado en este informe se puede decir lo siguiente:

- ◆ Las herramientas de optimización actualmente disponibles permiten analizar distintos tipos de problemas de despacho de generación de forma simple y práctica. Si a esto adicionamos modelos lineales, se pueden analizar problemas mayores como el despacho económico de sistemas como el SEIN 2010 (512 barras, 560 ramas, 59 generadores y 571 variables a resolver).
- ◆ En el despacho económico se verifica que los grupos más baratos son los que despachan más. En el caso sin congestión existe un costo marginal único en el sistema impuesto por el grupo generador que margina (que entra por último al despacho). En condiciones de operación en alerta puede existir congestión, aun así los grupos más baratos son los que despachan más, pero existe un efecto adicional impuesto por la línea congestionada que da lugar a una distribución de los costos marginales en barra.
- ◆ En el despacho ambiental se verifica que los grupos menos contaminantes son los que despachan más. En el caso sin congestión existe una emisión marginal única en el sistema impuesto por el grupo generador que entra por último al despacho. En condiciones de operación en alerta puede existir congestión, aun así los grupos menos contaminantes son los que despachan más, pero existe un efecto adicional impuesto por la línea congestionada que da lugar a una distribución de las emisiones marginales en barra.
- ◆ En el despacho económico con restricciones ambientales se verifica que los grupos más baratos y menos contaminantes se combinan para despachar. En el caso sin congestión existe un costo marginal único en el sistema impuesto por el grupo generador que margina (que entra por último al despacho) y un efecto adicional por mantener la emisión total del sistema en un límite determinado. En congestión, existe un efecto adicional en los costos marginales en barra impuesto por la línea congestionada.

- ◆ Para la aplicación de las formulaciones de despacho económico y ambiental al sistema SEIN 2010 se usó el escenario de operación del día 18 de Enero de 2010, donde se despacharon 59 centrales de generación en servicio, 39 de ellas contienen grupos hidráulicos y 20 contienen grupos térmicos. Los datos de costos y emisiones fueron obtenidos de la referencia [15], los cuales fueron seleccionados de características típicas de generadores térmicos de los sistemas *New York Power Pool* (NYPP) y *New England Power Pool* (NEPOOL). Posteriormente fueron modificados estos datos para las centrales y grupos térmicos del SEIN 2010 de acuerdo al tipo de combustible que consumen.
- ◆ En el despacho económico y ambiental del SEIN 2010 se observó que el grupo Ilo 2 – TV21 (carbón) genera más en condiciones de despacho económico (grupo más barato del sistema), pero contamina más en comparación a los demás. En el despacho ambiental este grupo despacha su valor mínimo de generación y en el despacho económico con restricciones ambientales este grupo despacha de acuerdo a mantener el límite de emisión total del sistema. Algunos grupos Diesel y a Gas Natural son despachados a su máximo valor para condiciones ambientales para evitar despachar con el grupo Ilo 2 – TV21.
- ◆ La metodología de despacho económico con restricciones ambientales puede ser incorporada dentro de los procedimientos de planeamiento de la operación del COES, principalmente para evaluar la emisión de contaminantes en el sistema.

ANEXOS

ANEXO A

**DATOS DEL SISTEMA SEIN 2010 PARA ANÁLISIS DE DESPACHO
ECONOMICO Y AMBIENTAL**

Los datos del sistema SEIN 2010 para análisis de despacho económico y ambiental consisten en las características nominales y parámetros eléctricos principales de los componentes del sistema. Dentro del estudio se usaron el siguiente formato de datos:

- ◆ Datos de barras: contiene la información de demandas, generación máxima y mínima, costos y emisiones incrementales de generadores.
- ◆ Datos de ramas: contiene la información de número de circuitos, resistencia, reactancia, taps (solo para transformadores de potencia) y flujos máximos.

Datos de barras

Los datos de barras son presentados en la Tabla N° A.1.

Tabla N° A.1 Datos de barras del sistema

Número Barra	Código WinFlu	Gen. Máx. (MW)	Gen. Min. (MW)	Demanda (MW)	Costo (US \$/MWh)	Emisión (kg-CO2/MWh)
1	SEGUA220	0	0	0.0	0	0
2	CHICL10	0	0	29.4	0	0
3	CHICL60	0	0	0.0	0	0
4	CHICL-O6	0	0	17.5	0	0
5	SECHO220	0	0	0.0	0	0
6	CARHU220	0	0	0.0	0	0
7	CARHU10	100	100	2.5	0	0
8	CHICL10	0	0	22.9	0	0
9	SEPO220	0	0	0.0	0	0
10	SEPO60	0	0	18.3	0	0
11	PIURA60	0	0	0.0	0	0
12	PIURA10	9.8	3	27.6	30	700
13	PIURTG10	0	0	0.0	0	0
14	PIUR4.8	0	0	0.0	0	0
15	SULLA60	0	0	0.0	0	0
16	SULLA10	0	0	16.6	0	0
17	ARENAL60	0	0	3.9	0	0
18	PAITA60	0	0	0.0	0	0
19	CHIM220	0	0	0.0	0	0
20	PORV138	0	0	14.6	0	0
21	PANU220	0	0	0.0	0	0
22	CHIM138	0	0	47.9	0	0
23	HUALL138	0	0	9.1	0	0
24	C.PATO	250	250	0.4	0	0
25	CHIM2138	0	0	8.4	0	0
26	PANU138	0	0	0.0	0	0
27	PARAM138	0	0	0.0	0	0
28	CAHUA138	0	0	0.0	0	0
29	CAHUA10	35.97	35.97	0.2	0	0
30	ZAPA220	0	0	0.0	0	0

Tabla N° A.1 Datos de barras del sistema (continuación)

Número Barra	Código WinFlu	Gen. Máx. (MW)	Gen. Mín. (MW)	Demanda (MW)	Costo (US \$/MWh)	Emisión (kg-CO2/MWh)
31	PAN66	0	0	5.2	0	0
32	VENT220	0	0	0.0	0	0
33	CHA VA220	0	0	0.0	0	0
34	ROSA220	0	0	0.0	0	0
35	CHA VA60	0	0	140.7	0	0
36	BARSI220	0	0	0.0	0	0
37	REFZN220	0	0	98.0	0	0
38	MAT220	0	0	0.0	0	0
39	MAT12A	31.5	31.5	0.3	0	0
40	MAT12B	31.5	31.5	0.0	0	0
41	HUAMP60	0	0	0.0	0	0
42	HUAMP10	30.1	30.1	0.0	0	0
43	CALL65	38.5	38.5	0.3	0	0
44	CALLAH8	38.5	38.5	0.3	0	0
45	SROSA60	0	0	0.0	0	0
46	SROS13B	0	0	0.0	0	0
47	SROS13A	52.8	30	0.0	30.5	702
48	HUIN220	0	0	0.0	0	0
49	HUIN12	27.56	27.56	147.8	0	0
50	BAL60	0	0	338.6	0	0
51	MOYOP10	64.7	64.7	0.3	0	0
52	BAL220	0	0	0	0	0
53	SJNLS220	0	0	0	0	0
54	SJNETC60	0	0	0	0	0
55	IND220	0	0	0	0	0
56	IND60	0	0	40	0	0
57	IND10	0	0	0	0	0
58	ICA220	0	0	0	0	0
59	MARC220	0	0	0	0	0
60	MARC60	0	0	9.2	0	0
61	SNICO60	0	0	0	0	0
62	SNICO13	20.2	10	45.2	31	704
63	POMAC220	0	0	0	0	0
64	CARM220	0	0	0	0	0
65	RESTI220	0	0	0	0	0
66	RESTI13	210.06	210.06	0	0	0
67	HUAYU220	0	0	0	0	0
68	PACHA220	0	0	0	0	0
69	ONU220	0	0	0	0	0
70	ONU50	0	0	0	0	0
71	DERCURUM	0	0	0	0	0
72	VIRU138	0	0	5.5	0	0
73	SULLA 4	0	0	0	0	0
74	ICA 60	0	0	18.7	0	0
75	HVELI220	0	0	0	0	0
76	SEGUA60	0	0	3.9	0	0
77	BARSI60	0	0	206.5	0	0
78	CHIM13	0	0	0	0	0
79	SEM 10	0	0	0	0	0
80	SVC BAL	0	0	0	0	0
81	HVELIC60	0	0	3.5	0	0
82	BARSI	0	0	0	0	0
83	SETNOR22	0	0	0	0	0
84	MOYOP60	0	0	7.9	0	0
85	SALAM60	0	0	51.2	0	0
86	PUENT60	0	0	143.3	0	0
87	CALLA60	0	0	0	0	0
88	CALL220	0	0	0	0	0
89	CALLA220	0	0	0	0	0
90	HUACH60	0	0	57.9	0	0
91	NANA60	0	0	3.2	0	0
92	HVELI10	0	0	0	0	0
93	ICA10	0	0	16.9	0	0
94	CAO138	0	0	13.2	0	0
95	SIDNOR13	0	0	38	0	0
96	SIDSUR13	0	0	28	0	0
97	HUAYU60	0	0	18.4	0	0
98	TMAR138	0	0	2.1	0	0
99	HUANU	0	0	8.4	0	0
100	OROY2.3	3.66	3.66	0.3	0	0

Tabla N° A.1 Datos de barras del sistema (continuación)

Número Barra	Código WinFlu	Gen. Máx. (MW)	Gen. Min. (MW)	Demanda (MW)	Costo (US \$/MWh)	Emisión (kg-CO2/MWh)
101	OROY50	0	0	0	0	0
102	MALPA6.9	46.21	46.21	0	0	0
103	MALPA50	0	0	0	0	0
104	CARHUA50	0	0	0.8	0	0
105	JUNIN	0	0	0.2	0	0
106	BVISTA	0	0	0	0	0
107	EXCEL50	0	0	0	0	0
108	SHELBY	0	0	2.5	0	0
109	PARAG50	0	0	4.7	0	0
110	PARAG12	0	0	15.5	0	0
111	PARAG138	0	0	0	0	0
112	CARHUA13	0	0	0	0	0
113	YAU13A	30	30	0.1	0	0
114	YAU138	0	0	0	0	0
115	CARIPA	0	0	24.5	0	0
116	ONU138	0	0	0	0	0
117	MAN13B	647	647	0.6	0	0
118	PACHA23	3.66	3.66	0.2	0	0
119	PACHA50	0	0	0	0	0
120	CURIP50	0	0	0	0	0
121	YAU13B	40	40	0.5	0	0
122	PARAGII	0	0	25	0	0
123	MAYUP	0	0	0.3	0	0
124	FUNDIC	0	0	16.2	0	0
125	TALA10	98.1	6	0	20	400
126	TALA 220	0	0	0	0	0
127	P EXIS	0	0	34.6	0	0
128	WESTING	0	0	0	0	0
129	SROSV60	0	0	53.2	0	0
130	VENT C	152.2	70	0.5	20.5	402
131	SETNOR1	0	0	5.2	0	0
132	SETNOR	0	0	0	0	0
133	TRU NO	0	0	21.3	0	0
134	TR SUR13	0	0	0	0	0
135	TG4 TS	0	0	23.9	0	0
136	TRU SUR	0	0	25	0	0
137	SVC CH	0	0	0	0	0
138	PANU66	0	0	2.8	0	0
139	SEGUA10	0	0	4.3	0	0
140	PACA 60	0	0	0	0	0
141	PACA 6	0	0	30.1	0	0
142	GALL 60	0	0	18.8	0	0
143	GALL 10	30	30	0	0	0
144	HUALLA	0	0	0	0	0
145	VENT D	156.2	70	0.5	21	404
146	AG13 TG2	85.9	40	0	21.5	406
147	TMAR220	0	0	0	0	0
148	AGUA220	0	0	0	0	0
149	MALACAS	32	10	14.7	22	408
150	HUALL 13	0	0	0	0	0
151	SJUAN10	0	0	0	0	0
152	SJNLS2	0	0	190.6	0	0
153	COBRI 69	0	0	4	0	0
154	COBRI 10	0	0	0	0	0
155	PAITA416	0	0	0	0	0
156	PAITA10	0	0	5.1	0	0
157	CURM60	0	0	0	0	0
158	CURM10	4.5	4.5	0	0	0
159	HUARON	0	0	7.3	0	0
160	SJUA50	0	0	0	0	0
161	SJUA2.4	0	0	0.4	0	0
162	SJUA11	0	0	1.3	0	0
163	LAFUND	0	0	6	0	0
164	EXC2.4	0	0	1.3	0	0
165	CPIED12	0	0	3.4	0	0
166	EXPD2.4	0	0	0.8	0	0
167	D.MIL.PO	0	0	7	0	0
168	HUICRA50	0	0	0	0	0
169	HUICRA2.	0	0	0.4	0	0
170	GOYLLAR	0	0	0.1	0	0

Tabla N° A.1 Datos de barras del sistema (continuación)

Número Barra	Código WinFlu	Gen. Máx. (MW)	Gen. Min. (MW)	Demanda (MW)	Costo (US \$/MWh)	Emisión (kg-CO2/MWh)
171	MORO50	0	0	2.9	0	0
172	DUVAZ50	0	0	1.5	0	0
173	YAUL150	0	0	1.1	0	0
174	MOR2.4	0	0	1	0	0
175	CASAP50	0	0	2.7	0	0
176	TICLIO50	0	0	0.4	0	0
177	CNOR50	0	0	0	0	0
178	CNOR4.16	0	0	0.2	0	0
179	CAS4.16	0	0	0.3	0	0
180	CAS2.4	0	0	3	0	0
181	ANTUQ50	0	0	7.5	0	0
182	ANTUQ2.4	0	0	0.1	0	0
183	BELLAV50	0	0	0	0	0
184	SMAT50	0	0	0.3	0	0
185	BELLAV2.	0	0	0	0	0
186	SMAT2.4	0	0	0.2	0	0
187	ONU69	0	0	0	0	0
188	PACHYO69	0	0	0.2	0	0
189	CHUMP69	0	0	0	0	0
190	CHUMP12	0	0	2.4	0	0
191	CHUMP2.4	0	0	2	0	0
192	MORO-T50	0	0	0	0	0
193	ALAMB	0	0	9.6	0	0
194	SISAB138	0	0	0	0	0
195	ZORRI220	0	0	0	0	0
196	ZORRI10	9.2	5	31.6	31.5	706
197	CARAZ66	0	0	3.2	0	0
198	CARHZ66	0	0	3.5	0	0
199	HUARZ66	0	0	6.9	0	0
200	TICA66	0	0	2.3	0	0
201	PARIA 66	0	0	0	0	0
202	PARIA 13	3.59	3.59	0.1	0	0
203	VIZCARRA	0	0	0	0	0
204	ANTA220	0	0	89	0	0
205	YANA220	0	0	0	0	0
206	YANA10	15.63	15.63	0	0	0
207	HCHO220	0	0	0	0	0
208	AUCA138	0	0	0.2	0	0
209	TOCA138	0	0	1.1	0	0
210	CHIMA220	0	0	0	0	0
211	CHIMA13	150	150	0	0	0
212	JULIA138	0	0	0	0	0
213	JULIA60	0	0	0	0	0
214	JULIA10	0	0	9.8	0	0
215	PUNO60	0	0	1.1	0	0
216	PUNO10	1.9	1.05	4.2	32	708
217	JULIAN10	0	0	0	0	0
218	SKD2.16	0	0	0	0	0
219	ALCO2.4	0	0	0	0	0
220	TAPAR2.3	0	0	0	0	0
221	BELLID	0	0	0	0	0
222	DOLOR138	0	0	0	0	0
223	DOLOR11	0	0	14.8	0	0
224	DOL04.16	0	0	0	0	0
225	QUEN138	0	0	0	0	0
226	OUEN33	0	0	0.9	0	0
227	COMBA138	0	0	0	0	0
228	COMB66	0	0	0	0	0
229	TINTA138	0	0	16.7	0	0
230	AYAVI138	0	0	0	0	0
231	AYAV23	0	0	0.5	0	0
232	AZANG138	0	0	0	0	0
233	AZANG60	0	0	0	0	0
234	AZANG23	0	0	1.1	0	0
235	AYAV10	0	0	0.2	0	0
236	COMBA24	0	0	0.4	0	0
237	OUEN10	0	0	2.2	0	0
238	TINT10	0	0	0	0	0
239	CHAIV33	0	0	0	0	0
240	CHA33	0	0	14.99	0	0

Tabla N° A.1 Datos de barras del sistema (continuación)

Número Barra	Código WinFlu	Gen. Máx. (MW)	Gen. Mín. (MW)	Demanda (MW)	Costo (US \$/MWh)	Emisión (kg-CO2/MWh)
241	CHIB33	0	0	17.3	0	0
242	JESUS33	0	0	7.2	0	0
243	CHALL33	0	0	0	0	0
244	SOCA138	0	0	0	0	0
245	SOCA33	0	0	2.5	0	0
246	SANT138	0	0	0	0	0
247	CHAVG3	59.25	59.25	0	0	0
248	CVER138	0	0	47	0	0
249	TOQUE11	0	0	9.7	0	0
250	TOQUE13	0	0	29	0	0
251	TOQS138	0	0	0	0	0
252	BOT1138	0	0	0	0	0
253	BOT69	0	0	8.7	0	0
254	HBOT69	0	0	0	0	0
255	HRUM169	0	0	0	0	0
256	HBOTIF	2.3	2.3	0	0	0
257	HRUMI	2.3	2.3	0	0	0
258	SPCC138	0	0	38.8	0	0
259	ILO138E	0	0	0.3	0	0
260	RILO138	0	0	0	0	0
261	RILO10	0	0	13.5	0	0
262	ARIC138	0	0	0	0	0
263	ARIC2	3.16	3.16	0.1	0	0
264	ARIC266	0	0	0	0	0
265	ARIC166	0	0	0	0	0
266	ARIC1	6.32	6.32	0.5	0	0
267	TOMA66	0	0	0.2	0	0
268	TACNA66	0	0	0	0	0
269	TACPI66	0	0	5.9	0	0
270	CALAN66	0	0	0	0	0
271	CALANA12	0	0	0	0	0
272	BOT113	0	0	0	0	0
273	MOLL138	0	0	3.8	0	0
274	GDMOLL	0	0	0	0	0
275	SARI66	0	0	0	0	0
276	SARI33	0	0	0.3	0	0
277	SUCH69	0	0	3.3	0	0
278	TVICHI	0	0	0	0	0
279	BCONC6	0	0	27.09	0	0
280	CHARIV	11.77	11.77	0	0	0
281	CHA123	6.04	6.04	0	0	0
282	CHAVI33	0	0	0	0	0
283	CHAVI	8.94	8.94	0	0	0
284	TV2CHIL	0	0	0	0	0
285	TV3CHIL	0	0	0	0	0
286	GD1CHIL	0	0	0	0	0
287	GD2CHIL	0	0	0	0	0
288	CCCHIL	0	0	0	0	0
289	TOQEP138	0	0	0	0	0
290	ILOTV1	0	0	1.9	0	0
291	ILOTV2	0	0	0	0	0
292	ILOTV3	66	22	2.5	32.5	710
293	ILOTV4	0	0	2.5	0	0
294	TAC10	0	0	11.7	0	0
295	CATKAT	3.3	1	2.7	33	712
296	CAELP138	0	0	0	0	0
297	SOCA220	0	0	0	0	0
298	SGAB138	0	0	0	0	0
299	SGAB10	110	110	0.1	0	0
300	TGMOL1	0	0	0	0	0
301	MON138	0	0	0	0	0
302	TVCAR220	0	0	0	0	0
303	TVCARB	141	50	10	10	960
304	MONT220	0	0	0	0	0
305	SER21	0	0	0	0	0
306	TINTA10	0	0	0.3	0	0
307	LOSHER22	0	0	0	0	0
308	PUN220	0	0	0	0	0
309	CH4CHI	0	0	0	0	0
310	ILOTG1	0	0	0.5	0	0

Tabla N° A.1 Datos de barras del sistema (continuación)

Número Barra	Código WinFlu	Gen. Máx. (MW)	Gen. Mín. (MW)	Demanda (MW)	Costo (US \$/MWh)	Emisión (kg-CO2/MWh)
311	ILOTG2	0	0	0.5	0	0
312	QHON138	0	0	0	0	0
313	QHON13	0	0	7.3	0	0
314	ILO13.8	0	0	2.9	0	0
315	PBT138	0	0	0	0	0
316	PBT69	0	0	2.3	0	0
317	SICU66	0	0	0	0	0
318	MACH138	0	0	0	0	0
319	SICUA10	0	0	0.8	0	0
320	CALLA138	0	0	8	0	0
321	MOQU13.8	0	0	0.9	0	0
322	BOT6.9	0	0	21.3	0	0
323	MOQ13.8	0	0	1.2	0	0
324	TGMOL2	0	0	0	0	0
325	POIB33	0	0	26	0	0
326	SRAF60	0	0	0	0	0
327	SRAF10	0	0	11.2	0	0
328	CHIL138	0	0	0	0	0
329	TINT416	0	0	14.7	0	0
330	PUNO138	0	0	0	0	0
331	YARA66	0	0	3.8	0	0
332	CHAL10	0	0	4.8	0	0
333	FUN4.6	0	0	5.1	0	0
334	COTARUSE	0	0	0	0	0
335	SER11	0	0	0	0	0
336	PLACID4	0	0	3.8	0	0
337	SER12	0	0	0	0	0
338	SER22	0	0	0	0	0
339	OUEEN33PM	0	0	2	0	0
340	MEPSA	0	0	16	0	0
341	MACH10.5	0	0	0.4	0	0
342	MACH60	0	0	1.2	0	0
343	MACH13.8	88.5	88.5	0	0	0
344	SRAF138	0	0	0	0	0
345	CARMI38	0	0	0	0	0
346	CARMI33	0	0	0.7	0	0
347	HUANCA33	0	0	1.1	0	0
348	TABLA33	0	0	1.3	0	0
349	INCA138	0	0	0	0	0
350	CACH33	0	0	0.8	0	0
351	CACH10	0	0	0.4	0	0
352	ABAN138	0	0	2.9	0	0
353	YURA6.9	0	0	23.9	0	0
354	REPART1	0	0	4.5	0	0
355	CAJ220	0	0	83.3	0	0
356	HCHO66	0	0	12.1	0	0
357	HCHO10	0	0	0	0	0
358	LOSHER66	0	0	0	0	0
359	ANDA50	0	0	0	0	0
360	ANDA4.16	0	0	4.3	0	0
361	ANDELC50	0	0	0.1	0	0
362	S.CRIS50	0	0	0	0	0
363	S.CR4.16	0	0	1.7	0	0
364	S.CR2.4	0	0	1.2	0	0
365	S.ANT50	0	0	0	0	0
366	S.ANT4.1	0	0	0.8	0	0
367	C.MINA50	0	0	0.4	0	0
368	C.CONC50	0	0	2.3	0	0
369	M.TUNE50	0	0	0	0	0
370	MTUNE2.4	0	0	2.1	0	0
371	HUANCH50	0	0	0	0	0
372	HUANCH10	17.85	17.85	2.7	0	0
373	AGUA138	0	0	0	0	0
374	PUCAL138	0	0	0	0	0
375	PUCAL60	0	0	26.4	0	0
376	CM220	0	0	0	0	0
377	P220	0	0	0	0	0
378	PUNO23	0	0	0	0	0
379	CALLA66	0	0	0	0	0
380	COL24	0	0	0.2	0	0

Tabla N° A.1 Datos de barras del sistema (continuación)

Número Barra	Código WinFlu	Gen. Máx. (MW)	Gen. Min. (MW)	Demanda (MW)	Costo (US \$/MWh)	Emisión (kg-CO2/MWh)
381	CAY66	3.65	3.65	9.6	0	0
382	PUCAL10	0	0	0	0	0
383	CALLA 60	0	0	0	0	0
384	ROSSO	0	0	0	0	0
385	ROSS2.4	0	0	2.7	0	0
386	CACHI60	0	0	1.1	0	0
387	CACHI23	0	0	0.1	0	0
388	AG13 TG1	87.6	40	0	21.5	406
389	CALANA4	0	0	0	0	0
390	MONT10B	0	0	0	0	0
391	MONT10A	0	0	0	0	0
392	CANTE220	0	0	0	0	0
393	CANTER60	0	0	13.4	0	0
394	CANTER10	0	0	0	0	0
395	SISAB220	0	0	0	0	0
396	SISABE22	0	0	0	0	0
397	YUNC13.8	80	80	0	0	0
398	ZARUMILL	0	0	69.7	0	0
399	ACHIC138	0	0	9	0	0
400	TCOL060	0	0	0	0	0
401	TCOL10.5	0	0	13.4	0	0
402	POECHO60	0	0	0	0	0
403	POECHOS1	13.3	13.3	0	0	0
404	TEXTIL60	0	0	9	0	0
405	ANDAHU66	0	0	0	0	0
406	ANDAHU22	0	0	0.2	0	0
407	ANDAHU10	0	0	0	0	0
408	ANTAGASH	0	0	0.3	0	0
409	LIXIV138	0	0	0	0	0
410	LIXIV13.	0	0	23.2	0	0
411	VENTTV	0	0	0	0	0
412	CVER220	0	0	0	0	0
413	CHILUNO2	0	0	0	0	0
414	CHIL TG1	174	45	0	22.5	410
415	MINA60	0	0	0	0	0
416	MINA34.5	0	0	6.5	0	0
417	TACAM60	0	0	30.6	0	0
418	TACAM10	0	0	0	0	0
419	SIHUAS13	0	0	7.8	0	0
420	SROSA60E	0	0	0	0	0
421	SROSV60E	0	0	0	0	0
422	SROS10	0	0	86.5	0	0
423	CANTOGR6	0	0	0	0	0
424	JICAMAR6	0	0	0	0	0
425	JICAM10	0	0	6.8	0	0
426	CANT10	0	0	35.3	0	0
427	TACNA60	0	0	0	0	0
428	TACNA10	0	0	53.6	0	0
429	NANA10	0	0	16	0	0
430	SCLARA60	0	0	0	0	0
431	STCLARA1	0	0	19.3	0	0
432	STANITA6	0	0	0	0	0
433	STANITA1	0	0	31.2	0	0
434	SULFUROS	0	0	0	0	0
435	SULF3 22	0	0	113.67	0	0
436	SULF3 10	0	0	0	0	0
437	VALEGR	0	0	0	0	0
438	S.ANT10	0	0	0.7	0	0
439	COBRIZAI	0	0	10.1	0	0
440	COBRI10	0	0	10.3	0	0
441	CHIL TG2	0	0	0	0	0
442	CHILC220	0	0	40.1	0	0
443	DESIE220	0	0	6.8	0	0
444	KALL TG1	171	40	0	23	412
445	AZULCOC11	0	0	0.1	0	0
446	CHILLON2	0	0	0	0	0
447	CHILLON6	0	0	0	0	0
448	PAMPIL60	0	0	7.9	0	0
449	VENTAN60	0	0	11.4	0	0
450	ZAPALL60	0	0	20	0	0

Tabla N° A.1 Datos de barras del sistema (continuación)

Número Barra	Código WinFlu	Gen. Máx. (MW)	Gen. Min. (MW)	Demanda (MW)	Costo (US \$/MWh)	Emisión (kg-CO2/MWh)
451	PPIEDR60	0	0	25.9	0	0
452	CAUDIV60	0	0	18.8	0	0
453	OQUEND60	0	0	22.4	0	0
454	TVALLE60	0	0	43.4	0	0
455	NARANJ60	0	0	39.4	0	0
456	INFANT60	0	0	30.6	0	0
457	MAZUCO13	0	0	0	0	0
458	PMALDO13	0	0	0	0	0
459	MAZUCO23	0	0	1.3	0	0
460	PMALDO23	0	0	0.7	0	0
461	PMALDO10	0	0	2.4	0	0
462	STACRUZ6	0	0	0	0	0
463	STCRUZ2.	2.92	2.92	0	0	0
464	OQUEND13	29.6	10	0	23.5	414
465	CHIL TG3	174	45	0	24	416
466	KALL TG2	0	0	0	0	0
467	TNOR13.8	70.12	10	0	33.5	714
468	LJOYA10	5.61	5.61	0	0	0
469	PLATA220	0	0	0	0	0
470	PLAT13.8	110	110	0	0	0
471	SROTG8	172	45	0	24.5	418
472	AAREQ220	0	0	100	0	0
473	NEUTRO0	0	0	0	0	0
474	NEUTRO1	0	0	0	0	0
475	NEUTRO2	0	0	0	0	0
476	NEUTRO3	0	0	0	0	0
477	NEUTRO4	0	0	0	0	0
478	NEUTRO5	0	0	0	0	0
479	NEUTRO6	0	0	0	0	0
480	NEUTRO7	0	0	0	0	0
481	NEUTRO8	0	0	0	0	0
482	NEUTRO9	0	0	0	0	0
483	NEUTRO10	0	0	0	0	0
484	NEUTRO11	0	0	0	0	0
485	NEUTRO12	0	0	0	0	0
486	NEUTRO13	0	0	0	0	0
487	NEUTRO14	0	0	0	0	0
488	NEUTRO15	0	0	0	0	0
489	NEUTRO16	0	0	0	0	0
490	NEUTRO17	0	0	0	0	0
491	NEUTRO18	0	0	0	0	0
492	NEUTRO19	0	0	0	0	0
493	NEUTRO20	0	0	0	0	0
494	NEUTRO21	0	0	0	0	0
495	NEUTRO22	0	0	0	0	0
496	NEUTRO23	0	0	0	0	0
497	NEUTRO24	0	0	0	0	0
498	NEUTRO25	0	0	0	0	0
499	NEUTRO26	0	0	0	0	0
500	NEUTRO27	0	0	0	0	0
501	NEUTRO28	0	0	0	0	0
502	NEUTRO29	0	0	0	0	0
503	NEUTRO30	0	0	0	0	0
504	NEUTRO31	0	0	0	0	0
505	NEUTRO32	0	0	0	0	0
506	NEUTRO33	0	0	0	0	0
507	NEUTRO34	0	0	0	0	0
508	NEUTRO35	0	0	0	0	0
509	NEUTRO36	0	0	0	0	0
510	NEUTRO37	0	0	0	0	0
511	NEUTRO38	0	0	0	0	0
512	NEUTRO39	0	0	0	0	0

Datos de ramas

Los datos de ramas son presentados en la Tabla N° A.2.

Tabla N° A.2 Datos de ramas del sistema

Núm. Barra	Código Barra		Número de cktos	Resistencia c/ckto (p.u.)	Reactancia c/ckto (p.u.)	Tap c/ckto (p.u.)	Flujo máximo c/ckto (MW)	
	Inicial	Final						
1	5	SEGUA220	SECHO220	1	0.01380	0.09184	152.4	
1	83	SEGUA220	SETNOR22	1	0.01672	0.11329	152.4	
1	484	SEGUA220	NEUTRO11	1	0.00017	0.23417	60.0	
2	3	CHICL10	CHICL60	1	0.01200	0.21250	40.0	
3	4	CHICL60	CHICL-O6	2	0.05417	0.09028	23.9	
4	5	CHICL-O6	SECHO220	1	0.00409	0.09750	100.0	
4	8	CHICL-O6	CHICL10	1	0.01086	0.26486	35.0	
5	6	SECHO220	CARHU220	1	0.01538	0.08387	114.3	
5	9	SECHO220	SEPO220	1	0.03538	0.21076	152.4	
6	7	CARHU220	CARHU10	1	0.00545	0.09255	1.0762	110.0
9	10	SEPO220	SEPO60	1	0.00409	0.10000	0.9600	100.0
9	126	SEPO220	TALA 220	1	0.01735	0.11352		133.3
10	11	SEPO60	PIURA60	1	0.04667	0.08555		34.3
10	18	SEPO60	PAITA60	1	0.30904	0.56692		37.4
10	71	SEPO60	DERCURUM	1	0.06928	0.18914		31.0
10	404	SEPO60	TEXTIL60	1	0.04861	0.08778		31.0
11	12	PIURA60	PIURA10	1	0.02450	0.13833	1.0400	60.0
12	13	PIURA10	PIURTG10	2	0.04800	0.08800		25.0
13	14	PIURTG10	PIUR4.8	1	0.09800	0.35333	1.0100	15.0
15	16	SULLA60	SULLA10	1	0.01849	0.22971	1.0000	35.0
15	17	SULLA60	ARENAL60	1	0.29973	0.54982		37.4
15	71	SULLA60	DERCURUM	1	0.06139	0.16761		31.0
15	402	SULLA60	POECHO60	1	0.16927	0.41759		45.0
16	73	SULLA10	SULLA 4	1	0.14700	0.53000	0.9738	10.0
17	18	ARENAL60	PAITA60	1	0.16662	0.30553		37.4
18	400	PAITA60	TCOLO60	1	0.06339	0.07548		37.4
18	488	PAITA60	NEUTRO15	1	-0.23100	0.68850	1.0000	10
19	21	CHIM220	PANU220	2	0.03521	0.22535		200
19	83	CHIM220	SETNOR22	2	0.01603	0.13232		152.4
19	473	CHIM220	NEUTRO0	1	0.00004	0.04677	1.0046	240
20	131	PORV138	SETNOR1	1	0.00669	0.01116		90
20	134	PORV138	TR SUR13	1	0.01339	0.02232		80
21	30	PANU220	ZAPA220	1	0.02920	0.16364		180
21	31	PANU220	PAN66	1	0.01233	0.38667	0.9700	30
21	203	PANU220	VIZCARRA	1	0.01934	0.14891		190.5
21	207	PANU220	HCHO220	1	0.00913	0.06019		228.6
21	483	PANU220	NEUTRO10	1	-0.00046	0.23159	0.9700	65
22	23	CHIM138	HUALL138	3	0.05720	0.21229		110
22	25	CHIM138	CHIM2138	1	0.00638	0.02363		104
22	473	CHIM138	NEUTRO0	1	0.00075	-0.00085	1.0000	240
23	24	HUALL138	C PATO	1	0.00080	0.02700	1.0500	300
23	419	HUALL138	SIHUAS13	1	0.04320	0.13798		80
23	485	HUALL138	NEUTRO12	1	0.00140	0.30600	1.0000	25
25	95	CHIM2138	SIDNOR13	1	0.05173	0.18667	1.0000	45
25	96	CHIM2138	SIDSUR13	1	0.05173	0.18667	1.0000	45
26	27	PANU138	PARAM138	1	0.01238	0.02773		84.6
26	483	PANU138	NEUTRO10	1	0.00385	0.00221	0.9565	50
27	28	PARAM138	CAHUA138	2	0.11552	0.16762		47.8
27	127	PARAM138	P EXIS	1	0.01437	0.17963	1.0000	54
28	29	CAHUA138	CAHUA10	1	0.00761	0.14312	1.0200	55.2
30	32	ZAPA220	VENT220	2	0.00219	0.01981		228.6
30	67	ZAPA220	HUAYU220	1	0.02751	0.26621		152.4
30	207	ZAPA220	HCHO220	1	0.01838	0.12230		228.6
32	33	VENT220	CHAVA220	3	0.00169	0.01060		189
32	130	VENT220	VENT C	1	0.00153	0.05581	0.9773	215
32	145	VENT220	VENT D	1	0.00153	0.05581	0.9773	215
32	411	VENT220	VENTTV	1	0.00133	0.05492	1.0000	260
32	446	VENT220	CHILLON2	2	0.00019	0.00130		250
33	34	CHAVA220	ROSA220	2	0.00108	0.00859		228.6
33	35	CHAVA220	CHAVA60	1	0.00031	0.02762	0.9164	420
33	36	CHAVA220	BARS1220	2	0.00150	0.01001		228.6
33	37	CHAVA220	REFZN220	1	0.00331	0.02050		370.4
33	89	CHAVA220	CALLA220	1	0.00857	0.05302		370.4
34	45	ROSA220	SROSA60	2	0.00933	0.09792	0.8894	120
34	48	ROSA220	HUIN220	2	0.00958	0.06663		342.9
34	53	ROSA220	SJNLS220	2	0.00339	0.02674		228.6
34	128	ROSA220	WESTING	1	0.00081	0.0725	0.9773	160
34	420	ROSA220	SROSA60E	2	0.01318	0.13824	0.8992	85
34	471	ROSA220	SROT68	1	0.00018	0.06091	1	230
34	480	ROSA220	NEUTRO7	1	-0.00007	0.00833	0.9591	144
35	137	CHAVA60	SVC CH	1	0.03982	0.40275	1.1045	40
35	451	CHAVA60	PPIEDR60	1	0.04705	0.18084		58
35	452	CHAVA60	CAUDIV60	1	0.04495	0.17306		58
35	453	CHAVA60	OOUTEND60	1	0.03038	0.09912		58
35	454	CHAVA60	TVALLE60	2	0.01589	0.0574		58
35	455	CHAVA60	NARANJ60	1	0.01373	0.04867		60
35	456	CHAVA60	INFANT60	1	0.02379	0.0843		58
36	475	BARS1220	NEUTRO2	1	0.00108	0.06059	0.9546	255
37	89	REFZN220	CALLA220	1	0.00563	0.03483		370.4
38	89	MAT220	CALLA220	1	0.00349	0.0233		228.6

Tabla N° A.2 Datos de ramas del sistema (continuación)

Núm	Barra	Código Barra		Número de cktos	Resistencia c/ckto (p.u.)	Reactancia c/ckto (p.u.)	Tap c/ckto (p.u.)	Flujo máximo c/ckto (MW)
		Inicial	Final					
38	476	MAT220	NEUTRO3	1	0.00075	0.00031	1.0727	160
39	476	MAT12A	NEUTRO3	1	0.00075	0.15031	1	80
40	476	MAT12B	NEUTRO3	1	-0.00075	0.14969	1	80
41	42	HUAMP60	HUAMP10	1	0.01237	0.225	1.0167	32
41	87	HUAMP60	CALLA60	1	0.19602	0.34076		60
41	91	HUAMP60	NANA60	1	0.06593	0.11459		60
43	383	CALL65	CALLA 60	1	0.01124	0.18095	0.9804	52.5
44	87	CALLAH8	CALLA60	1	0.01224	0.23356	0.9375	44.1
45	86	SROSA60	PUENT60	2	0.02275	0.08428		62.4
45	129	SROSA60	SROSV60	2	0.00042	0.00286		228.6
46	480	SROS13B	NEUTRO7	1	0.00028	0.07222	1	72
47	480	SROS13A	NEUTRO7	1	0.00028	0.07222	1	72
48	49	HUIN220	HUIN12	1	0.00088	0.03529	1.0347	340
50	52	BAL60	BAL220	3	0.00077	0.08638	1.1135	130
50	80	BAI60	SVC BAL	1	0.0265	0.23733	1.1387	60
50	84	BAL60	MOYOP60	1	0.14144	0.60768		46.8
50	85	BAI60	SALAM60	1	0.01361	0.05652		50.8
50	86	BAL60	PUENT60	2	0.02275	0.08428		62.4
51	84	MOYOP10	MOYOP60	1	0.0055	0.10121	0.8634	90.9
52	53	BAL220	SJNLS220	2	0.0015	0.0104		228.6
53	63	SJNLS220	POMAC220	2	0.01419	0.12848		180
53	152	SJNLS220	SJNLS2	1	0.00046	0.04196	0.9528	280
53	442	SJNLS220	CHIIC220	2	0.00621	0.03614		360
53	486	SJNLS220	NEUTRO13	1	0.01755	0.17467	1.0118	60
54	486	SJNETC60	NEUTRO13	1	-0.00112	-0.01033	1.0383	60
55	58	IND220	ICA220	1	0.00945	0.05535		141
55	64	IND220	CARM1220	1	0.02867	0.27717		180
55	75	IND220	HVELI220	1	0.0213	0.2041		152.4
55	392	IND220	CANTE220	1	0.01406	0.08237		180
55	443	IND220	DESIE220	1	0.01061	0.05727		180
55	472	IND220	AAREQ220	1	0.00422	0.0249		220
55	482	IND220	NEUTRO9	1	0.0018	0.09705	1.0023	100
56	482	IND60	NEUTRO9	1	0.0022	-0.00375	1.0383	100
57	482	IND10	NEUTRO9	1	0.0001	0.09725	1.03	60
58	59	ICA220	MARC220	1	0.02622	0.1544		141
58	478	ICA220	NEUTRO5	1	0.00358	0.1913	1.0023	50
58	508	ICA220	NEUTRO35	1	0.00358	0.1913	1.0023	50
59	474	MARC220	NEUTRO1	1	0.0012	0.0659	0.9091	150
60	61	MARC60	SNICO60	2	0.03207	0.17538		41.6
60	415	MARC60	MINA60	1	0.00833	0.04556		41.6
60	474	MARC60	NEUTRO1	1	0.00147	-0.00297	1.0383	150
61	62	SNICO60	SNICO13	1	0.00511	0.11401	0.9718	90
63	64	POMAC220	CARM1220	2	0.02254	0.21619		180
63	68	POMAC220	PACHA220	1	0.00162	0.01534		180
64	65	CARM1220	RESTI220	3	0.00026	0.00248		152.4
64	67	CARM1220	HUAYU220	1	0.00916	0.0829		180
64	68	CARM1220	PACHA220	2	0.02283	0.21915		180
64	75	CARM1220	HVELI220	1	0.00807	0.0766		180
64	117	CARM1220	MANI3B	1	0.00044	0.014	1.0955	720
64	335	CARM1220	SER11	1	0.02635	0.22487		304
64	337	CARM1220	SER12	1	0.02635	0.22487		304
64	487	CARM1220	NEUTRO14	1	0	0.2594	1.0455	50
65	66	RESTI220	RESTI13	1	0.00121	0.05051	1.0909	247.5
67	97	HUAYU220	HUAYU60	1	0.00683	0.205	0.985	60
68	69	PACHA220	ONU220	1	0.00235	0.02274		258.1
68	88	PACHA220	CALL220	2	0.009	0.07809		180
68	205	PACHA220	YANA220	1	0.01064	0.09319		380
69	70	ONU220	ONU50	1	0.0038	0.1225	1	100
69	376	ONU220	CM220	1	0.00918	0.07896		168.6
70	116	ONU50	ONU138	2	0.00667	0.26667	1.2096	30
70	119	ONU50	PACHA50	1	0.19903	0.36094		30.3
70	120	ONU50	CURIP50	1	0.08723	0.18908		38.1
70	123	ONU50	MAYUP	1	0.02258	0.06285		39
70	124	ONU50	FUNDIC	2	0.01416	0.04565		44.2
70	187	ONU50	ONU69	1	0.012	0.2688	0.9708	12.5
70	193	ONU50	ALAMB	1	0.00927	0.01725		30.3
71	157	DERCURUM	CURM60	1	0.03121	0.0506		31
72	134	VIRU138	TR SUR13	1	0.03701	0.06539		29.9
74	478	ICA 60	NEUTRO5	1	0.0044	-0.0057	1.0383	50
75	477	HVELI220	NEUTRO4	1	0.00483	0.2916	1.0227	30
76	140	SEGU60	PACA 60	1	0.03541	0.1936		41.6
76	142	SEGU60	GALL 60	2	0.08576	0.44134		40
76	484	SEGU60	NEUTRO11	1	0.003	-0.00883	1.0667	60
77	475	BARS160	NEUTRO2	1	0.00037	-0.0151	1.0417	255
78	473	CHIM13	NEUTRO0	1	0.00025	0.10127	1	72
79	474	SEM 10	NEUTRO1	1	0.00007	0.06543	1.03	60
81	477	HVELIC60	NEUTRO4	1	0.00906	0.1334	1.0383	30
82	475	BARS1	NEUTRO2	1	0.00461	0.13196	1	85
83	355	SETNOR22	CAJ220	1	0.0112	0.10151		150
83	481	SFTNOR22	NEUTRO8	1	0.0002	0.038	1	200

Tabla N° A.2 Datos de ramas del sistema (continuación)

Núm. Barra	Código Barra		Número de cktos	Resistencia c/ckto (p.u.)	Reactancia c/ckto (p.u.)	Tap c/ckto (p.u.)	Flujo máximo c/ckto (MW)
	Inicial	Final					
84	85	MOYOP60	SALAM60	1	0.1281	0.55227	46.8
84	87	MOYOP60	CALLA60	1	0.0536	0.09152	56.1
84	340	MOYOP60	MEPSA	1	0.12924	0.49799	60
87	90	CALLA60	HUACH60	1	0.34301	0.59652	60
87	383	CALLA60	CALLA 60	1	0.00083	0.00145	100
88	89	CALL220	CALLA220	1	0.00002	0.00021	381.1
89	383	CALLA220	CALLA 60	1	0.00164	0.13824	1
90	129	HUACH60	SROSV60	1	0.12498	0.21549	36
90	430	HUACH60	SCLARA60	1	0.02802	0.09756	41
90	432	HUACH60	STANITA6	1	0.02941	0.10238	36
91	429	NANA60	NANA10	1	0.02368	0.368	0.9619
91	430	NANA60	SCLARA60	1	0.03899	0.13574	41
92	477	HVEL110	NEUTRO4	1	-0.00172	-0.07763	1.03
93	478	ICA10	NEUTRO5	1	0.00032	0.1927	1.03
94	131	CAO138	SETNOR1	1	0.02616	0.07036	71.7
98	99	TMAR138	HUANU	1	0.07755	0.23637	45
98	147	TMAR138	TMAR220	1	0.004	0.252	0.9434
98	208	TMAR138	AUCA138	1	0.07032	0.21423	45
99	122	HUANU	PARAGII	1	0.06218	0.24134	45
100	101	OROY2.3	OROY50	1	0.03833	0.71917	1.0352
101	103	OROY50	MALPA50	1	0.12713	0.37145	39.6
101	124	OROY50	FUNDIC	1	0.01621	0.04391	44.6
102	103	MALPA6.9	MALPA50	1	0.00735	0.12559	0.9524
103	104	MALPA50	CARHUA50	1	0.86496	1.25227	25.2
103	105	MALPA50	JUNIN	1	0.49891	0.7438	25.2
103	123	MALPA50	MAYUP	1	0.09755	0.27945	44.2
104	105	CARHUA50	JUNIN	1	0.36756	0.50889	25.2
104	108	CARHUA50	SHELBY	1	0.26791	0.43525	33.7
104	112	CARHUA50	CARHUA13	1	0.00667	0.29433	1.1241
104	159	CARHUA50	HUARON	1	0.26791	0.43525	33.7
106	107	BVISTA	EXCEL50	1	0.16581	0.21893	25.2
106	108	BVISTA	SHELBY	1	0.08692	0.12233	25.2
106	163	BVISTA	LAFUND	1	0.02897	0.04589	25.2
107	109	EXCEL50	PARAG50	1	0.0081	0.02041	44.6
107	164	EXCEL50	EXC2.4	1	0.26667	1.86667	0.9868
107	165	EXCEL50	CPED12	1	0.05	0.775	0.8762
107	166	EXCEL50	EXPD2.4	1	0.6	4.26667	0.966
107	437	EXCEL50	VALEGR	1	0.06472	0.08545	25.2
109	167	PARAG50	D.MILPO	1	0.0145	0.04698	44.2
109	479	PARAG50	NEUTRO6	1	0.00455	-0.05568	0.96
109	510	PARAG50	NEUTRO37	1	0.00455	-0.00909	0.96
110	479	PARAG12	NEUTRO6	1	0.00455	0.19205	1.05
110	510	PARAG12	NEUTRO37	1	0.00455	0.14773	1.05
111	122	PARAG138	PARAGII	1	0.00139	0.00475	121.9
111	479	PARAG138	NEUTRO6	1	0.00455	0.23068	0.8696
111	510	PARAG138	NEUTRO37	1	0.00455	0.19773	0.8696
112	115	CARHUA13	CARIPA	1	0.04094	0.13738	137.4
112	122	CARHUA13	PARAGII	1	0.02985	0.10182	121.9
113	114	YAU13A	YAU138	1	0.00467	0.15	1.0256
114	121	YAU138	YAU13B	1	0.008	0.22	0.975
114	194	YAU138	SISABI38	1	0.0064	0.03472	155.4
115	116	CARIPA	ONU138	1	0.01569	0.05267	137.4
117	498	MAN13B	NEUTRO25	1	0.04	0.8	1
118	119	PACHA23	PACHA50	1	0.02867	0.33333	15
119	120	PACHA50	CURIP50	1	0.12706	0.19295	25.2
119	171	PACHA50	MORO50	1	0.17381	0.23663	22.1
119	192	PACHA50	MORO-T50	1	0.17557	0.23903	22.1
119	362	PACHA50	S.CRIS50	1	0.22832	0.34649	21.5
119	369	PACHA50	M.TUNE50	1	0.04213	0.05245	17.3
122	377	PARAGII	P220	1	0.0025	0.10417	0.9586
125	126	TALA10	TALA 220	1	0.0052	0.0928	0.9822
126	149	TALA 220	MALACAS	1	0.00867	0.15467	0.9909
126	195	TALA 220	ZORRI220	1	0.0228	0.14195	133.3
129	432	SROSV60	STANITA6	1	0.05655	0.15637	45
131	133	SETNOR1	TRU' NO	1	0.032	0.3496	1
131	399	SETNOR1	ACHIC138	1	0.07924	0.26147	100
131	467	SETNOR1	TNOR13.8	1	0.00222	0.14789	1
131	481	SETNOR1	NEUTRO8	1	0.0009	-0.0044	1
132	481	SETNOR	NEUTRO8	1	0.0003	0.11425	1
134	135	TR SUR13	TG4 TS	1	0.02677	0.33933	0.99
134	136	TR SUR13	TRU SUR	1	0.02677	0.33933	1
138	483	PANU66	NEUTRO10	1	0.002	0.38041	1
139	484	SEGU A10	NEUTRO11	1	0.001	0.09183	1
140	141	PACA 60	PACA 6	1	0.03789	0.22368	1.0675
142	143	GALL 60	GALL 10	1	0.01201	0.245	1
144	462	HUALLA	STACRUZ6	1	0.1036	0.18704	35
144	485	HUALLA	NEUTRO12	1	0.0174	0.134	1
146	148	AG13 TG2	AGUA220	1	0.003	0.125	1
147	148	TMAR220	AGUA220	1	0.00969	0.07427	190.5
147	203	TMAR220	VIZCARRA	1	0.02246	0.1734	190.5

Tabla N° A.2 Datos de ramas del sistema (continuación)

Núm	Barra	Código Barra		Número de cktos	Resistencia c/ckto (p.u.)	Reactancia c/ckto (p.u.)	Tap c/ckto (p.u.)	Flujo máximo c/ckto (MW)
		Inicial	Final					
148	373	AGUA220	AGUA138	1	0.005	0.20833	0.96	60
148	388	AGUA220	AG13 TGI	1	0.003	0.125	1	100
150	485	HUALL 13	NEUTRO12	1	0.0022	-0.07	1	8.5
151	486	SJUAN10	NEUTRO13	1	0.01627	0.16217	1.03	60
153	439	COBRI 69	COBRIZAI	1	0.13333	0.50397		66.9
153	487	COBRI 69	NEUTRO14	1	0	-0.011	1	40
154	487	COBRI 10	NEUTRO14	1	0	0.2146	1	16.7
155	488	PAITA416	NEUTRO15	1	0.27	-0.2925	1	8
156	488	PAITA10	NEUTRO15	1	0.378	0.7725	1	8
157	158	CURM60	CURM10	1	0.06514	0.54286	1.05	17.5
159	437	HUARON	VALEGR	1	0.18372	0.25447		22.1
160	161	SJUA50	SJUA2.4	1	0.6	4.38	0.924	1.5
160	162	SJUA50	SJUA11	1	0.03333	0.664	0.9	15
160	437	SJUA50	VALEGR	1	0.0367	0.05436		22.1
167	168	D.MILPO	HUICRA50	1	0.0472	0.06992		22.1
168	169	HUICRA50	HUICRA2.	1	0.6	3.64667	0.9447	1.5
168	408	HUICRA50	ANTAGASH	1	0.18586	0.29003		22.1
170	408	GOYLLAR	ANTAGASH	1	0.15476	0.23021		25.2
171	172	MORO50	DUVAZ50	1	0.02267	0.02532		21.7
171	174	MORO50	MOR2.4	1	0.08	1.22	0.95	6
171	176	MORO50	TICLIO50	1	0.09338	0.1269		25.2
172	173	DUVAZ50	YAULI50	1	0.04819	0.05701		21.7
175	176	CASAP50	TICLIO50	1	0.10744	0.14185		25.2
175	177	CASAP50	CNOR50	1	0.01724	0.02343		25.2
175	179	CASAP50	CAS4.16	1	0.26667	1.64	0.9456	3
175	180	CASAP50	CAS2.4	1	0.05333	1.11111	0.96	9
175	181	CASAP50	ANTUQ50	2	0.02172	0.03313		25.2
177	178	CNOR50	CNOR4.16	1	0.4	2.4	0.9526	2.5
177	192	CNOR50	MORO-T50	1	0.18502	0.2443		25.2
181	182	ANTUQ50	ANTUQ2.4	1	0.26667	1.6	0.866	3
181	384	ANTUQ50	ROS50	1	0.04213	0.06241		22.1
183	184	BELLAV50	SMAT50	1	0.09479	0.14167		26.8
183	185	BELLAV50	BELLAV2.	1	1.25	6.39423	1	1
183	384	BELLAV50	ROS50	1	0.01246	0.01846		22.1
184	186	SMAT50	SMAT2.4	1	0.93333	3.64667	1.0435	1.5
184	371	SMAT50	HUANCH50	1	0.05325	0.07981		30
187	188	ONU69	PACHYO69	1	0.13406	0.38211		61.5
188	445	PACHYO69	AZULCOCH	1	0.11282	0.32153		61.5
189	190	CHUMP69	CHUMP12	1	0.06333	0.64444	0.9524	9
189	191	CHUMP69	CHUMP2.4	1	0.21333	1.89333	1.0232	3.8
189	445	CHUMP69	AZULCOCH	1	0.11396	0.32479		61.5
194	506	SISAB138	NEUTRO33	1	0.00073	-0.02246	1	120
195	196	ZORRI220	ZORRI10	1	0.01	0.17846	0.9612	65
195	398	ZORRI220	ZARUMILL.	1	0.00637	0.05278		133.3
197	198	CARAZ66	CARHZ66	1	0.11838	0.2022		35
197	462	CARAZ66	STACRU76	1	0.1036	0.18704		35
198	199	CARHZ66	HUARZ66	1	0.1005	0.17165		35
199	200	HUARZ66	TICA66	1	0.03443	0.05879		35
200	201	TICA66	PARIA 66	1	0.01377	0.02352		35
201	202	PARIA 66	PARIA 13	1	0	0.89674	1	9.2
203	204	VIZCARRA	ANTA220	1	0.00619	0.05485		190.5
203	377	VIZCARRA	P220	1	0.01529	0.13194		168.6
205	206	YANA220	YANA10	1	0.0102	0.2338	1.0455	50
205	210	YANA220	CHIMA220	1	0.00332	0.02881		380
207	500	HCHO220	NEUTRO27	1	0	0.0625	1	30
208	209	AUCA138	TOCA138	1	0.09638	0.29415		45
210	211	CHIMA220	CHIMA13	1	0.00075	0.0744	1.0668	168
212	232	JULIA138	AZANG138	1	0.06451	0.20839		75
212	330	JULIA138	PUNO138	1	0.0217	0.09087		75
212	489	JULIA138	NEUTRO16	1	0.01064	0.35996	1	40
213	214	JULIA60	JULIA10	1	0.0172	0.344	0.9804	25
213	489	JULIA60	NEUTRO16	1	-0.00009	-0.03234	1	40
214	218	JULIA10	SKD2.16	1	0	5	1.0286	1
214	220	JULIA10	TAPAR2.3	1	0	0.94	1.087	5
215	216	PUNO60	PUNO10	1	0	0.61667	0.9667	12
215	501	PUNO60	NEUTRO28	1	0	0.27222	1	18
216	219	PUNO10	ALCO2.4	1	0	0.92	1	2.5
216	221	PUNO10	BELLD	1	0	1.88	1	2.5
217	489	JULIAN10	NEUTRO16	1	0.00574	0.19844	1	10
222	223	DOLOR138	DOLOR11	1	0.01311	0.26503	1.087	36.6
222	225	DOLOR138	QUEN138	1	0.00691	0.02227		75
222	349	DOLOR138	INCA138	1	0.0114	0.03519		60
223	224	DOLOR11	DOLO4.16	1	0.01667	0.38667	1.0095	15
225	227	QUEN138	COMBA138	1	0.07216	0.23323		75
225	296	QUEN138	CAELP138	1	0.01973	0.06222		75
225	339	QUEN138	QUEN33PM	1	0	2	1	5
225	493	QUEN138	NEUTRO20	1	0	1.048	1	10
226	493	QUEN33	NEUTRO20	1	0	0.485	1.0455	3
227	229	COMBA138	TINTA138	1	0.08324	0.26922		75
227	492	COMBA138	NEUTRO19	1	0.02167	0.43333	1	15

Tabla N° A.2 Datos de ramas del sistema (continuación)

Núm. Barra	Código Barra		Número de cktos	Resistencia c/ckto (p.u.)	Reactancia c/ckto (p.u.)	Tap c/ckto (p.u.)	Flujo máximo c/ckto (MW)	
	Inicial	Final						
228	317	COMB66	SICU66	1	0.34363	0.35334	15	
228	492	COMB66	NEUTRO19	1	0.00658	-0.03333	7	
229	230	TINTA138	AYAVI138	1	0.06085	0.22185	75	
229	238	TINTA138	TINT10	1	0.025	0.55	1.0219	20
229	306	TINTA138	TINTA10	1	0.00289	0.24444	0.9317	45
229	320	TINTA138	CALLA138	1	0.0341	0.22796		106.4
230	232	AYAVI138	AZANG138	1	0.03138	0.11422		75
230	491	AYAVI138	NEUTRO18	1	0	1.56846	0.9493	6.5
231	491	AYAV23	NEUTRO18	1	0	0.28846	1	6.5
232	298	AZANG138	SGAB138	1	0.09183	0.44202		92
232	344	AZANG138	SRAF138	1	0.0518	0.24793		92
232	490	AZANG138	NEUTRO17	1	0.01625	0.46232	1	20
233	490	AZANG60	NEUTRO17	1	0.00495	0.15967	1	20
234	490	AZANG23	NEUTRO17	1	-0.0006	-0.02432	1	7
235	491	AYAV10	NEUTRO18	1	0	0.16538	1	4
236	492	COMBA24	NEUTRO19	1	-0.00078	0.24667	1	8
237	493	QUEN10	NEUTRO20	1	0	-0.038	1	7
239	280	CHAIV33	CHARIV	1	0.01722	0.34628	1.0182	18
239	309	CHAIV33	CH4CH1	2	0.17858	0.2369		15
240	281	CHA33	CHA123	1	0.03043	0.6087	1.0182	11.5
240	309	CHA33	CH4CH1	1	0.00549	0.00729		15
241	242	CHIB33	JESUS33	2	0.29665	0.43296		15
241	243	CHIB33	CHALL33	1	0.10166	0.13998		17
241	278	CHIB33	TV1CH1	1	0.03478	0.53043	1.0138	11.5
241	282	CHIB33	CHAVI33	1	0.30447	0.40418		15
241	284	CHIB33	TV2CHIL	1	0.04	0.8	1.0758	10
241	285	CHIB33	TV3CHIL	1	0.032	0.704	1.0146	12.5
241	286	CHIB33	GD1CHIL	1	0.05195	1.14935	1.0152	7.7
241	287	CHIB33	GD2CHIL	1	0.03333	0.70583	1.0152	12
241	288	CHIB33	CCCHIL	1	0.01429	0.42429	1	28
241	309	CHIB33	CH4CH1	2	0.18627	0.2471		15
241	325	CHIB33	PQIB33	1	0.3077	0.44857		15
241	328	CHIB33	CHIL138	1	0.00908	0.181	0.9901	60
242	245	JESUS33	SOCA33	2	0.2471	0.3281		15
243	325	CHALL33	PQIB33	1	0.12171	0.16146		15
243	332	CHALL33	CHAL10	1	0.02368	0.368	1	25
244	245	SOCA138	SOCA33	1	0.00454	0.0905	0.9588	120
244	246	SOCA138	SANTI138	2	0.01706	0.05736		135
244	248	SOCA138	CVER138	2	0.00905	0.03043		135.9
244	297	SOCA138	SOCA220	2	0	0.0675	1	200
245	325	SOCA33	PQIB33	2	0.22528	0.29886		20
246	247	SANTI138	CHAVG3	1	0.00351	0.07731	1.0146	171
246	320	SANTI138	CALLA138	1	0.03395	0.22695		106.4
246	328	SANTI138	CHIL138	1	0.01117	0.04718		60
248	354	CVER138	REPART1	1	0.01684	0.04793		100
249	250	TOQUE11	TOQUE13	1	0.02344	0.38125	1	16
250	251	TOQUE13	TOQS138	1	0.00909	0.16061	1	66
251	289	TOQS138	TOQEP138	1	0.00031	0.00133		90
251	301	TOQS138	MON138	1	0.02868	0.09884		100
251	312	TOQS138	QHON138	1	0.01988	0.07283		60
251	315	TOQS138	PBT138	1	0.0032	0.0129		60
251	409	TOQS138	LIXIV138	1	0.0011	0.00459		60
252	253	BOT1138	BOT69	1	0.01503	0.30067	1	30
252	301	BOT1138	MON138	2	0.01211	0.08206		196
252	315	BOT1138	PBT138	1	0.01758	0.07094		60
252	495	BOT1138	NEUTRO22	1	0	0.10388	1	116
252	496	BOT1138	NEUTRO23	1	0.01096	0.20991	1	58
253	254	BOT69	HBOT69	1	0.01691	0.03089		20
254	255	HBOT69	HRUM169	1	0.09352	0.17086		20
254	256	HBOT69	HBOTIF	1	0.0635	1.27	1	5
255	257	HRUM169	HRUM1	1	0.0635	1.27	1	5
255	277	HRUM169	SUCH69	1	0.23912	0.43713		20
258	259	SPCC138	ILO138E	1	0.01005	0.03857		60
258	260	SPCC138	RILO138	1	0.00591	0.02496		75
258	290	SPCC138	ILOTV1	1	0.01515	0.30303	1	33
258	291	SPCC138	ILOTV2	1	0.01515	0.30303	1	33
258	292	SPCC138	ILOTV3	1	0.00857	0.17143	1	70
258	293	SPCC138	ILOTV4	1	0.00857	0.17143	1	70
258	301	SPCC138	MON138	1	0.02216	0.14399		100
258	310	SPCC138	ILOTG1	1	0.0125	0.24021	1.025	48
258	311	SPCC138	ILOTG2	1	0.00444	0.08444	1.0488	13.5
259	312	ILO138E	QHON138	1	0.04041	0.16232		60
259	314	ILO138E	ILO138	1	0	0.73833	1	12
260	261	RILO138	RILO10	1	0.0238	0.646	1	15
262	289	ARIC138	TOQEP138	1	0.02198	0.09291		75
262	494	ARIC138	NEUTRO21	1	0.00848	0.16967	1	30
263	494	ARIC2	NEUTRO21	1	0.00693	0.13865	1.05	14.1
264	265	ARIC266	ARIC166	1	0.03234	0.05909		25
264	267	ARIC266	TOMA66	1	0.3361	0.61471		25
264	494	ARIC266	NEUTRO21	1	-0.00195	-0.039	1	30

Tabla N° A.2 Datos de ramas del sistema (continuación)

Núm. Barra	Código Barra		Número de cktos	Resistencia c/ckto (p.u.)	Reactancia c/ckto (p.u.)	Tap c/ckto (p.u.)	Flujo máximo c/ckto (MW)	
	Inicial	Final						
265	266	ARIC166	ARIC1	1	0.01332	0.26631	0.953	28.2
265	275	ARIC166	SARI66	1	0.00173	0.00334		15
267	358	TOMA66	LOSHER66	1	0.16915	0.30909		25
268	269	TACNA66	TACPI66	1	0.04159	0.07597		25
268	294	TACNA66	TAC10	1	0.02628	0.175	0.9773	18
268	331	TACNA66	YARA66	1	0.15762	0.288		15
268	358	TACNA66	LOSHER66	1	0.03523	0.06436		30
269	270	TACPI66	CALAN66	1	0.0231	0.0422		25
270	271	CALAN66	CALANA12	1	0.01563	0.31292	1	24
270	389	CALAN66	CALANA4	1	0.01563	0.31292	1	24
272	495	BOT113	NEUTRO22	1	0	0.035	1	66
273	274	MOLL138	GDMOLL	1	0.0125	0.25	1.01	40
273	300	MOLL138	TGMOL1	1	0.01	0.24	1	50
273	324	MOLL138	TGMOL2	1	0.01	0.24	1	50
273	354	MOLI.138	REPART1	1	0.05195	0.14801		100
275	276	SARI66	SARI33	1	0.15	3.905	1	2
279	495	BCONC6	NEUTRO22	1	0	-0.00233	1	66
282	283	CHAVI33	CHAV1	1	0.0375	0.71429	1.0182	11.2
289	301	TOQEP138	MON138	1	0.03132	0.09942		75
290	295	ILOTV1	CATKAT	1	0.03636	1.27273	1	5.5
291	333	ILOTV2	FUN4.6	1	0	0.17857	1	28
291	336	ILOTV2	PLACID4	1	0	0.33333	1	15
296	318	CAELP138	MACH138	1	0.0628	0.19832		75
297	304	SOCA220	MONT220	2	0.01553	0.13268		150
297	305	SOCA220	SER21	1	0.02846	0.24399		304
297	338	SOCA220	SER22	1	0.02846	0.24399		304
297	412	SOCA220	CVER220	2	0.00149	0.01002		180
298	299	SGAB138	SGAB10	1	0.0027	0.088	1.029	125
298	344	SGAB138	SRAF138	1	0.04442	0.21249		92
298	457	SGAB138	MAZUCO13	1	0.07123	0.18439		90
301	323	MON138	MOQ13.8	1	0.02746	0.74538	1.3143	13
301	504	MON138	NEUTRO31	1	0	-0.0026	1	300
301	505	MON138	NEUTRO32	1	0	-0.0026	1	300
302	303	TVCAR220	TVCARB	1	0.0022	0.08	1.02	150
302	304	TVCAR220	MONT220	2	0.01277	0.04676		400
304	307	MONT220	LOSHER22	1	0.01592	0.13081		150
304	308	MONT220	PUN220	1	0.01834	0.20488		150
304	504	MONT220	NEUTRO31	1	0	0.0478	1	300
304	505	MONT220	NEUTRO32	1	0	0.0478	1	300
305	334	SER21	COTARUSE	1	0	-0.15036	1.04	300
306	329	TINTA10	TINT416	1	0.00292	0.225	1	24
307	358	LOSHER22	LOSHER66	1	0.0224	0.235	0.96	50
308	330	PUN220	PUNO138	1	0.00158	0.09183	1.02	120
312	313	QHON138	QHON13	1	0	0.90625	1	8
315	316	PBT138	PBT69	1	0	0.54667	1	15
317	319	SICU66	SICUA10	1	0.01875	0.45313	1.01	16
318	343	MACH138	MACH13.8	1	0.00382	0.11	1	100
318	349	MACH138	INCA138	1	0.06939	0.20163		60
318	497	MACH138	NEUTRO24	1	0.07443	0.5	1	7
320	502	CALA138	NEUTRO29	1	0	0.34667	1	25
321	496	MOQU13.8	NEUTRO23	1	-0.00014	0.07043	1	35
322	496	BOT6.9	NEUTRO23	1	0.00212	-0.0056	1	47
326	327	SRAF60	SRAF10	1	0.0215	0.23	0.9709	20
327	344	SRAF10	SRAF138	1	0.01792	0.19167	1	24
330	501	PUNO138	NEUTRO28	1	0	0.57778	1	18
334	335	COTARUSE	SER11	1	0	-0.11499	1	300
334	337	COTARUSE	SER12	1	0	-0.11499	1	300
334	338	COTARUSE	SER22	1	0	-0.15036	0.9615	300
340	421	MEPSA	SROSV60E	1	0.00166	0.0064		60
341	497	MACH10.5	NEUTRO24	1	0.00313	0.17143	1	3
342	497	MACH60	NEUTRO24	1	0.00313	0.5	1	7
345	498	CARM138	NEUTRO25	1	0.04	0.8	1	1
346	347	CARM133	HUANCA33	1	0.17601	0.17284		15
346	498	CARM133	NEUTRO25	1	0.04	0.8	1	5
347	348	HUANCA33	TABLA33	1	0.65997	0.64814		15
349	352	INCA138	ABAN138	1	0.07876	0.25467		75
349	353	INCA138	YURA6.9	1	0.0145	0.30375	1	40
349	499	INCA138	NEUTRO26	1	0.05625	0.79167	1	6
349	503	INCA138	NEUTRO30	1	0.01688	0.2375	1	20
350	499	CACH33	NEUTRO26	1	0.00938	1.20833	1	5
351	499	CACH10	NEUTRO26	1	-0.00209	0.29167	1.05	3
354	468	REPART1	LJOYA10	1	0.01	0.56667	1	15
356	405	HCHO66	ANDAHU66	1	0.15901	0.35135		84.6
356	500	HCHO66	NEUTRO27	1	0	0.0625	1	30
357	500	HCHO10	NEUTRO27	1	0	0.0625	1	9
359	360	ANDA50	ANDA4.16	1	0.06667	1.04267	1	7.5
359	361	ANDA50	ANDELC50	1	0.01628	0.02518		19.1
361	362	ANDELC50	S.CRIS50	1	0.0834	0.12901		19.1
362	363	S.CRIS50	S.CR4.16	1	0.26667	1.64	1	3
362	364	S.CRIS50	S.CR2.4	1	0.21333	1.57333	1	3.8

Tabla N° A.2 Datos de ramas del sistema (continuación)

Núm. Barra	Código Barra		Número de cktos	Resistencia o/ckto (p.u.)	Reactancia o/ckto (p.u.)	Tap c/ckto (p.u.)	Flujo máximo c/ckto (MW)	
	Inicial	Final						
365	366	S.ANT50	S.ANT4.1	1	0.73333	4.43333	0.9198	1.5
365	367	S.ANT50	C.MINA50	1	0.02062	0.0319		19.1
365	438	S.ANT50	S.ANT10	1	0.11	0.75	1	10
367	368	C.MINA50	C.CONC50	1	0.09851	0.08662		15.2
368	369	C.CONC50	M.TUNE50	1	0.21763	0.19066		13.9
369	370	M.TUNE50	MTUNE2.4	1	0.08	1.41667	1	6
371	372	HUANCH50	HUANCH110	1	0.01471	0.41667	1	20.4
373	374	AGUAI38	PUCAL138	1	0.07401	0.34888		45
374	375	PUCAL138	PUCAL60	1	0.00545	0.22727	0.98	55
375	382	PUCAL60	PUCAL10	1	0.01071	0.44643	1.01	28
376	377	CM220	P220	1	0.00547	0.04699		168.6
376	395	CM220	SISAB220	2	0.00559	0.05351		339.1
378	501	PUNO23	NEUTRO28	1	0	-0.01667	0.9957	6
379	381	CALLA66	CAY66	1	0.23364	0.62487		18
379	502	CALLA66	NEUTRO29	1	0	0.16333	1	30
380	502	COL24	NEUTRO29	1	0	-0.01	1.0435	7
384	385	ROS50	ROS2.4	1	0	0.94444	1	9
386	503	CACHI60	NEUTRO30	1	0.00281	0.3625	1	20
387	503	CACHI23	NEUTRO30	1	-0.00063	0.0875	1	9
390	505	MONT10B	NEUTRO32	1	0	0.111	1	50
391	504	MONT10A	NEUTRO31	1	0	0.111	1	50
392	442	CANTE220	CHILC220	1	0.01423	0.08339		180
392	511	CANTE220	NEUTRO38	1	0	0.6525	1	20
393	511	CANTER60	NEUTRO38	1	0	-0.0375	1	20
394	511	CANTER10	NEUTRO38	1	0	0.2625	1	6.6
395	397	SISAB220	YUNC13.8	1	0.00053	0.02822	1	144.6
395	506	SISAB220	NEUTRO33	1	0.0006	0.11529	1	120
396	506	SISABE22	NEUTRO33	1	0.01186	0.39137	1	9
400	401	TCOLO60	TCOL10.5	1	0.0456	0.416	1	25
402	403	POECHO60	POECHOS1	1	0	0.28333	1.0558	30
405	507	ANDAJU66	NEUTRO34	1	0	0.36983	1	9
406	507	ANDAJU22	NEUTRO34	1	0	0.33017	1	9
407	507	ANDAHU10	NEUTRO34	1	0	-0.00872	1	2.5
409	410	LIXIV138	LIXIV13.	1	0.02783	0.13333	1	60
412	434	CVER220	SULFUROS	1	0.00006	0.0004		200
413	414	CHILUNO2	CHIL TG1	1	0.0002	0.03919	1	210
413	441	CHILUNO2	CHIL TG2	1	0.0002	0.03919	1	210
413	442	CHILUNO2	CHILC220	2	0.00012	0.0007		450
413	465	CHILUNO2	CHIL TG3	1	0.0002	0.03919	1	210
415	416	MINA60	MINA34.5	1	0.00883	0.4	1	25
417	508	TACAM60	NEUTRO35	1	0.0044	-0.0057	1.0383	50
418	508	TACAM10	NEUTRO35	1	0.00032	0.1927	1	30
420	421	SROSA60E	SROSV60E	1	0.00086	0.00392		228.6
420	423	SROSA60E	CANTOGR6	1	0.02857	0.10023		56
420	424	SROSA60E	JICAMAR6	1	0.05147	0.17914		56
420	427	SROSA60E	TACNA60	2	0.00484	0.00793		45
421	422	SROSV60E	SROS10	1	0.02232	0.093	1	100
421	427	SROSV60E	TACNA60	1	0.00502	0.0084		55
423	424	CANTOGR6	JICAMAR6	1	0.03119	0.10854		56
423	426	CANTOGR6	CANT10	1	0.00568	0.188	0.995	50
424	425	JICAMAR6	JICAM10	1	0.02272	0.188	0.995	50
427	428	TACNA60	TACNA10	1	0.02272	0.12533	1	75
430	431	SCLARA60	STCLARA1	1	0.02368	0.376	1	25
432	433	STANITA6	STANITA1	1	0.00568	0.188	1	50
434	509	SULFUROS	NEUTRO36	1	0.00048	0.00814	1	249
435	509	SULF3 22	NEUTRO36	1	0.00049	0.03243	1	249
436	509	SULF3 10	NEUTRO36	1	-0.00042	0.01439	1	74.7
439	440	COBRIZAI	COBR110	1	0.0064	0.1496	1	50
442	443	CHILC220	DESIE220	1	0.01957	0.10595		180
442	444	CHILC220	KALL TG1	1	0.0002	0.06571	1	210
442	466	CHILC220	KALL TG2	1	0.00018	0.06	1	230
442	469	CHILC220	PLATA220	1	0.0116	0.10982		300
446	447	CHILLON2	CHILLON6	1	0.00108	0.09667	0.9546	120
447	448	CHILLON6	PAMPIL60	1	0.00948	0.0309		58
447	453	CHILLON6	OQUEND60	1	0.0274	0.08938		58
447	455	CHILLON6	NARANJ60	1	0.04227	0.07856		58
448	449	PAMPIL60	VENTAN60	1	0.00948	0.0309		58
449	450	VENTAN60	ZAPALL60	1	0.01508	0.05253		58
450	451	ZAPALL60	PIEDR60	1	0.01924	0.0737		58
450	452	ZAPALL60	CAUDIV60	1	0.05621	0.21653		58
453	454	OQUEND60	TVALLE60	1	0.02762	0.0901		58
453	464	OQUEND60	OQUEND13	1	0.003	0.11	1	100
455	456	NARANJ60	INFANT60	1	0.01332	0.04719		58
457	458	MAZUCO13	PMALDO13	1	0.18758	0.41097		90
457	459	MAZUCO13	MAZUCO23	1	0	0.9	1.0507	10
458	512	PMALDO13	NEUTRO39	1	0	0.45	1.0507	12.5
460	512	PMALDO23	NEUTRO39	1	0	-0.25	1	4
461	512	PMALDO10	NEUTRO39	1	0	0.31	1	11
462	463	STACRUZ6	STCRUZ2.	1	0.04	1.0425	1	8
469	470	PLATA220	PLAT13.8	1	0.00017	0.05625	1	240

BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, New York, 1994.
- [2] A. Monticelli, *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*, Editora Edgar Bucher Ltda, 1983.
- [3] W. F. Tinney and C. E. Hart, "Power Flow Solution by Newton's Method," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-86, pp. 1449–1460, 1967.
- [4] B. Stott and O. Alsac, "Fast Decoupled load-Flow," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-93, pp. 859–869, 1974.
- [5] Bazaraa M. S., Sherali H. D., Shetty C. M, *Linear Programming and Network Flows*, John Wiley and Sons, 1983.
- [6] Dantzig, G. B., *Simplex Method*. New Jersey, Princeton University Press, 1947.
- [7] Dantzig G. B., *Linear Programming and extensions*, New Jersey, Princeton University Press. 1963.
- [8] J. Carpentier, "Contribution to the Economic Dispatch Problem", (*in French*) *Bulletin Society Française Electriciens*, vol.3, pp. 432-447, Aug. 1962.
- [9] H. W. Dommel and W.F. Tinney, "Optimal Power Flow Solutions", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-87, no. 10, pp. 1866-1876, Oct. 1968.
- [10] B. Stott and H. Hobson, "Power System Security Control Calculations Using Linear Programming – Part I and II", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Jul 1977.
- [11] R. C. Burchett, H. H Happ and K. Wirgau, "Large Scale Optimal Power Flow", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol.101, no. 11, pp. 3722-3732, Oct. 1982.
- [12] S. Granville, "Optimal reactive Dispatch Through Interior Point Methods", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 9, No. 1, pp. 136-146, Feb. 1994.
- [13] A. Wood and B. Wollenberg, *Power generation, operation, and control*, John Wiley & Sons, 2nd. ed., 1996.

- [14] Optimization Toolbox Manual. MATLAB versión 7.0.0.19920 (R14). Disponible on-line: www.mathworks.com/.
- [15] T. Gjengedal, S. Johansen and Oddbjorn Hansen, "A qualitative approach to economic-Environmental Dispatch – Treatment of Multiple Pollutants", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 7, No. 3, pp. 367-373, September, 1992.
- [16] Manfred F. Bedriñana, João A. Bosco, Carlos A. F. Murari, Carlos A. Castro, "Decisions in Power System Operation based on Fuzzy Economic and Environmental Dispatch", *2007 IEEE Lausanne Power Tech Proceedings, Lausanne, Switzerland*, pp. 1296-1301, 1–5 Julio 2007.