



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE INGENIERÍAS

CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

T E S I S

PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO

TÍTULO

**DESPACHO ECONÓMICO DE LAS UNIDADES WARTSILA Y
CATERPILLAR DE LA CENTRAL TERMOELÉCTRICA TERMOGUAYAS
GENERATION S.A.**

AUTORES

**JULIO JAVIER GAVILÁNEZ PAZMIÑO
EDGAR GUILLERMO GAVILÁNEZ PAZMIÑO**

DIRECTOR

ING. NÉSTOR SANDOVAL

GUAYAQUIL, FEBRERO DEL 2011

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Los conceptos desarrollados, análisis realizados y las conclusiones del presente trabajo, son de exclusiva responsabilidad de los autores.

Guayaquil, Octubre 16 del 2010

JULIO JAVIER GAVILÁNEZ PAZMIÑO

EDGAR GUILLERMO GAVILÁNEZ PAZMIÑO

DEDICATORIAS Y AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a **DIOS** por haberme concedido la oportunidad de vivir y a mi madre y abuela por confiar siempre en mí, por mantenerme en un núcleo familiar excepcional, en el cual adquirí infinidad de valores morales y emocionales como lo son el amor y el respeto para mí y para los que me rodean, valores que **MARÍA PAZMIÑO MANJARRÉZ** y **BERTHA MANJARRÉZ MORALES** me brindaron y demostraron ustedes han sido y serán la piedra angular de mi vida y en mi carrera profesional, las amo. Gracias por guiarme siempre en un camino de rectitud por apoyarme en mis tropiezos y enseñarme a seguir siempre hacia adelante.

Agradezco a mi esposa la **ING. VIVIANA GUERRERO MIRANDA** por todo su apoyo moral, gracias por siempre apoyar y confiar en mis metas por todos los momentos difíciles y tristes de mi vida, eres parte importante de mi formación con tú ejemplo y consejos, siempre atinados has puesto en ruta mi camino, gracias te amo.

JULIO JAVIER GAVILÁNEZ PAZMIÑO

“LA TÉCNICA AL SERVICIO DE LA PATRIA”

Quiero agradecer y dedicar este trabajo a mi madre **María Pazmiño Manjarréz** ya que ella es la persona por la cual he salido adelante, ella es la que me ha incentivado a seguir estudiando ha luchado duro estando sola y por lo tanto este el producto de su esfuerzo y dedicación.

EDGAR GUILLERMO GAVILÁNEZ PAZMIÑO.

“LA TÉCNICA AL SERVICIO DE LA PATRIA”

OBJETIVOS

- Emplear una Metodología para la realización del Despacho Económico en distintos puntos de operación con el fin de disminuir los Costos Operacionales de la Central **TERMOGUAYAS GENERATION S.A.**
- Aplicar la Programación Dinámica en la Central **TERMOGUAYAS GENERATION S.A.** para el acoplamiento ó desacoplamiento de las Unidades y conocer sus Costos al finalizar el Despacho.
- Desarrollar las Curvas de Costo Incremental para las Unidades Boosters que existen en las Barcazas Wartsila y Caterpillar dentro de la Central **TERMOGUAYAS GENERATION S.A.**
- Desarrollar las Curvas de Eficiencia para las Unidades Boosters que existen en las Barcazas Wartsila y Caterpillar dentro de la Central **TERMOGUAYAS GENERATION S.A.**
- Establecer los Costos de Arranque y Parada de la Unidades Boosters que existen en la Barcazas **WARTSILA** y **CATERPILLAR** dentro de la Central **TERMOGUAYAS GENERATION S.A.**
- Cumplir con las Regulaciones del **CONELEC** sobre la Planificación del Despacho, Costos Incrementales y Eficiencia de la Central **TERMOGUAYAS GENERATION S.A.**

METODOLOGÍA

A continuación se desarrolla la metodología para la obtención de los datos, los cuales servirán en el proceso de la realización del Despacho Económico.

1. Muestras de Puntos Referenciales para desarrollar las Curvas Aproximadas de cada una de las Unidades Boosters que luego serán comparadas con las Curvas del Fabricante.
 - Reconocimiento del sistema de combustible (tuberías) en las Barcazas.
 - Utilización de los Fluómetros que se encuentran en las distintas Barcazas.
 - Obtención de datos de los Fluómetros vs la Carga de las unidades.
 - Variación de carga de las unidades en distintos rangos de tiempo.
2. Obtención de la Eficiencia de las Unidades con ayuda de las Curvas Obtenidas.
 - Determinar los mejores rangos Operacionales de las Unidades.
3. Establecimiento de Costo de las Unidades visto desde un Arranque y una Parada.
 - Paro de las Unidades para la toma de datos de consumos de energías en los Sistemas Auxiliares.
4. Simulación del DESPACHO ECONÓMICO para varias cargas, usando MATLAB.
 - Usando el programa MATLAB, se introducen los datos obtenidos en las pruebas hechas a las unidades.
 - Realizar la mejor Distribución Económica de la carga en las unidades. En función de \$/ Kwhrs.

5. Simulación del Despacho Horario usando LA PROGRAMACIÓN DINÁMICA.

- Usando LA PROGRAMACIÓN DINÁMICA, se determinará el orden de entrada y salida de las Unidades así como su Costo total al final del Periodo de estudio. En función de \$/hrs.

JUSTIFICACIÓN

El **CENACE** como organismo encargado de la Operación del Sistema Eléctrico delega a cada una de las Centrales el Despacho de las unidades. En virtud del incremento de la eficiencia total de la Central **TERMOGUAYAS GENERATION S.A.**, se propone el tema en cuestión.

Considerando el procedimiento de Despacho establecido por el **CONELEC** y según el **Artículo 24 de la Ley de Régimen del Sector Eléctrico** se establece que corresponde al **CENACE** la coordinación en tiempo real del SNI (Sistema Nacional Interconectado) en condiciones de Operación normal y de contingencia así como las situaciones de racionamiento en el abastecimiento que se puedan producir y **Que, el literal c) del Art 6 del Reglamento de Despacho y Operación.**-Establece que en la Planificación de la Operación se considerará la disponibilidad de las unidades de generación.

En adición a las últimas propuestas establecidas por estos reguladores es necesario y oportuno el desarrollo de un procedimiento para el establecimiento del despacho de las unidades.

ÍNDICE

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD.....	II
DEDICATORIAS Y AGRADECIMIENTOS	III
OBJETIVOS.....	V
METODOLOGÍA.....	VI
JUSTIFICACIÓN.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE TABLAS.....	XIII
ÍNDICE DE ANEXOS	XIV

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN AL DESPACHO ECONÓMICO 15

1.1 Planteamiento del problema	15
1.2 BREVE ANÁLISIS DE LA OFERTA	
DE ENERGÍA EN EL MERCADO	19
1.2.1 Representación de un Sistema Termoeléctrico.....	19
1.2.2 Generación de Electricidad en el País	19
1.2.3 Unidades Diesel.....	20
1.2.4 Infraestructura Actual de Generación SNI en el Ecuador	22
1.2.5 Ubicación de la Central TermoGuayas Generation S.A.	
En la Red del Sistema Nacional Interconectado	22
1.2.6 Categorización de la generación en función de sus Costos.....	24
1.3 EL PROBLEMA DEL DESPACHO Y LA PROGRAMACIÓN	25
1.3.1 Programación de Unidades.....	25
1.3.2 Pre despacho Económico.....	26
1.3.3 Despacho Económico	26
1.3.4 Característica de un Despacho Económico	28

CAPÍTULO II

APLICACIÓN AL PROBLEMA DEL DESPACHO ECONÓMICO EN LA CENTRAL TÉRMICA TERMOGUAYAS GENERATION S.A.....29

2.1 Datos de las Barcazas para el Análisis	29
2.1.1 Sistema de Combustible de la Central TERMOGUAYAS GENERATION S.A. A las Unidades Generadoras	30
2.1.2 Información del Fabricante.....	32
2.2 Cálculo de las Curvas de Consumo Específico En las Unidades Boosters	34
2.3 Tablas de Resultados en distintos Escenarios de Carga en las Unidades Boosters WARTSILA Y CATERPILLAR	40
2.4 Curvas Obtenidas de Costo Incremental en las Unidades Boosters WARTSILA Y CATERPILLAR	46
2.5 Obtención de los Polinomios de Costo Incremental en las Unidades Boosters WARTSILA Y CATERPILLAR	48
2.6 Método de Lambda Iterativo	53
2.7 Método de la Secante.....	57
2.8 Despacho Económico en la Central TERMOGUAYAS GENERATION S.A. utilizando el Método de Lambda Iterativo	58
2.9 Aplicación del Método de la Secante En el Proceso de Lambda Iterativo.....	63

CAPÍTULO III

APLICACIÓN AL PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN DE UNIDADES EN LA CENTRAL TÉRMICA TERMOGUAYAS GENERATION S.A.65

3.1 Aplicación de la Programación Dinámica en la Central TERMOGUAYAS GENERATION S.A.	65
3.2 Despacho Horario DEMANDA ALTA	70
3.3 Despacho Horario DEMANDA MEDIA	77
3.4 Despacho Horario DEMANDA BAJA	84
CONCLUSIONES.....	91
BIBLIOGRAFÍA	93
ANEXO A	94
ANEXO B	103
ANEXO C	106

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 A Sala de Máquinas Barcaza CATERPILLAR	17
Figura 1.1 B Sala de Máquinas Barcaza WARTSILA	18
Figura 1.2.2 Capacidad Efectiva Instalada de Generación.....	20
Figura 1.2.3 Esquema de una Central Térmica con Unidades a Diesel	21
Figura 1.2.4 Esquema Porcentual de la Generación Bruta.....	22
Figura 1.2.5 Esquema del Sistema Nacional Interconectado	23
Figura 2.1.1 Sistema de Combustible de la Central TERMOGUAYAS GENERATION S.A. a las Unidades Generadoras	31
Figura 2.1.2 Curva del Fabricante WARTSILA Y CATERPILLAR	33
Figura 2.2 A Curva de Consumo Específico en Barcaza 1 Booster 1	38
Figura 2.2 B Curva de Costo Incremental en Barcaza 1 Booster 1	39
Figura 2.2 C Curva de Eficiencia en Barcaza 1 Booster 1	39
Figura 2.4 A Curvas Obtenidas de Costo Incremental de las Unidades WARTSILA Y CATERPILLAR	46
Figura 2.4 B Curvas Obtenidas de Costo Incremental de las Unidades WARTSILA Y CATERPILLAR	47
Figura 2.6 A Método de Lambda Iterativo para el despacho Económico.	53
Figura 2.6 B Solución Gráfica para el Despacho Económico.	54
Figura 2.6 C Proyecciones de Lambda.....	56
Figura 2.8 A Ingreso de Datos para el Despacho Económico en la Central TERMOGUAYAS GENERATION S.A.	60
Figura 2.8 B Resultado del Despacho Económico en la Central TERMOGUAYAS GENERATION S.A.	61
Figura 2.8 C Proyecciones de Lambda del Despacho Económico en la Central TERMOGUAYAS GENERATION S.A.	62
Figura 3.2 A Cronograma de Despacho Horario Demanda Alta.....	70
Figura 3.2 B Rutas Posibles para la Programación de Unidades	72
Figura 3.2 C Presentación de la Ruta Óptima con su respectivo Costo	75
Figura 3.2 D Presentación de Nodos para la Ruta Óptima en el Recorrido	76
Figura 3.3 A Cronograma de Despacho Horario Demanda Media	77
Figura 3.3 B Rutas Posibles para la Programación de Unidades	79

Figura 3.3 C Presentación de la Ruta Óptima con su respectivo Costo	82
Figura 3.3 D Presentación de Nodos para la Ruta Óptima en el Recorrido	83
Figura 3.4 A Cronograma de Despacho Horario Demanda Baja	84
Figura 3.4 B Rutas Posibles para la Programación de Unidades	86
Figura 3.4 C Presentación de la Ruta Óptima con su respectivo Costo	89
Figura 3.4 D Presentación de Nodos para la Ruta Óptima en el Recorrido	90
Figura A Demostración Económica entre cuatro Unidades Generadoras	97
Figura B Esquema de una Central Hidroeléctrica	98
Figura C Esquema de una Central Eólica.....	99
Figura D Esquema de una Central Térmica a Vapor.....	100
Figura E Esquema de una Central Térmica a Gas	101
Figura F Esquema de una Central de Ciclo Combinado	102
Figura G Niveles de Carga para un Despacho Diario de Carga	108
Figura H Método de Programación Dinámica.....	112
Figura I Solución Gráfica de la Programación Dinámica	113
Figura J Programación Dinámica	114
Figura K Ejemplo 1. Problema de la Diligencia.....	115
Figura L Resolviendo el Ejemplo 1	117
Figura M Solución del Ejemplo 1. Ruta Óptima de Nodos.....	118
Figura N – X Desarrollo del Despacho Económico de la CENTRAL TERMOGUAYAS GENERATION S.A. Aplicado en el Programa de Matlab	120-130

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1.2 A Consumo Específico Fabricante WARTSILA	32
Tabla 2.1.2 B Consumo Específico Fabricante CATERPILLAR	32
Tabla 2.2 A Datos de Barcaza 1 Booster 1	35
Tabla 2.2 B Datos Obtenidos de Barcaza 1 Booster 1	36
Tabla 2.2 C Obtención de los Puntos para el Desarrollo de las Curvas	38
Tabla A Datos Obtenidos en los Diferentes Estados	
De Carga Barcaza 1 Booster 1	40
Tabla B Datos Obtenidos en los Diferentes Estados	
De Carga Barcaza 1 Booster 2	40
Tabla C Datos Obtenidos en los Diferentes Estados	
De Carga Barcaza 3 Booster 1	41
Tabla D Datos Obtenidos en los Diferentes Estados	
De Carga Barcaza 3 Booster 2	41
Tabla E Datos Obtenidos en los Diferentes Estados	
De Carga Barcaza 4 Booster 1	42
Tabla F Datos Obtenidos en los Diferentes Estados	
De Carga Barcaza 4 Booster 2	42
Tabla G Datos Obtenidos en los Diferentes Estados	
De Carga Barcaza 4 Booster 3	43
Tabla H Datos Obtenidos en los Diferentes Estados	
De Carga Barcaza 4 Booster 4	43
Tabla I Datos Obtenidos en los Diferentes Estados	
De Carga Barcaza 5 Booster 1	44
Tabla J Datos Obtenidos en los Diferentes Estados	
De Carga Barcaza 5 Booster 2	44
Tabla K Datos Obtenidos en los Diferentes Estados	
De Carga Barcaza 5 Booster 3	45
Tabla L Datos Obtenidos en los Diferentes Estados	
De Carga Barcaza 1 Booster 1	45
Tabla 3.2 Demanda Alta - Ingreso de Costos en WINQSB	74
Tabla 3.3 Demanda Media - Ingreso de Costos en WINQSB	81

Tabla 3.4 Demanda Baja - Ingreso de Costos en WINQSB	88
Tabla L1 Número de Combinaciones Posible	109
Tabla M Resolviendo el Ejemplo 1	117
Tabla N Ingreso de los Costos en los Nodos	118
Tabla O Solución del Ejemplo 1. Costo de la Ruta	119
Tabla P Detalle y Costo de la Ruta Óptima	119

ÍNDICE DE ANEXO

ANEXO A

Glosario de Términos	95
Centrales Hidroeléctricas.....	98
Centrales Eólicas	99
Centrales Termoeléctricas Convencionales.....	100
Unidades Turbo – Gas	101
Centrales de Ciclo Combinado.....	102

ANEXO B

Método de Mínimos Cuadrados Ponderados (MMCP). Para Determinar los coeficientes a, b y c del Modelado	104
--	-----

ANEXO C

Programación de Unidades.....	107
Programación Dinámica con WINQSB.....	114
Modelos de la Programación Dinámica	114
El Problema de la Diligencia	115
Terminología y Notación Básica	116
Ingresando el Problema al WINQSB	117
Desarrollo del Despacho Económico en MATLAB.....	120

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN AL DESPACHO ECONÓMICO

1.1 Planteamiento del Problema.

La Central Térmica **TERMOGUAYAS GENERATION S.A.** conformada por 5 barcasas se encuentra instalada en las Esclusas, al sur de Guayaquil. La Central entró en funcionamiento desde Octubre del 2006, con un aporte de 150Mw al Sistema Nacional Interconectado. Las Barcasas son de la Empresa **KEPPEL ENERGY** de Singapur, una compañía de asesoría eléctrica, hizo los contactos con los empresarios de Singapur, para atraer esa inversión.

Para la generación, las barcasas utilizan un combustible que es comprado en **PETROECUADOR**. Se trata de una mezcla con un porcentaje menor de diesel, de lo que se usa en el Búnker. Además las barcasas cuentan con los permisos ambientales del Cabildo de Guayaquil.

KEPPEL invirtió 80 millones de dólares para empezar a operar sus cinco barcasas. La inversión incluye un terreno de 7 hectáreas en las Esclusas, donde también se construyó un muelle de hormigón armado de 180 metros de largo, una subestación eléctrica, un área de almacenamiento, un muelle de acceso a buques tanqueros y la línea de transmisión.

Las Centrales de Generación están sujetas a un ente regulador **CENACE** que establece los Procedimientos de Despacho y Operación, en este trabajo se efectúan las aplicaciones para la utilización del Despacho Económico y la Programación de Unidades en la Central **TERMOGUAYAS GENERATION S.A.**

Con el manejo de los Flujómetros instalados en cada una de las Barcazas se logran las Curvas Obtenidas de Costo Incremental, Costos de Arranque - Parada y las Curvas de Eficiencia. Esto con lleva a saber los Costo de Generación y el rango óptimo de carga de la Unidad. Con esto se optimizan los recursos y se gozará de una evaluación sobre los Costos en la Central **TERMOGUAYAS GENERATION S.A.**

En la Central **TERMOGUAYAS GENERATION S.A.** se utilizó un algoritmo computacional bajo la Plataforma de **MATLAB** y **WINQSB** para el Problema del Despacho y la Programación de Unidades respectivamente.

A continuación en las Figuras 1.1 A y 1.1 B se presentan las Barcazas Wartsila y Caterpillar donde se denotan la distribución física de las Máquinas Generadoras.

SALA DE MÁQUINAS BARCAZA CATERPILLAR

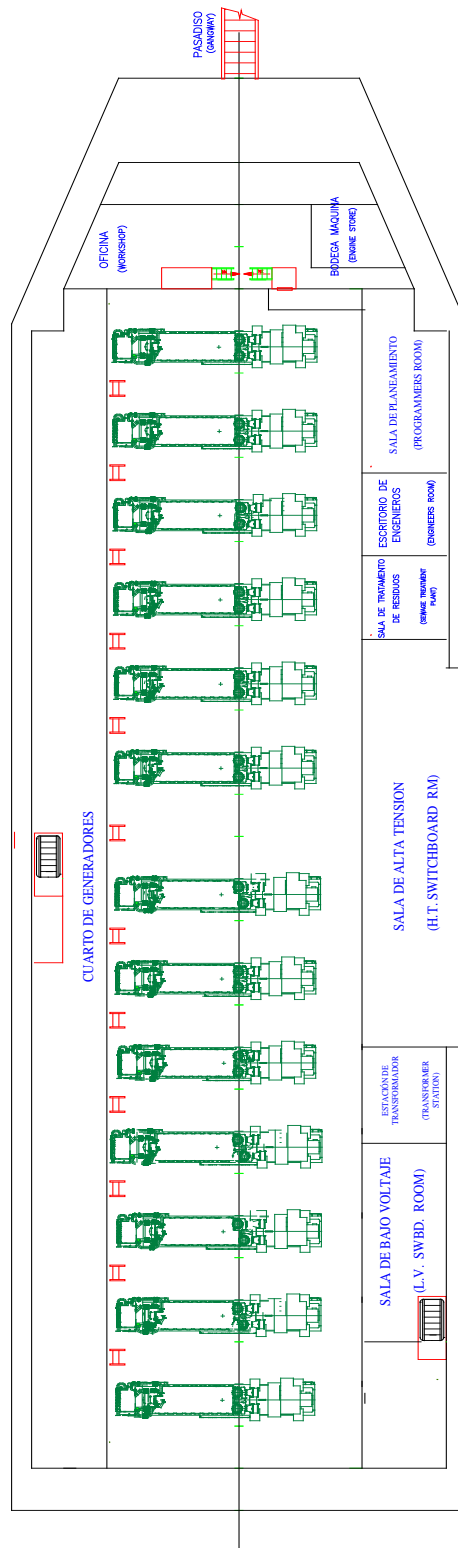


Fig. 1.1 A Sala de Máquinas Barcaza CATERPILLAR

Fuente: TERMOGUAYAS GENERATION S.A.

SALA DE MÁQUINAS BARCAZA WARTSILA

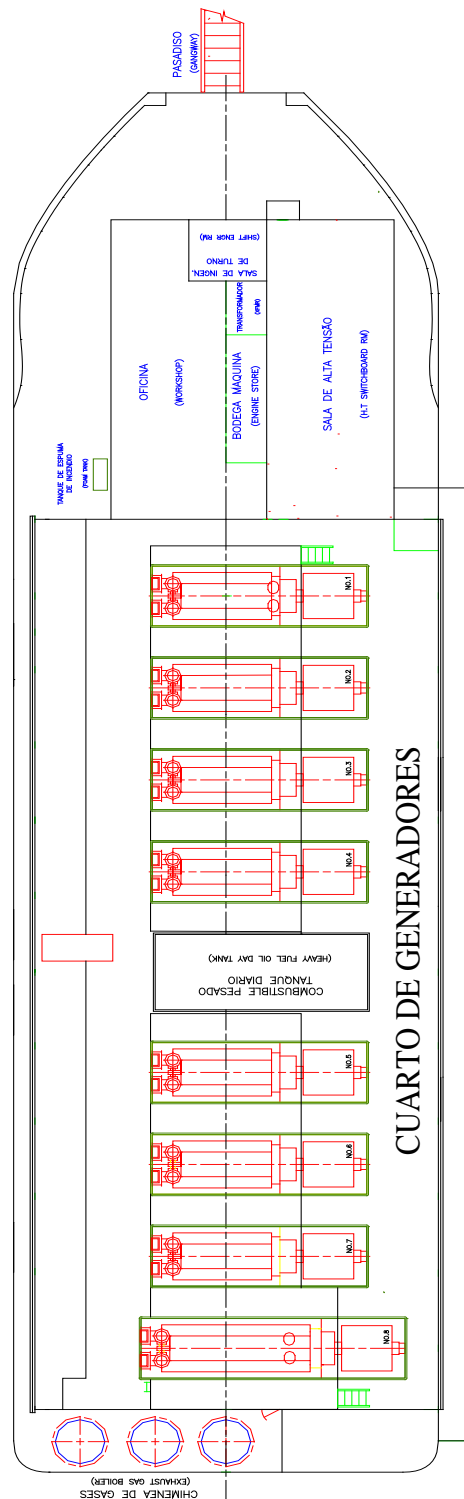


Fig. 1.1 B Sala de Máquinas Barcaza WARTSILA
Fuente: TERMOGUAYAS GENERATION S.A.

1.2 BREVE ANÁLISIS DE LA OFERTA DE ENERGÍA EN EL MERCADO

1.2.1 Representación de un Sistema Termoeléctrico

La representación de un Sistema Termoeléctrico no es más que la distribución de la Demanda del Sistema que viene dada por la participación de las Centrales Hidroeléctricas, Termoeléctricas y de la Importación (Países Vecinos Ej.: Colombia y Perú).

1.2.2 Generación de Electricidad en el País

La generación de energía eléctrica en el Ecuador se realiza en centrales Hidroeléctricas y Termoeléctricas. La potencia instalada en el primer semestre del año 2009 no ha sufrido cambios con respecto a la del año anterior, esperándose un comportamiento semejante el resto del año debido a que los proyectos hidráulicos relevantes se encuentra en etapa de construcción, no obstante se pensaría que estas circunstancias son señales para la inversión térmica eficiente de corto plazo.

El Ecuador cuenta con una capacidad efectiva instalada para generar energía eléctrica de 4307.92 Mw, de los cuales: 2031 Mw son de hidroeléctricas, 842 Mw de termoeléctricas de combustión interna, 753 Mw de termoeléctricas a Gas, 443 Mw de Termoeléctricas a Vapor y 240 Mw de potencia importada.

En la figura 1.2.2 se muestra de forma porcentual las potencias suministradas por cada una de las centrales generadoras del País incluyendo la importación.

POTENCIA INSTALADA Y EFECTIVA

■ Hidroeléctrica ■ Térmica CI ■ Térmica Gas ■ Térmica Vapor ■ Importación

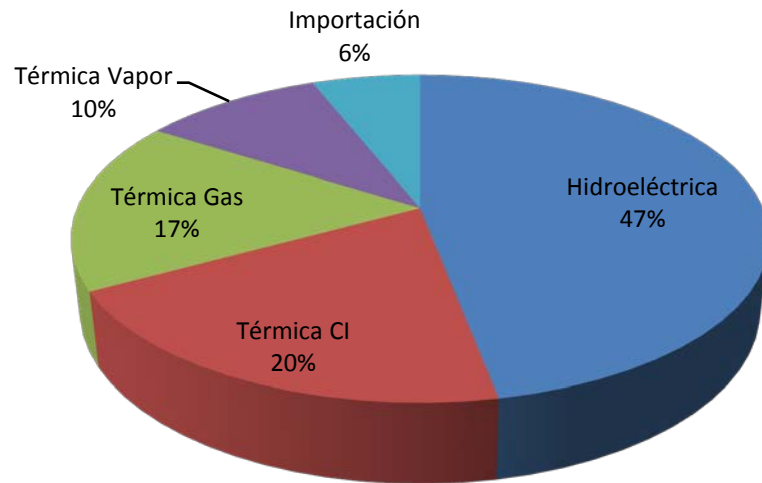


Figura 1.2.2 Capacidad Efectiva instalada de Generación

Fuente: CONELEC

1.2.3 Unidades Diesel

La tecnología de la central diesel, sigue el principio de los motores de combustión interna, es decir, aprovecha la expansión de los gases de combustión para obtener energía mecánica, la cual a su vez es transformada en energía eléctrica en el generador.

El esquema del ciclo de generación es presentado en la figura 1.2.3.

Actualmente este tipo de motor puede utilizar únicamente Búnker o Diesel. De acuerdo con la información de los fabricantes de los equipos y dependiendo de la calidad del combustible, las unidades pueden consumir este combustible como base y diesel como respaldo.

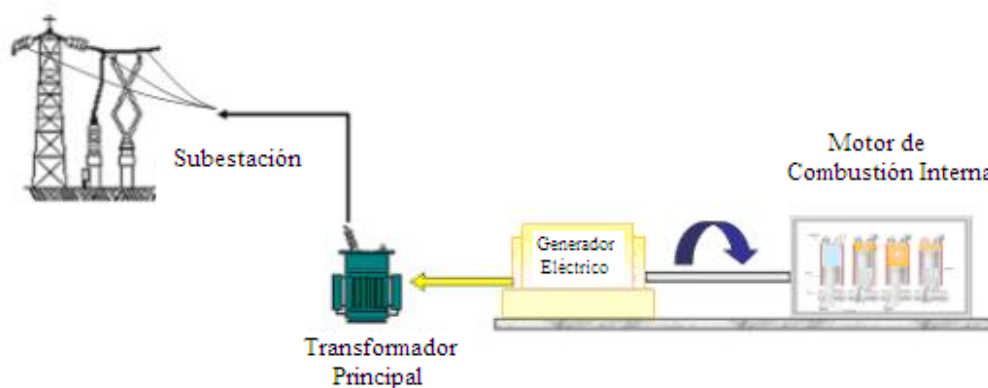


Figura 1.2.3 Esquema de una Central Térmica con Unidades a Diesel

Fuente: Modelo de las Unidades Termoeléctricas, Isaías Guillen Moya

1.2.4 Infraestructura Actual de Generación SNI en el ECUADOR

Ecuador cuenta con una importante diversificación en su parque de generación, conformado en su mayoría por centrales hidroeléctricas y termoeléctricas. La producción de energía eléctrica en el MEM durante el primer semestre de 2009 ha sido de 8.408 Gwh, incluidos 13,2 Gwh de exportación a Colombia. Esta generación ha tenido la siguiente composición:

- Energía hidroeléctrica: 5.145 Gwh (1.993 Gwh en las tres centrales con embalse y 3.152 Gwh en las demás hidroeléctricas).
- Energía termoeléctrica con turbinas a vapor: 1.223 Gwh, incluida la generación de 3,23 Gwh de biomasa.
- Energía termoeléctrica con motores de combustión interna: 613 Gwh
- Energía termoeléctrica con turbinas a nafta-diesel: 42 Gwh
- Energía termoeléctrica con turbinas a gas y diesel: 335 Gwh
- Energía termoeléctrica con turbinas a gas natural: 400 Gwh
- Importación de energía desde Colombia: 651 Gwh

Generación Bruta Porcentual

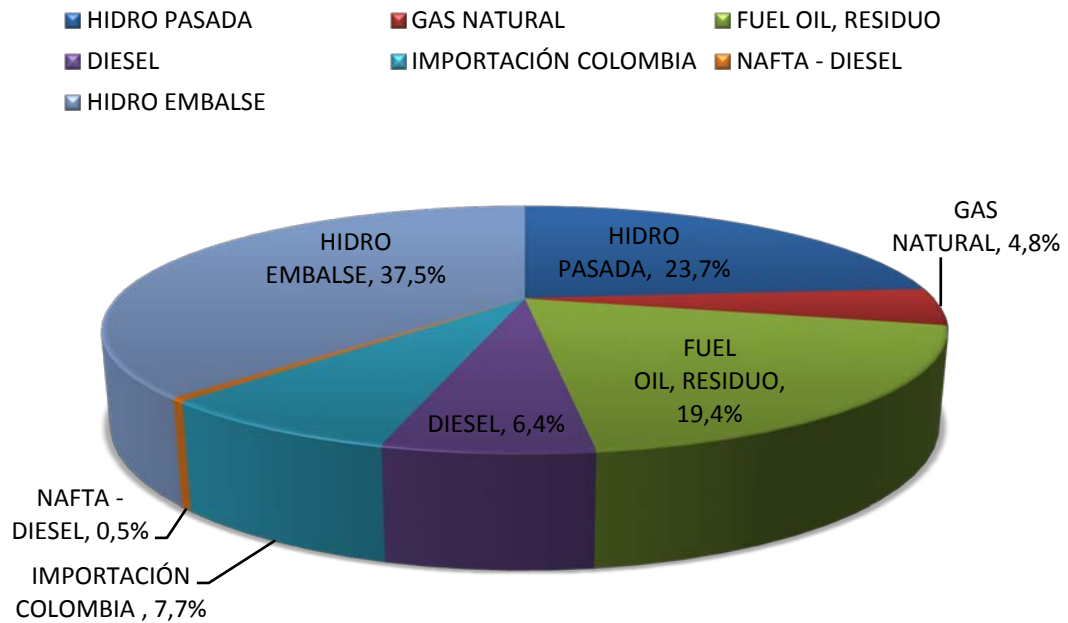


Figura 1.2.4 Esquema Porcentual de la Generación Bruta

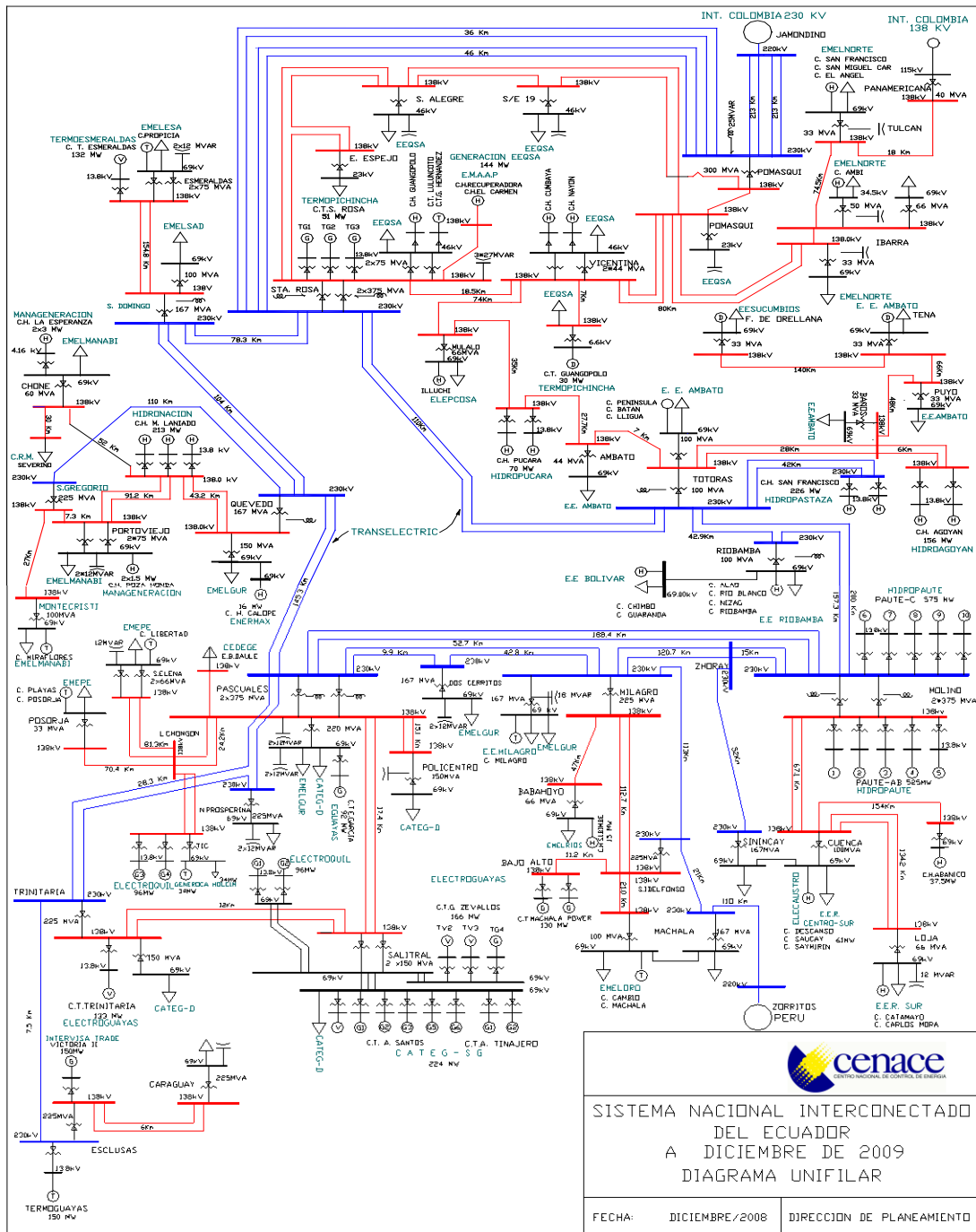
Fuente: CONELEC

1.2.5 Ubicación de la Central TERMOGUAYAS GENERATION S.A. en la Red del Sistema Nacional Interconectado.

Ecuador tiene variedad en sus líneas de transmisión dependiendo de las características y longitud de estas, en la figura 1.2.5 se muestra la conexión y valores de las líneas de transmisión que existe actualmente en la República del Ecuador.

SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO DEL ECUADOR

DIAGRAMA UNIFILAR-CONFIGURACIÓN DICIEMBRE DE 2009



Fuente: CENACE

1.2.6 Categorización de la Generación en función de sus costos.

La carga en un cierto instante puede suministrarse en una manera variada, la asignación de unidades y su salida de potencia activa y reactiva es un problema conocido como Despacho óptimo. En esta parte se describe el problema básico del despacho de generación, con el objetivo de minimizar los costos de producción.

La carga base la integran los generadores que operan a un 100% de su capacidad sobre una base de 24 horas. Los generadores intermedios o controlables están conectados al sistema durante casi todo este periodo de tiempo, pero no necesariamente a plena carga. Las unidades de pico son mantenidas y conectadas en el sistema únicamente durante unas pocas horas todos los días. La capacidad de reserva que se requiere para enfrentar situaciones de emergencia (incrementos de carga no previstos o salidas repentinas de generación) es entregada por generadores que trabajan con una capacidad menor a la nominal. A continuación, se describe el tipo de unidades de generación que cubren cada una de los bloques de demanda de la curva horaria.

Unidades de Carga Base. Las grandes unidades generadoras termoeléctricas basadas en carbón y combustible fósil típicamente caen dentro de esta categoría estas normalmente se mantienen en puntos de operación constantes.

Unidades Intermedias. Cuando la salida de potencia debe regularse, las turbinas hidráulicas son la selección más convenientes. La potencia de salida de un generador hidroeléctrico se controla simplemente cambiando el flujo de agua a través de la turbina. No todos los sistemas eléctricos cuentan con este recurso y deben usar unidades termoeléctricas. Debido a las constantes de tiempo del sistema térmico, normalmente es necesario regular tales unidades a sus valores especificados, es decir, a los valores máximos expresados en Mw/minuto a los cuales el nivel de potencia puede cambiarse.

Unidades Pico. Generadores con turbinas de gas pueden tomar carga muy rápidamente y son usadas para propósitos de satisfacer los incrementos rápidos de demanda que ocurren durante el periodo de carga pico.

Sin embargo, estas unidades tienen costos de producción mayores y son de relativa baja capacidad, de modo que no son usadas durante los periodos de carga intermedia, media o base.

Además, los hidrogenadores son una excelente opción para satisfacer los incrementos de carga durante el periodo pico.

Unidades de Reserva. El margen requerido de generación puede consistir de generadores que tengan sus potencias de salida por debajo de sus nominales, de modo que mantengan una capacidad adicional sincronizada. Adicionalmente, puede considerarse los casos en que unidades generadoras puedan sincronizarse en lapsos de tiempo de algunos minutos (10 por ejemplo).

1.3 EL PROBLEMA DEL DESPACHO Y LA PROGRAMACIÓN

1.3.1 Programación de Unidades

La Programación de unidades es un proceso que se basa en la estimación del costo esperado de producción de un sistema de potencia donde se involucran la decisión de cuáles y que unidades deben entrar en operación, encendidos y apagados en algunos y otros generadores y la cantidad de potencia que deben entregar para una carga determinada a una hora del día, minimizando el costo de operación y sujeto a diversas restricciones operativas.

Una Programación apropiada de unidades puede dar ahorros por consumo de combustibles y costos menores en la operación del sistema de potencia. Debido a que existe una gran variedad de alternativas en la solución, combinaciones y las restricciones asociadas con el arranque – paro de las unidades y el mantenimiento de los generadores que se requieren de técnicas apropiadas para la selección dentro del conjunto de unidades disponibles. Las unidades deben combinarse para satisfacer la demanda de los consumidores, cumplir con el intercambio entre áreas, tener suficiente reserva operativa y un margen adecuado de regulación tales que permitan, en caso de emergencia, responder con prontitud.

Las restricciones en la disponibilidad de combustibles, en el arranque – paro, en el tiempo en el cual toman carga las unidades, y las inherentes al personal que operan las plantas deben ser tomadas en cuenta. Una manera práctica de resolver el problema sería solo asignar el número mínimo de unidades, todas ellas operando a su máxima capacidad pero incurriendo en los riesgos de no cumplir con los márgenes de seguridad establecidos. Otra forma es mantener un número mayor de unidades operando a su mínima capacidad, con mayor seguridad pero evitando cumplir con la minimización de costos. Para plantear una solución al problema de asignación de unidades es preciso e indispensable tener un pronóstico de demanda durante el período de tiempo en el cual se pretende hacer la asignación de unidades.

1.3.2 Pre despacho Económico

La función pre despacho consiste en determinar un PLAN DE OPERACIÓN para las plantas del Sistema Nacional Interconectado. Este plan indica el nivel de potencia en que se deberán despachar las plantas, es decir, indica la manera en que se deberá asignar la generación en cada hora del día siguiente para cubrir la demanda pronosticada del sistema.

1.3.3 Despacho Económico

- Es uno de los problemas fundamentales de la operación de un sistema de energía eléctrica.
- Consiste en repartir la demanda total del sistema entre los generadores disponibles, de forma que el costo total de generación sea el mínimo.
- El costo de generación es variable debido a que las centrales convierten el combustible en energía eléctrica con eficiencias que van desde los 14 a 17 Kwh/gln, estas eficiencias dependen de la calidad del combustible así como el tiempo de trabajo del equipo (envejecimiento).

- En la operación de un sistema de energía eléctrica hay que considerar, además del Despacho Económico, la opción de acoplar o desacoplar grupos de generación según la variación de la demanda.
- Los costos fijos de una central pueden ser comparativamente altos, por lo que no es económico operar a un nivel de producción bajo. Es preferible desacoplar ciertas centrales cuando hay poca demanda.

El Despacho Económico es satisfacer la demanda de energía al mínimo costo de producción, en todas las unidades que se encuentren dentro de un sistema eléctrico de potencia. El despacho económico considera dos tipos de restricciones, restricciones del sistema y restricciones de las unidades.

La principal restricción del sistema es que en las líneas de transmisión el flujo de potencia sea menor o igual al flujo establecido por estudios de estabilidad angular, caída de tensión, ampacidad y pérdidas.

Las restricciones de las unidades que vamos a considerar son básicamente tres.

La 1ª de ellas es que la unidad generadora este operando dentro de sus límites establecidos por el fabricante.

$$P_{i_{min}} \leq P_i \leq P_{i_{max}}$$

La 2ª es considerar su rampa de incremento es decir que de una hora a la siguiente incremente la potencia, de incremento establecido por el productor.

$$P_{i_{t-1}} - P_i \leq P_{i_{incremento}}$$

La 3ª es que considere su rampa de decremento en la cual la unidad no puede reducir de su potencia máxima a la mínima por lo que debe considerar el decremento de potencia establecido por el Fabricante.

$$P_{i_{t-1}} - P_i \leq P_{i_{decremento}}$$

1.3.4 Característica de un Despacho Económico

Es necesario para una Operación Económica, satisfacer la demanda con una combinación apropiada de generadores considerando la disponibilidad de estos, las restricciones operativas del sistema y los costos de producción.

El plan de Operación propuesto debe tener como objetivos principales la minimización de costos de operación y la factibilidad de su relación en la práctica cuidando los siguientes aspectos para asegurar una operación confiable y económica del sistema eléctrico:

- Satisfacer la demanda al costo mínimo.
- Mantener reserva de capacidad en grupos de plantas.
- Vigilar los límites de generación en grupos de plantas.
- Considerar las licencias de unidades generadoras.
- Respetar tiempos mínimos de operación y paro.

CAPÍTULO II

APLICACIÓN AL PROBLEMA DEL DESPACHO ECONÓMICO EN LA CENTRAL TÉRMICA TERMOGUAYAS GENERATION S.A.

2.1 Datos de las Barcazas para el Análisis.

Cada Barcaza posee Flujómetros estacionarios donde es medido el combustible en unidades de litros, también cada Unidad Generadora posee un Medidor de Energía en unidades de Kwh, con estos dos equipos y los procedimientos operacionales establecidos de arranques, paradas, e incrementos de carga, se adquieren las Curvas de Consumo Específico en distintos estados de Carga.

Para el procedimiento de las **Curvas de Costo Incremental y Eficiencia** se considera el tipo de Combustible (Búnker), el precio del combustible y las características del mismo, como son:

- Poder Calorífico.
- Densidad.
- Generación de las Unidades.

2.1.1 Sistema de Combustible de la Central TERMOGUAYAS GENERATION S.A. a las Unidades Generadoras.

En la Fig. 2.1.1 se muestra el Sistema de Combustible de la Central comenzando desde la Recepción del Combustible (Buque Tanquero) a Tanques de Almacenamientos ubicados en la Costa, desde estos tanques el combustible es despachado a cada una de las Barcazas, a su vez las Barcazas poseen tanques de Almacenamiento, Sedimentación y Diario que cumplen un tratamiento específico para el combustible como son los asentamientos de partículas, incrementación de temperatura y purificación, a través de Sistemas Auxiliares como las Purificadoras de Combustible (Separación Centrifuga de partículas pequeñas halladas en el Combustible) el cual separa las partículas muy pequeñas e incrementa la temperatura. Las Barcazas poseen contadores o Flujómetros esto en beneficio de saber cuánto fue el consumo durante un determinado tiempo. Las Unidades Boosters son las encargadas de repartir el combustible a una presión, temperatura y viscosidad constantes. Como se observa en la Figura 2.1.1 el Sistema de Combustible es de Ciclo Cerrado ya que el combustible que se entrega a las máquinas no es consumido en su totalidad.

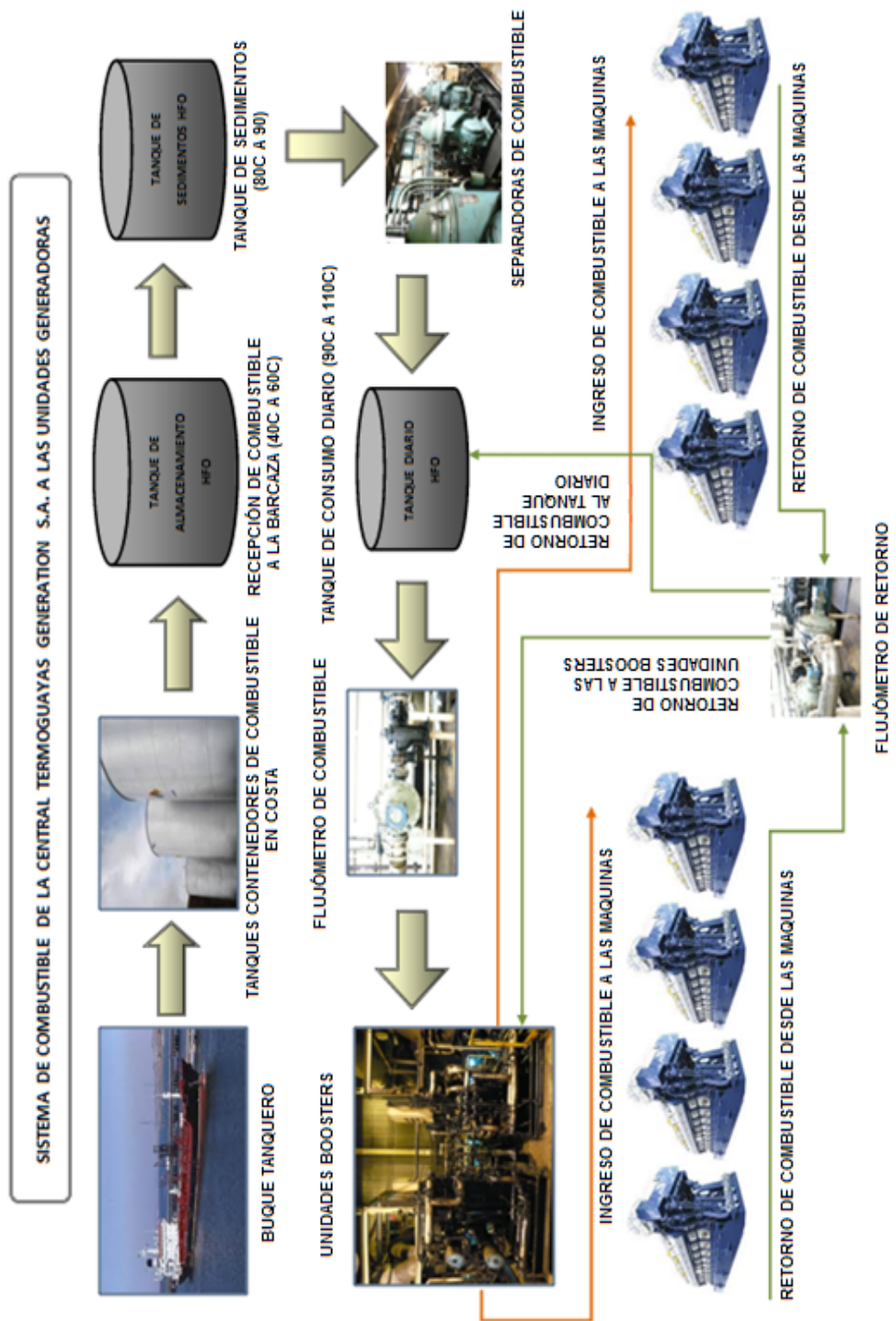


Fig. 2.1.1 Sistema de Combustible

Fuente: Por los Autores

2.1.2 Información del Fabricante

De acuerdo a las condiciones de ambientes dadas por la Normas ISO 3046/1, el valor del poder calorífico del combustible es 42700 KJ/Kg a una velocidad constante en la máquina. Las tablas 2.1.2 A y 2.1.2 B se exponen los datos de los Fabricantes, mientras que en la Figura 2.1.2 muestra las Curvas dispuestas con las respectivas tablas.

Datos del consumo Específico por el Fabricante Wartsila:

Carga (%)	Consumo Específico (g/Kwh)	Potencia KW
100	192	4145
85	194	3523
75	197	3108,75
50	201	2072,5

Tabla 2.1.2 A

Fuente: Fabricante Wartsila

Datos del consumo Específico por el Fabricante Caterpillar:

Carga (%)	Consumo Específico (g/Kwh)	Potencia KW
100	196,6	4605
90	195,9	4145
70	197	3226
50	202,9	2307
25	226,9	1153

Tabla 2.1.2 B

Fuente: Fabricante Caterpillar

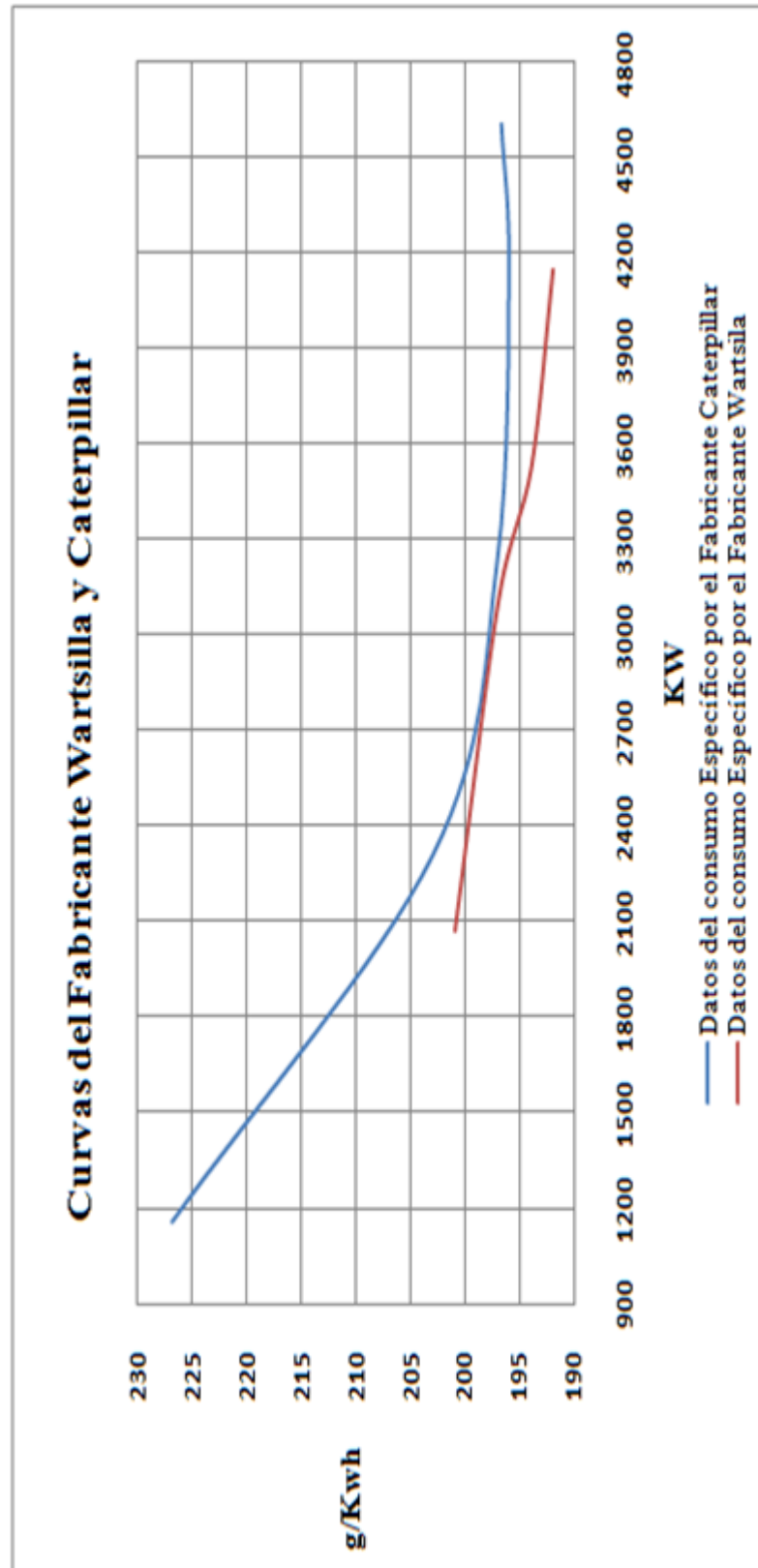


Fig. 2.1.2 Curva del Fabricante Wartsila y Caterpillar

Fuente: Wartsila y Caterpillar

2.2 Cálculo de las Curvas de Consumo Específico en las Unidades Boosters.

Para el tratamiento de las Curvas Obtenidas del Consumo Específico se recepta los datos de combustible vs Kw en lapsos de tiempo. A continuación se plantea la fórmula de carácter general para encontrar los resultados en cada estado de carga.

Ecuación 2.2,

$$BE = \frac{(M - S \times MLS) \times 3600}{P \times S} \quad (g/Kwh)$$

Donde,

BE = Consumo de combustible durante la prueba (g/Kwh).

M = Cantidad de Combustible medido (g).

MLS = Liqueos de Combustible limpio por segundo (g/s).

P = Potencia de salida (Kw).

S = Tiempo (s).

Desarrollo de la Tabla 2.2 A

DATOS OBTENIDOS DE BARCAZA 1. BOOSTER 1 CON UNA MÁQUINA EN SERVICIO

Carga %	Combustible	Kw	Masa de Combustible Medido (g)	Liqueos de Combustible Limpio (g/s)	Tiempo de Medición (s)	Consumo Específico (g/Kwh)
85	HFO	3523	60000	0,5	292	209,46

Tabla 2.2 A Datos de Barcaza 1 Booster 1

Fuente: Los Autores

Aplicando la ecuación se obtendrá:

$$BE = \frac{(60000 - 292 \times 0,5) \times 3600}{3523 \times 292} = 209,46 \text{ g/Kwh}$$

El análisis de la tabla 2.2 A se deberá tomar en cuenta para los futuros cálculos en los diferentes escenarios de carga para así establecer la Curva de Consumo Específico.

OBTENCIÓN DE LOS PUNTOS PARA EL DESARROLLO DE LAS CURVAS DE CONSUMO ESPECÍFICO, COSTO INCREMENTAL Y EFICIENCIA DE LAS UNIDADES BOOSTERS.

1.- Datos Obtenidos De Barcaza 1. Booster 1 Con Cuatro Máquinas En Servicio

Estados de carga Kw	Combustible	Litros medidos	Masa de Combustible Medido (g)	Liqueos de Combustible Limpio (g/s)	Tiempo de Medición (s)
8400	HFO	710	699632,77	0,5	300
10000	HFO	838	825535,33	0,5	300
12000	HFO	994	979559,8	0,5	300
13200	HFO	1086	1070174,23	0,5	300
14000	HFO	1147	1129829,71	0,5	300

Tabla 2.2 B Datos de Barcaza 1 Booster 1

Fuente: Los Autores

2.- Especificaciones y Costo del Combustible durante las mediciones.

Durante las mediciones hechas en las Unidades Booster de la Central **TERMOGUAYAS GENERATION S.A.** el combustible presentaba las siguientes características:

Densidad: 985 Kg/m³.

Poder Calorífico: 40650 KJ/Kg.

Costo por Galón: 0,44 ctvs. \$.

3.- Metodología utilizando los datos de la tabla 2.2 B para el primer estado de carga

Cálculo para encontrar la masa del combustible

$$M = 710 \text{ lts} * 985 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * \frac{\text{m}^3}{1000 \text{ lts}} = \mathbf{699,63277 \text{ Kg}}$$

Cálculo para encontrar el consumo específico

$$BE = \frac{(M - S \times MLS) \times 3600}{P \times S} \quad (\text{g/Kwh})$$

$$BE = \frac{(699632,77 - 300 \times 0,5) \times 3600}{8400 \times 300} = \mathbf{999,2611 \text{ g/Kwh}}$$

Cálculo para encontrar el poder calorífico

$$40650 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} * 0,9992611 \frac{\text{Kg}}{\text{Kwh}} = \mathbf{40619,965 \text{ KJ/Kwh}}$$

Cálculo para encontrar el Costo Incremental

$$0,9992611 \frac{\text{Kg}}{\text{Kwh}} * \frac{\text{m}^3}{985 \text{ Kg}} * 1000 \frac{\text{lts}}{\text{m}^3} * \frac{\text{gln}}{3,785 \text{ lts}} * 0,44 \frac{\text{ctvs. \$}}{\text{gln}}$$
$$= \mathbf{11,793142 \frac{\text{ctvs. \$}}{\text{Kwh}}}$$

Cálculo para encontrar la Eficiencia

$$\frac{8400}{4} \text{ Kw} * 0,9992611 \frac{\text{Kg}}{\text{Kwh}} = \mathbf{2098,4483 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}}$$

$$985 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * \frac{\text{h}}{2098,4483 \text{ Kg}} * \frac{\text{m}^3}{1000 \text{ lts}} * \frac{3,785 \text{ lts}}{\text{gln}} * 8400 \text{ Kw}$$

$$= \mathbf{14,923927 \text{ Kwh/gln}}$$

4.- TABLA DE RESULTADO

En la Tabla 2.2 C se exponen los resultados de las mediciones en los diferentes estados de carga.

B1. Curva de Unidad Booster 1 (E1, E2, E3, E4)						
Características del Combustible: 40650 KJ/Kg con 985Kg/m3						
Margen de error 1%						
Potencia	Consumo Específico	Poder Calorífico	Costo Incremental	Masa Consumida	Eficiencia	
Kw	g/Kwh	KJ/Kwh	ctvs.\$/Kwh	Kg/h	Kwh/gln	
8400	999,2611	40619,965	11,793	2098,44	14,923	
10000	990,4624	40262,300	11,689	2476,15	15,056	
12000	979,4098	39981,301	11,558	2938,22	15,223	
13200	972,7493	39542,260	11,480	3210,07	15,330	
14000	968,2969	39361,269	11,427	3389,03	15,401	

Tabla 2.2 C Obtención de los Puntos para el Desarrollo de las Curvas

Fuente: Los Autores

A continuación se presentan los gráficos que se obtienen de la Tabla 2.2 C:

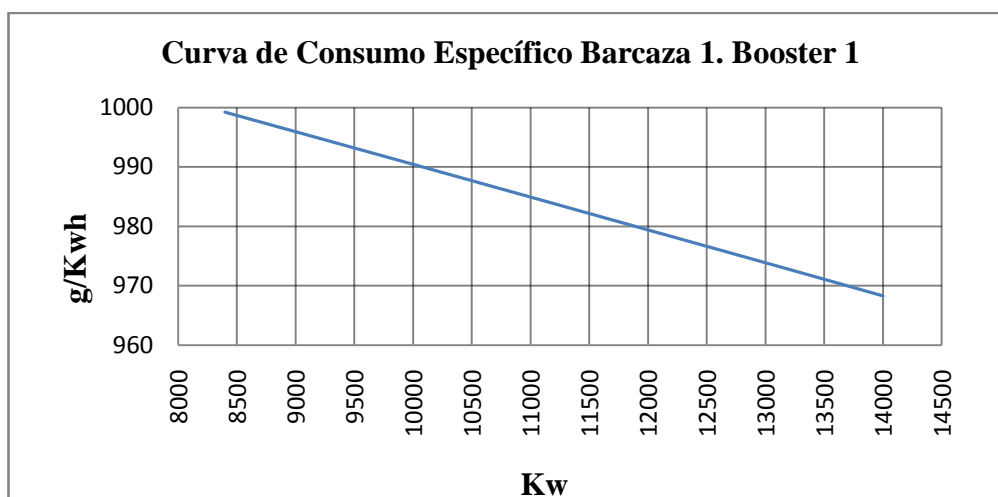


Fig. 2.2 A Curva de Consumo Específico en Barcaza 1 Booster 1.

Fuente: Los Autores

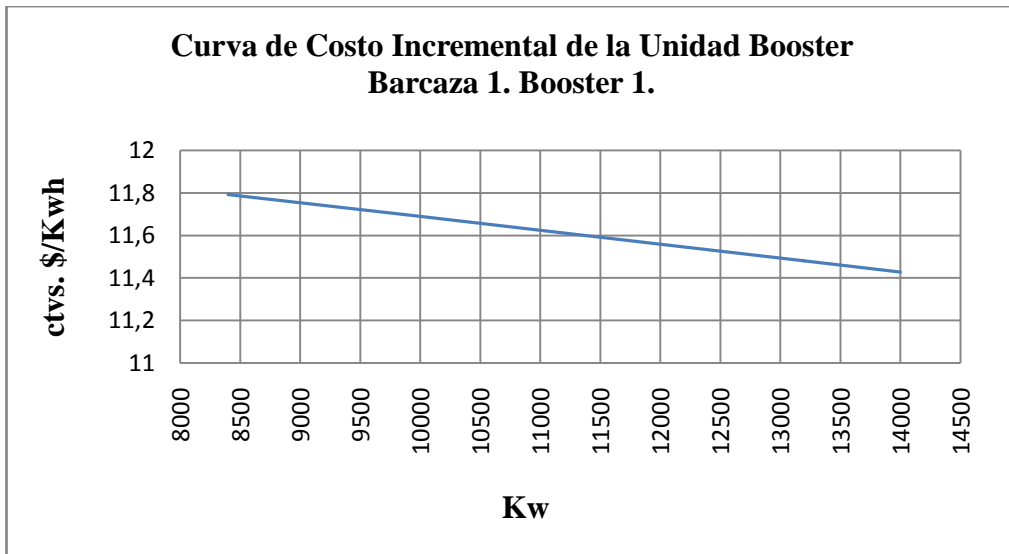


Fig. 2.2 B Curva de Costo Incremental en Barcaza 1 Booster 1.

Fuente: Los Autores

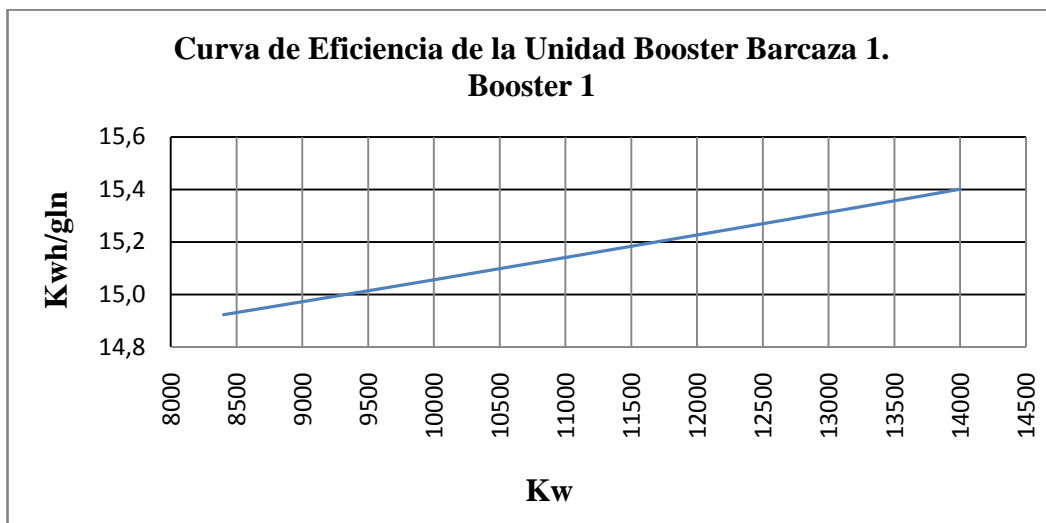


Fig. 2.2 C Curva de Eficiencia en Barcaza 1 Booster 1.

Fuente: Los Autores

2.3 Tablas de Resultados en distintos Escenarios de Carga en las Unidades Boosters WARTSILA Y CATERPILLAR.

Barcaza 1. Curva de Unidad Booster 1 (E1, E2, E3, E4)				Wartsila	
Características del Combustible: 40650 KJ/Kg con 985Kg/m3					
Margen de error 1%					
Potencia	Consumo Específico	Poder Calorífico	Costo Incremental	Masa Consumida	Eficiencia
Kw	g/Kwh	KJ/Kwh	ctvs.\$/Kwh	Kg/h	Kwh/gln
8400	999,2611	40619,965	11,793	2098,44	14,923
10000	990,4624	40262,300	11,689	2476,15	15,056
12000	979,4098	39981,301	11,558	2938,22	15,226
13200	972,7493	39542,260	11,480	3210,07	15,330
14000	968,2969	39361,269	11,427	3389,03	15,401

Tabla A Datos Obtenidos en los Diferentes Estados de Carga
Fuente: Los Autores

Barcaza 1. Curva de Unidad Booster 2 (E5, E6, E7, E8)				Wartsila	
Características del Combustible: 40650 KJ/Kg con 985Kg/m3					
Margen de error 1%					
Potencia	Consumo Específico	Poder Calorífico	Costo Incremental	Masa Consumida	Eficiencia
Kw	g/Kwh	KJ/Kwh	ctvs.\$/Kwh	Kg/h	Kwh/gln
8400	1049,2241	42650,963	12,382	2203,37	14,213
10000	1039,9856	42275,414	12,273	2599,96	14,339
12000	1028,3803	41803,663	12,136	3085,14	14,501
13200	1021,3867	41519,373	12,054	3370,57	14,600
14000	1016,7117	41329,334	11,999	3558,49	14,667
14700	1006,0506	40695,300	11,815014	3697,23	14,823

Tabla B Datos Obtenidos en los Diferentes Estados de Carga
Fuente: Los Autores

Barcaza 3. Curva de Unidad Booster 1 (E1, E2, E3, E4)					Wartsila	
Características del Combustible: 40650 KJ/Kg con 985Kg/m3						
Margen de error 1%						
Potencia	Consumo Específico	Poder Calorífico	Costo Incremental	Masa Consumida	Eficiencia	
Kw	g/Kwh	KJ/Kwh	ctvs.\$/Kwh	Kg/h	Kwh/gln	
8400	980,7174	39866,164	11,5742	2059,506	15,20611	
10000	977,5079	39735,697	11,5364	2443,769	15,25604	
12000	972,1819	39519,195	11,4735	2916,545	15,33961	
13200	968,2854	39360,804	11,4275	3195,342	15,40134	
14000	965,3958	39243,339	11,3934	3378,885	15,44744	

Tabla C Datos Obtenidos en los Diferentes Estados de Carga
Fuente: Los Autores

Barcaza 3. Curva de Unidad Booster 2 (E5, E6, E7, E8)					Wartsila	
Características del Combustible: 40650 KJ/Kg con 985Kg/m3						
Margen de error 1%						
Potencia	Consumo Específico	Poder Calorífico	Costo Incremental	Masa Consumida	Eficiencia	
Kw	g/Kwh	KJ/Kwh	ctvs.\$/Kwh	Kg/h	Kwh/gln	
8400	1038,8358	42228,675	12,260197	2181,555	14,35539	
10000	1029,68868	41856,844	12,152244	2574,221	14,482921	
12000	1018,1802	41389,025	12,016423	3054,540	14,646621	
13200	1011,274	41108,288	11,934917	3337,204	14,746646	
14000	1006,64532	40920,132	11,880289	3523,258	14,814453	
14700	996,086097	40490,899	11,755671	3660,616	14,971497	

Tabla D Datos Obtenidos en los Diferentes Estados de Carga
Fuente: Los Autores

Barcaza 4. Curva de Unidad Booster 1 (E1, E2, E3)				Caterpillar	
Características del Combustible: 40650 KJ/Kg con 985Kg/m3					
Margen de error 1%					
Potencia	Consumo Específico	Poder Calorífico	Costo Incremental	Masa Consumida	Eficiencia
Kw	g/Kwh	KJ/Kwh	ctvs.\$/Kwh	Kg/h	Kwh/gln
3600	780,0105	31707,429	9,2055769	936,01267	14,33913
5100	734,3252	29850,319	8,6664052	1248,3528	15,23122
6600	704,0736	28620,593	8,30938004	1548,9619	15,88566
8100	686,1613	27892,460	8,0979815	1852,6357	16,30035
9000	680,0495	27644,014	8,0258509	2040,14862	16,44685
9900	676,5974	27503,685	7,9851096	2232,7714	16,53076

Tabla E Datos Obtenidos en los Diferentes Estados de Carga
Fuente: Los Autores

Barcaza 4. Curva de Unidad Booster 2 (E4, E5, E6)				Caterpillar	
Características del Combustible: 40650 KJ/Kg con 985Kg/m3					
Margen de error 1%					
Potencia	Consumo Específico	Poder Calorífico	Costo Incremental	Masa Consumida	Eficiencia
Kw	g/Kwh	KJ/Kwh	ctvs.\$/Kwh	Kg/h	Kwh/gln
3600	773,8222	31455,873	9,1325434	928,5866	14,453805
5100	729,0055	29634,073	8,6036229	1239,3093	15,342374
6600	699,2514	28424,570	8,2524690	1538,3531	15,995212
8100	681,5837	27706,379	8,0439573	1840,2761	16,409832
9000	675,5464	27460,964	7,9727059	2026,6394	16,556485
9900	672,1459	27322,734	7,9325737	2218,0817	16,640247

Tabla F Datos Obtenidos en los Diferentes Estados de Carga
Fuente: Los Autores

Barcaza 4. Curva de Unidad Booster 3 (E7, E8, E9)					Caterpillar
Características del Combustible: 40650 KJ/Kg con 985Kg/m ³					
Margen de error 1%					
Potencia	Consumo Específico	Poder Calorífico	Costo Incremental	Masa Consumida	Eficiencia
Kw	g/Kwh	KJ/Kwh	ctvs.\$/Kwh	Kg/h	Kwh/gln
3600	772,9205	31419,221	9,1219026	927,50469	14,470665
5100	729,2312	29643,249	8,60628706	1239,6931	15,337624
6600	699,9355	28452,379	8,2605431	1539,8581	15,979579
8100	682,24802	27733,382	8,0517976	1842,0696	16,393855
9000	676,0487	27481,380	7,9786342	2028,1461	16,544185
9900	672,4239	27334,034	7,9358553	2218,99907	16,633367

Tabla G Datos Obtenidos en los Diferentes Estados de Carga
Fuente: Los Autores

Barcaza 4. Curva de Unidad Booster 4 (E10, E11, E12, E12A)					Caterpillar
Características del Combustible: 40650 KJ/Kg con 985Kg/m ³					
Margen de error 1%					
Potencia	Consumo Específico	Poder Calorífico	Costo Incremental	Masa Consumida	Eficiencia
Kw	g/Kwh	KJ/Kwh	ctvs.\$/Kwh	Kg/h	Kwh/gln
4800	1030,8104	41902,446	12,165482	1236,9725	14,467160
6800	973,48805	39572,289	11,488972	1654,9296	15,319038
8800	934,95293	38005,836	11,034186	2056,8964	15,950429
10800	911,67178	37059,458	10,759425	2461,5138	16,357751
12000	903,55513	36729,516	10,663633	2710,6654	16,504692
13200	898,89472	36540,070	10,608632	2966,3525	16,590263

Tabla H Datos Obtenidos en los Diferentes Estados de Carga
Fuente: Los Autores

Barcaza 5. Curva de Unidad Booster 1 (E1, E2, E3)				Caterpillar	
Características del Combustible: 40650 KJ/Kg con 985Kg/m3					
Margen de error 1%					
Potencia	Consumo Específico	Poder Calorífico	Costo Incremental	Masa Consumida	Eficiencia
Kw	g/Kwh	KJ/Kwh	ctvs.\$/Kwh	Kg/h	Kwh/gln
3600	778,0682	31628,472	9,18265	933,681816	14,374929
5100	733,7825	29828,258	8,6600004	1247,43025	15,242492
6600	704,3706	28632,664	8,312885	1549,61532	15,878963
8100	686,9079	27922,806	8,1067928	1854,65133	16,282641
9000	680,9494	27680,593	8,0364714	2042,8482	16,425119
9900	677,6081	27544,769	7,9970378	2236,10673	16,506111

Tabla I Datos Obtenidos en los Diferentes Estados de Carga

Fuente: Los Autores

Barcaza 5. Curva de Unidad Booster 2 (E4, E5, E6)				Caterpillar	
Características del Combustible: 40650 KJ/Kg con 985Kg/m3					
Margen de error 1%					
Potencia	Consumo Específico	Poder Calorífico	Costo Incremental	Masa Consumida	Eficiencia
Kw	g/Kwh	KJ/Kwh	ctvs.\$/Kwh	Kg/h	Kwh/gln
3600	779,5703	31689,536	9,2003817	935,48444	14,347229
5100	735,3985	29893,949	8,6790722	1250,1774	15,208999
6600	705,0831	28661,629	8,321294	1551,1828	15,862916
8100	686,1759	27893,053	8,0981538	1852,67509	16,300009
9000	679,2891	27613,104	8,0168767	2037,86739	16,465264
9900	675,09907	27442,777	7,9674266	2227,8268	16,567457

Tabla J Datos Obtenidos en los Diferentes Estados de Carga

Fuente: Los Autores

Barcaza 5. Curva de Unidad Booster 3 (E7, E8, E9)					Caterpillar
Características del Combustible: 40650 KJ/Kg con 985Kg/m3					
Margen de error 1%					
Potencia	Consumo Específico	Poder Calorífico	Costo Incremental	Masa Consumida	Eficiencia
Kw	g/Kwh	KJ/Kwh	ctvs.\$/Kwh	Kg/h	Kwh/gln
3600	780,5733	31730,304	9,212219	936,68796	14,328795
5100	734,8086	29869,970	8,6721102	1249,17462	15,221208
6600	704,2554	28627,984	8,3115256	1549,36188	15,88156
8100	685,9438	27883,617	8,0954146	1852,04799	16,305529
9000	679,5973	27625,630	8,0205141	2038,7916	16,4578
9900	675,94702	27447,246	7,977434	2230,62444	16,546679

Tabla K Datos Obtenidos en los Diferentes Estados de Carga

Fuente: Los Autores

Barcaza 5. Curva de Unidad Booster 4 (E10, E11, E12, E12A)					Caterpillar
Características del Combustible: 40650 KJ/Kg con 985Kg/m3					
Margen de error 1%					
Potencia	Consumo Específico	Poder Calorífico	Costo Incremental	Masa Consumida	Eficiencia
Kw	g/Kwh	KJ/Kwh	ctvs.\$/Kwh	Kg/h	Kwh/gln
4800	1042,0789	42360,508	12,298477	1250,4947	14,310720
6800	981,75739	39908,437	11,586566	1668,98758	15,190005
8800	941,356408	38266,138	11,109759	2070,98408	15,841927
10800	917,137075	37281,622	10,823926	2476,27012	16,260273
12000	908,81728	36943,422	10,725736	2726,45184	16,409129
13200	904,16928	36754,481	10,670881	2983,75862	16,493482

Tabla L Datos Obtenidos en los Diferentes Estados de Carga

Fuente: Los Autores

2.4 Curvas Obtenidas de Costo Incremental en las Unidades Boosters WARTSILA y CATERPILLAR.

En la Fig. 2.4 A se presentan las Curvas de Costo Incremental de las Unidades Boosters.

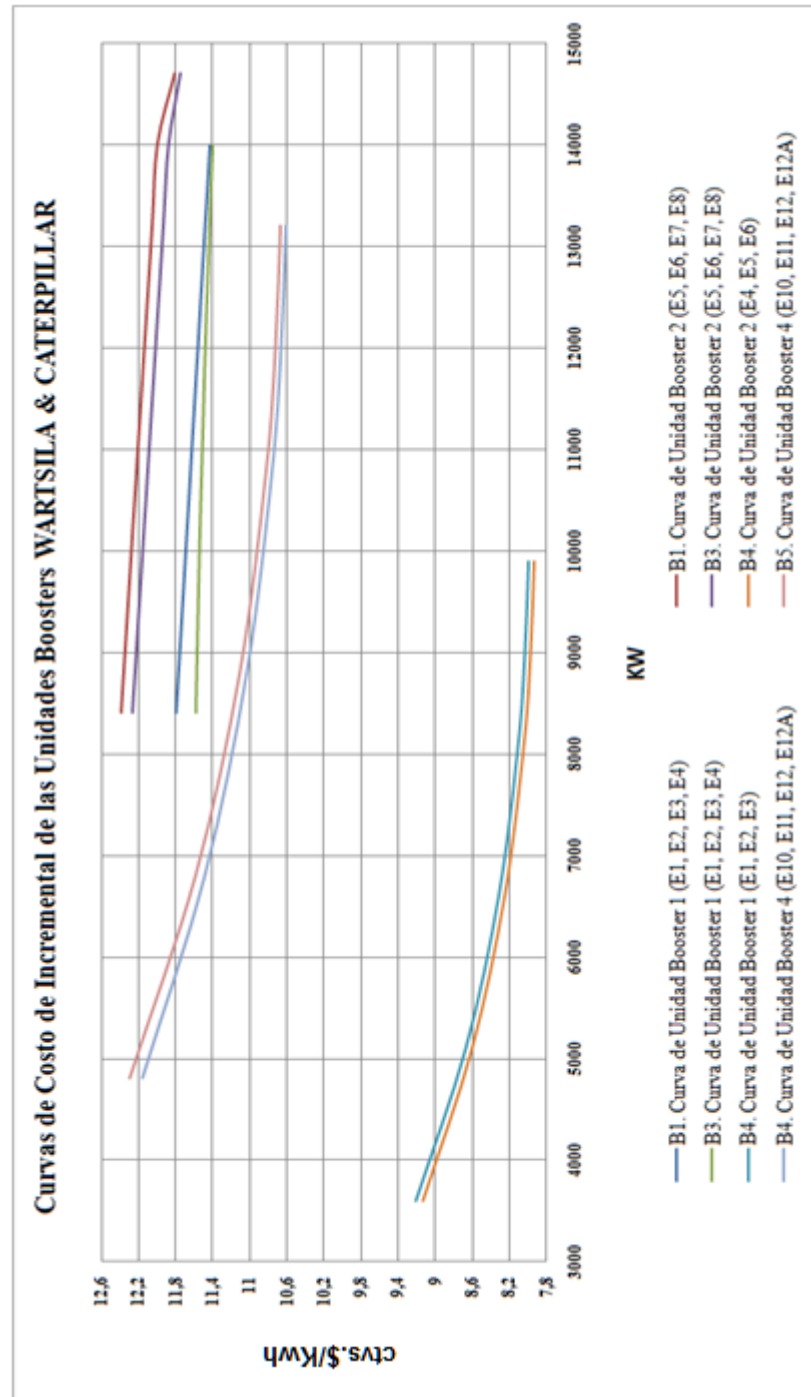


Fig. 2.4 A Curvas Obtenidas de Costo Incremental de las Unidades Boosters

Fuente: Los Autores

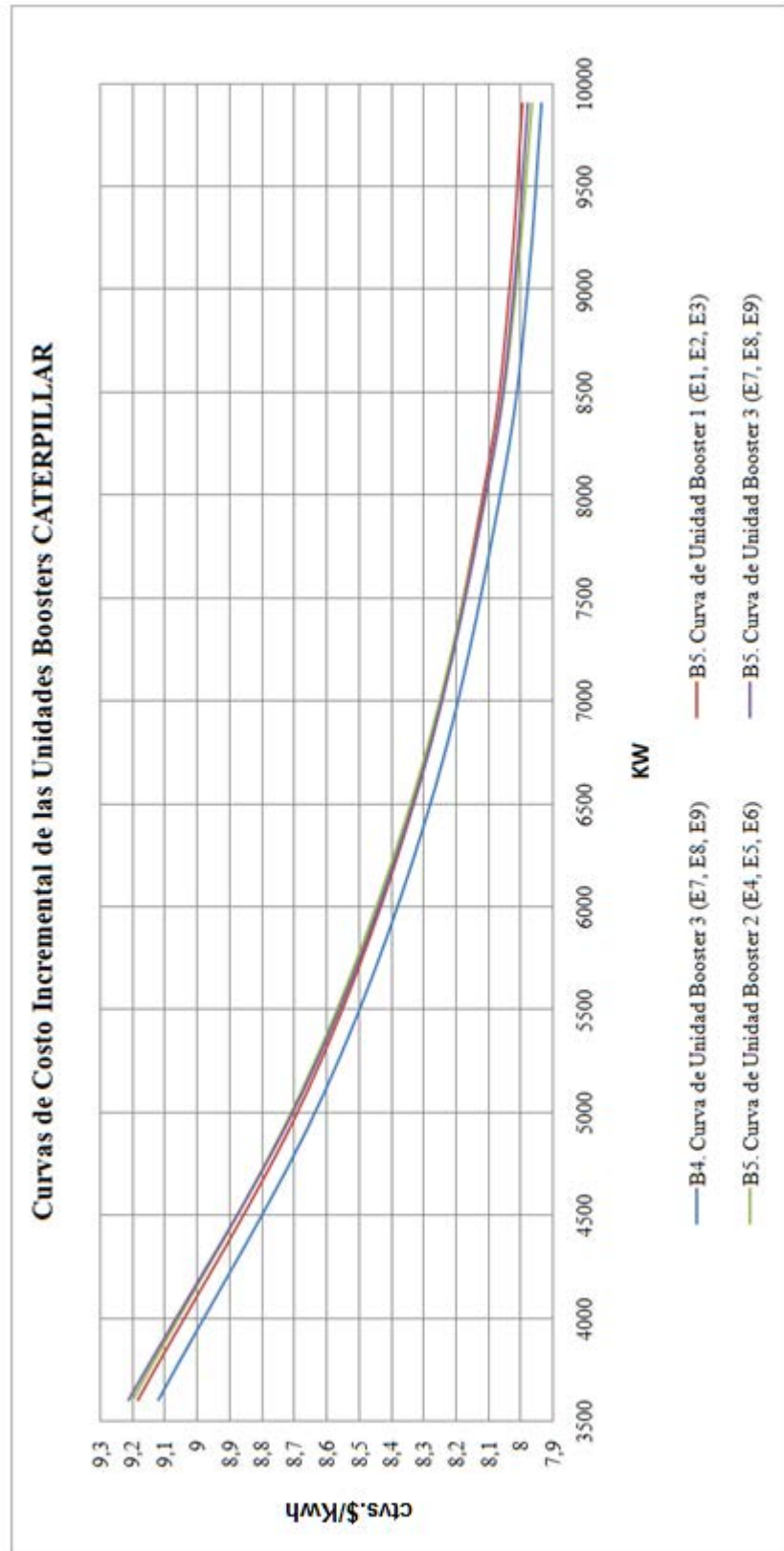


Fig. 2.4 B Curvas Obtenidas de Costo Incremental de las Unidades Boosters

Fuente: Los Autores

2.5 Obtención de los Polinomios de Costo Incremental en las Unidades Boosters WARTSILA y CATERPILLAR.

Para la obtención de los Polinomios del Costo Incremental en las Unidades Booster se emplea el Método de Mínimos Cuadrados Ponderados, usando los datos obtenidos en las Tablas de Resultados se calculan los coeficientes que conformarán el Polinomio.

Desarrollo para el cálculo de los Coeficientes que conforman el Polinomio de Costo Incremental.

1. Datos de la Tabla H.

Barcaza 4. Curva de Unidad Booster 1 (E1, E2, E3)				Caterpillar	
Características del Combustible: 40650 KJ/Kg con 985Kg/m3					
Margen de error 1%					
Potencia	Consumo Específico	Poder Calorífico	Costo Incremental	Masa Consumida	Eficiencia
Kw	g/Kwh	KJ/Kwh	ctvs.\$/Kwh	Kg/h	Kwh/gln
3600	780,0105	31707,429	9,2055769	936,01267	14,339132
6600	704,0736	28620,593	8,30938004	1548,9619	15,885661
9000	680,0495	27644,014	8,0258509	2040,14862	16,446853
9900	676,5974	27503,685	7,9851096	2232,7714	16,530768

Tabla H. Datos Obtenidos en los Diferentes Estados de Carga.

Fuente: Los Autores

2. Fórmula General del Método de Mínimos Cuadrados.

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \frac{1}{g_i^3} & \sum_{i=1}^n \frac{1}{g_i^2} & \sum_{i=1}^n \frac{1}{g_i} & n \\ \sum_{i=1}^n \frac{1}{g_i^2} & \sum_{i=1}^n \frac{1}{g_i} & n & \sum_{i=1}^n g_i \\ \sum_{i=1}^n \frac{1}{g_i} & n & \sum_{i=1}^n g_i & \sum_{i=1}^n g_i^2 \\ n & \sum_{i=1}^n g_i & \sum_{i=1}^n g_i^2 & \sum_{i=1}^n g_i^3 \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{g_i^3} \\ \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{g_i^2} \\ \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{g_i} \\ \sum_{i=1}^n q_i \end{bmatrix}$$

3. Encontrando las variables para el cálculo de los coeficientes del Polinomio.

$$\sum \frac{1}{g_i^3} = \frac{1}{3600^3} + \frac{1}{6600^3} + \frac{1}{9000^3} + \frac{1}{9900^3} = 2,731413E - 11$$

$$\sum \frac{1}{g_i^2} = \frac{1}{3600^2} + \frac{1}{6600^2} + \frac{1}{9000^2} + \frac{1}{9900^2} = 1,22666E - 7$$

$$\sum \frac{1}{g_i} = \frac{1}{3600} + \frac{1}{6600} + \frac{1}{9000} + \frac{1}{9900} = 6,414141E - 4$$

$$\sum g_i^3 = 3600^3 + 6600^3 + 9000^3 + 9900^3 = 2,033451E12$$

$$\sum g_i^2 = 3600^2 + 6600^2 + 9000^2 + 9900^2 = 235530000$$

$$\sum g_i = 3600 + 6600 + 9000 + 9900 = 29100$$

$$\sum \frac{q_i}{g_i^3} = \frac{9,2055769}{3600^3} + \frac{8,30938}{6600^3} + \frac{8,0258509}{9000^3} + \frac{7,9851096}{9900^3} = 2,45448E - 10$$

$$\sum \frac{q_i}{g_i^2} = \frac{9,2055769}{3600^2} + \frac{8,30938}{6600^2} + \frac{8,0258509}{9000^2} + \frac{7,9851096}{9900^2} = 1,081620E - 6$$

$$\sum \frac{q_i}{g_i} = \frac{9,2055769}{3600} + \frac{8,30938}{6600} + \frac{8,0258509}{9000} + \frac{7,9851096}{9900} = 5,5144396E - 3$$

$$\sum q_i = 9,2055769 + 8,30938 + 8,0258509 + 7,9851096 = 33,5259174$$

4. Evaluando la Matriz, se obtiene el siguiente resultado:

$$\lambda = -1.804688E-12 X^3 + 6.809454E-8 X^2 - 8.48416E-4 X + 11.461571$$

Con el Método de Mínimos Cuadrados Ponderados se realizan los cálculos para encontrar los coeficientes de los Polinomios de Costo Incremental en las Unidades Booster.

Polinomios de Costo Incremental en las Unidades Boosters WARTSILA Y CATERPILLAR.

Wartsila Barcaza 1 – Booster 1

$$\lambda = -6,5255493223E-05x + 1,2341596482E+01 \left(\text{ctvs}\$/Kwh \right)$$

Wartsila Barcaza 1 – Booster 2

$$\lambda = -8,0701007582E-05x + 1,3082714475E+01 \left(\text{ctvs}\$/Kwh \right)$$

Wartsila Barcaza 3 – Booster 1

$$\lambda = -3,2271886295E-05x + 1,1852832530E+01 \left(\text{ctvs}\$/Kwh \right)$$

Wartsila Barcaza 3 – Booster 2

$$\lambda = -7,4756331929E-05x + 1,2900770633E+01 \left(\text{ctvs}\$/Kwh \right)$$

Caterpillar Barcaza 4 – Booster 1

$$\lambda = -1.8034736150E-12x^3 + 6.8070216397E-08x^2 - 8.4826561586E-04x + 1.1461286004E+01 \left(\text{ctvs}\$/Kwh \right)$$

Caterpillar Barcaza 4 – Booster 2

$$\lambda = -1.7345750224E-12x^3 + 6.6042744257E-08x^2 - 8.2774238819E-04x + 1.1337430373E+01 \left(\frac{ctvs\$}{Kwh} \right)$$

Caterpillar Barcaza 4 – Booster 3

$$\lambda = -1.6233692914E-12x^3 + 6.2586798786E-08x^2 - 7.9518108882E-04x + 1.1249169527E+01 \left(\frac{ctvs\$}{Kwh} \right)$$

Caterpillar Barcaza 4 – Booster 4

$$\lambda = -8,6873038022E-13x^3 + 4,5437588140E-08x^2 - 7,7678999336E-04x + 1,4943266552E+01 \left(\frac{ctvs\$}{Kwh} \right)$$

Caterpillar Barcaza 5 – Booster 1

$$\lambda = -1.7043271849E-12x^3 + 6.5084006344E-08x^2 - 8.1695507595E-04x + 1.1359716717E+01 \left(\frac{ctvs\$}{Kwh} \right)$$

Caterpillar Barcaza 5 – Booster 2

$$\lambda = -1.4268208153E-12x^3 + 5.8170640492E-08x^2 - 7.7182460151E-04x + 1.1291628518E+01 \left(\frac{ctvs\$}{Kwh} \right)$$

Caterpillar Barcaza 5 – Booster 3

$$\lambda = -1.7309251792E-12x^3 + 6.6377503544E-08x^2 - 8.3832296972E-04x + 1.1450687323E+01 \left(\frac{ctvs\$}{Kwh} \right)$$

Caterpillar Barcaza 5 – Booster 4

$$\lambda = -9.1933325980E-13x^3 + 4.8142248228E-08x^2 - 8.2070689424E-04x + 1.5230343489E+01 \left(\frac{ctvs\$}{Kwh} \right)$$

2.6 Método de Lambda Iterativo.

Para el Desarrollo del Despacho Económico de la Central TermoGuayas Generation S.A. se utilizará el método de Lambda Iterativo ya que converge muy rápidamente para este problema de optimización.

En la Fig. 2.6 A se muestra el diagrama de bloque del método Lambda Iterativo.

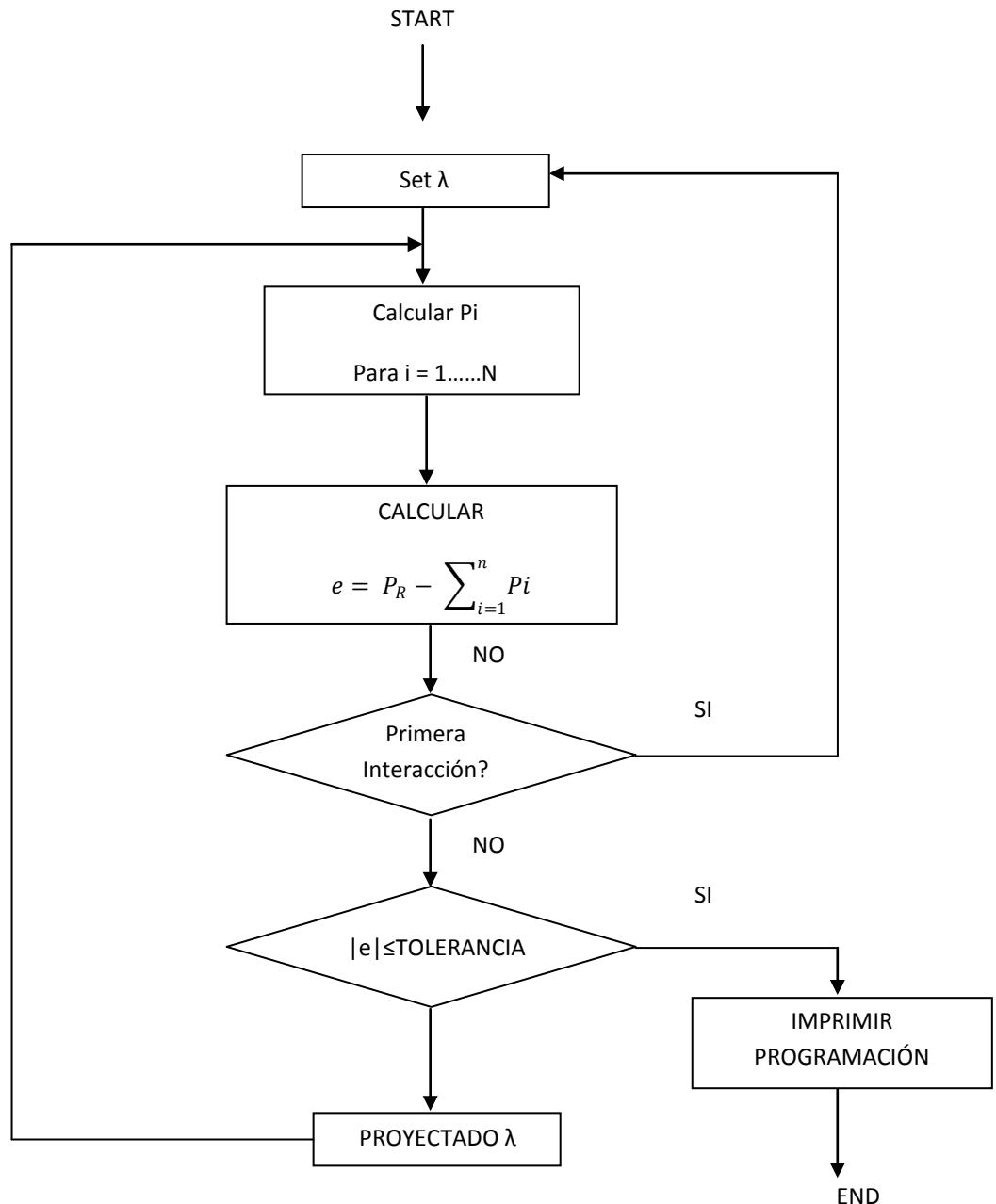


Fig. 2.6 A Método de Lambda Iterativo para el Despacho Económico

Fuente: POWER GENERATION OPERATION & CONTROL

A manera de ejemplo si se tiene 3 máquinas en un sistema y se espera encontrar el punto de operación óptimo se aprovecha el dibujo característico del costo incremental para cada una de las 3 unidades sobre el mismo gráfico, tal como está dibujado en la Fig. 2.6 B.

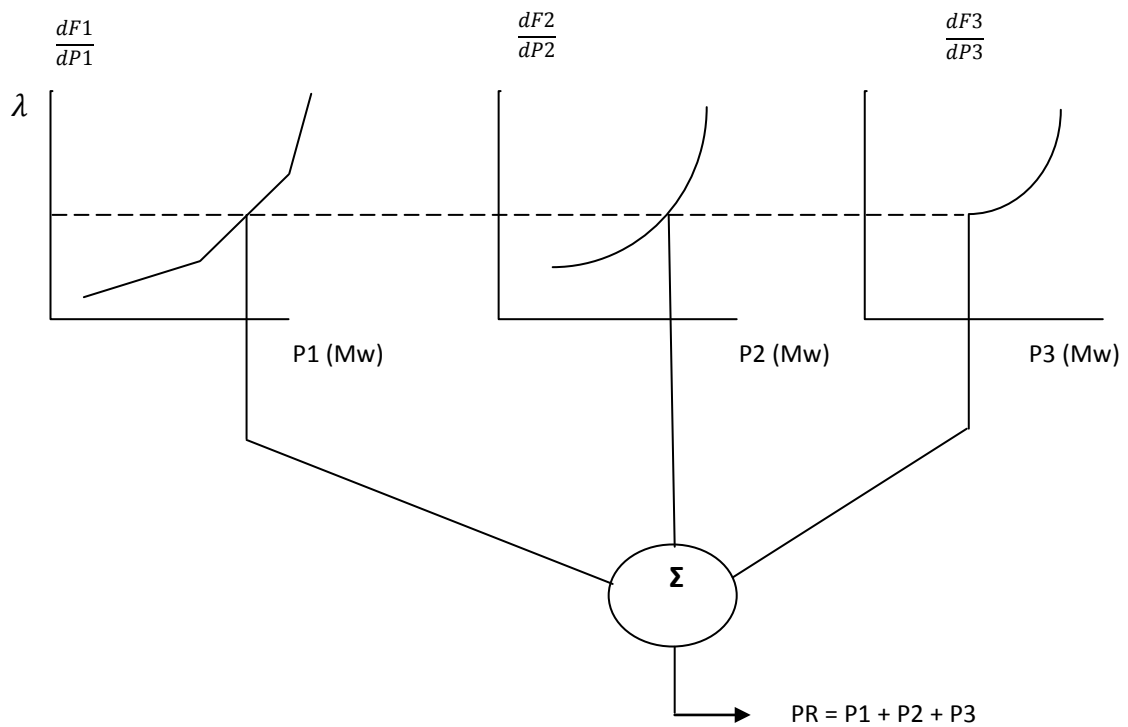


Fig. 2.6 B Solución Gráfica para el Despacho Económico

Fuente: POWER GENERATION OPERATION & CONTROL

En orden de estabilizar el punto de operación de estas 3 unidades se tendrá el mínimo costo y al mismo tiempo satisfacer la demanda especificada, entonces se usará este dibujo y una regla para encontrar la solución. Se podrá asumir un valor de costo incremental (λ) y encontrar la potencia de salida de cada una de las 3 unidades para este valor de costo incremental.

La primera estimación será incorrecta. Si se asume el valor de costo incremental tal que la potencia total de salida es demasiado baja, entonces se incrementa el valor de λ y se intenta otra solución con el nuevo Lambda.

Con 2 soluciones se adquiere extrapolar (ó interpolar) las soluciones sedan para obtener la más cercana siguiendo la vía de la demanda total versus el costo incremental, entonces se encontrará rápidamente el punto de operación designado.

Se realizará una tabla de series completa que presente el suministro de potencia total para diferentes niveles de costo incremental y las combinaciones de unidades.

Este mismo procedimiento puede ser adoptado para una implementación computarizada como se presentó en la Fig. 2.6 A.

El detalle actual de cómo la potencia de salida es estabilizada como una función de costo incremental es de muy pequeña importancia. Se almacenará en una tabla de datos internamente en el computador e interpolar entre los puntos de potencia almacenados para encontrar la potencia de salida exacta para un valor específico de costo incremental. Otra aproximación sería desarrollar una función analítica para la potencia de salida como una función de costo incremental, se almacena esta función (ó coeficientes) en el computador y se aplica para estabilizar la salida de cada unidad. Este proceso es un Método Iterativo de computación para lo cual se estabiliza con reglas de parada. Hay dos formas generales de reglas de parada que serían apropiadas para esta aplicación. El primero es presentado en la Fig. 2.6 A, y es esencialmente una regla básica encontrando el correcto punto de operación llevando a cabo una tolerancia específica. La segunda forma no está presentada en la Fig. 2.6 A, involucra calcular el número de veces pensado dentro del lazo iterativo y parando cuando un número máximo es excedido.

El proceso de lambda iterativo converge muy rápidamente para este particular problema de optimización. El proceso computacional actual es ligeramente más complejo del que se indica en la Fig. 2.6 A, es necesario observar los límites operacionales en cada una de las unidades durante el proceso computacional. Ahora se conoce que el método de la secante será usado para encontrar el valor de costo incremental proyectado.

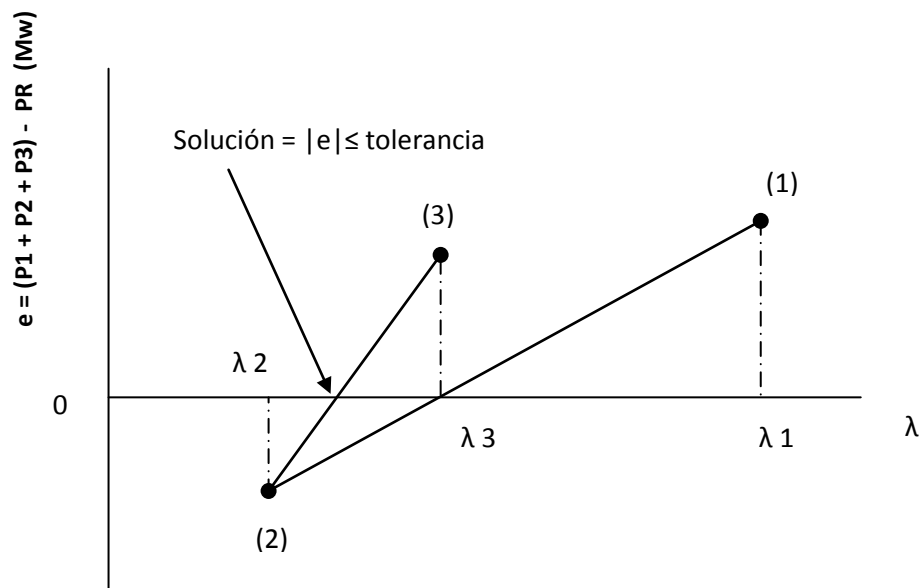


Fig. 2.6 C. Proyecciones de Lambda

Fuente: POWER GENERATION OPERATION & CONTROL

2.7 Método de la Secante.

Para aplicar el Método de la Secante se revisa el método de Newton el cual establece que bajo condiciones razonables se selecciona una aproximación inicialmente exacta. También implica que una constante acote la derivada y en consecuencia de esto se indica la rapidez de convergencia del método, reduciéndose a cero a medida que el procedimiento avanza. Este resultado es importante para la teoría del Método de Newton, aunque pocas veces se aplica en la práctica, ya que indica como determinar la derivada. En una aplicación práctica, se elige una aproximación inicial y las aproximaciones sucesivas se generan mediante el método de Newton. Por lo general, esto convergerá rápidamente a la raíz, o será claro que la convergencia es improbable.

Inicialmente se considero trabajar con este método pero presenta un problema: la necesidad de conocer el valor de la derivada de f en cada aproximación. Con frecuencia es más difícil determinar $f'(x)$ y se requieren más operaciones aritméticas para calcularlo que para $f(x)$.

Para evitar el problema de evaluar la derivada en el método de Newton, Se deriva una pequeña variación. Por definición,

$$f'(P_{n-1}) = \lim_{x \rightarrow P_{n-1}} \left(\frac{f(x) - f(P_{n-1})}{x - P_{n-1}} \right)$$

$$f'(P_{n-1}) = \left(\frac{f(P_{n-2}) - f(P_{n-1})}{P_{n-2} - P_{n-1}} \right) \left(\frac{f(P_{n-1}) - f(P_{n-2})}{P_{n-1} - P_{n-2}} \right)$$

Al aplicar esta aproximación para $f'(P_{n-1})$ en la fórmula de Newton, se obtiene

$$P_n = P_{n-1} - \frac{f(P_{n-1})(P_{n-1} - P_{n-2})}{f(P_{n-1}) - f(P_{n-2})}$$

La técnica que utiliza esta fórmula recibe el nombre de **método de la secante**. Comenzando con las dos aproximaciones iniciales P_0 y P_1 , la aproximación P_2 es la intersección del eje x y la línea que une $(P_0, f(P_0))$ y $(P_1, f(P_1))$. La aproximación P_3 es la intersección del eje x y la línea que une $(P_1, f(P_1))$ y $(P_2, f(P_2))$ y así sucesivamente.

Como conclusión, esta fórmula es de valiosa importancia para aplicarla dentro del programa de Matlab para la determinaciones de los lambdas proyectados.

2.8 Despacho Económico en la Central TERMOGUAYAS GENERATION S.A. Utilizando el Método de Lambda Iterativo.

Utilizando un rango de Despacho de 40Mw dispuesto por el **CENACE** se desarrollo el Método de Lambda Iterativo aplicado en el programa **MATLAB**, con la finalidad de resolver el Despacho Económico en la Central Termoeléctrica.

A continuación se detalla las ecuaciones de Costo Incremental obtenidas de seis (6) Unidades Boosters.

Barcaza 4 – Booster 1: Combustión Interna

$$P_{Gmax} = 9900Kw, P_{Gmin} = 3600Kw$$

$$\lambda = -1.8034736150E-12x^3 + 6.8070216397E-08x^2 - 8.4826561586E-04x + 1.1461286004E+01 \left(\frac{ctvs\$/Kwh}{Kwh} \right)$$

Barcaza 4 – Booster 2: Combustión Interna

$$P_{Gmax} = 9900Kw, P_{Gmin} = 3600Kw$$

$$\lambda = -1.7345750224E-12x^3 + 6.6042744257E-08x^2 - 8.2774238819E-04x + 1.1337430373E+01 \left(\frac{ctvs\$/Kwh}{Kwh} \right)$$

Barcaza 4 – Booster 3: Combustión Interna

$$P_{Gmax} = 9900Kw, P_{Gmin} = 3600Kw$$

$$\lambda = -1.6233692914E-12x^3 + 6.2586798786E-08x^2 - 7.9518108882E-04x + 1.1249169527E+01 \left(ctvs\$/Kwh \right)$$

Barcaza 5 – Booster 1: Combustión Interna

$$P_{Gmax} = 9900Kw, P_{Gmin} = 3600Kw$$

$$\lambda = -1.7043271849E-12x^3 + 6.5084006344E-08x^2 - 8.1695507595E-04x + 1.1359716717E+01 \left(ctvs\$/Kwh \right)$$

Barcaza 5 – Booster 2: Combustión Interna

$$P_{Gmax} = 9900Kw, P_{Gmin} = 3600Kw$$

$$\lambda = -1.4268208153E-12x^3 + 5.8170640492E-08x^2 - 7.7182460151E-04x + 1.1291628518E+01 \left(ctvs\$/Kwh \right)$$

Barcaza 5 – Booster 3: Combustión Interna

$$P_{Gmax} = 9900Kw, P_{Gmin} = 3600Kw$$

$$\lambda = -1.7309251792E-12x^3 + 6.6377503544E-08x^2 - 8.3832296972E-04x + 1.1450687323E+01 \left(ctvs\$/Kwh \right)$$

1. Ingreso de Datos.

El Programa muestra al usuario el ingreso de los Datos para la determinación del Despacho Económico en la Central:

- Potencia Requerida. (40000 Kw).
- Lambda de Arranque. (8.0 ctvs. \$/Kwh).
- Ecuaciones de Costo Incremental de las Unidades Boosters. (Se encuentran ingresadas en las líneas del Programa).

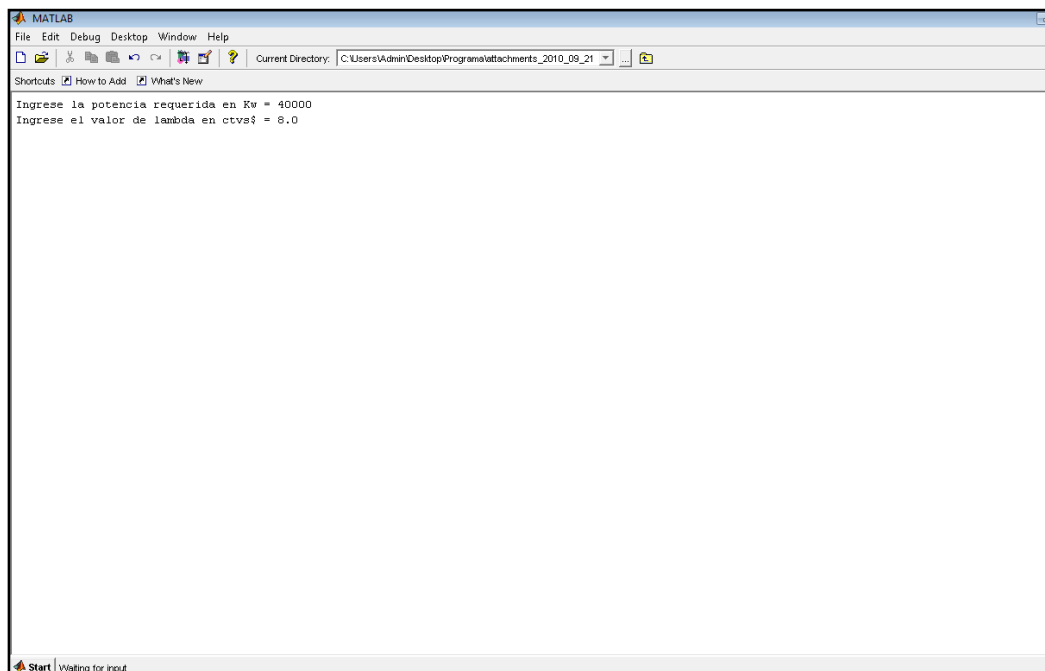
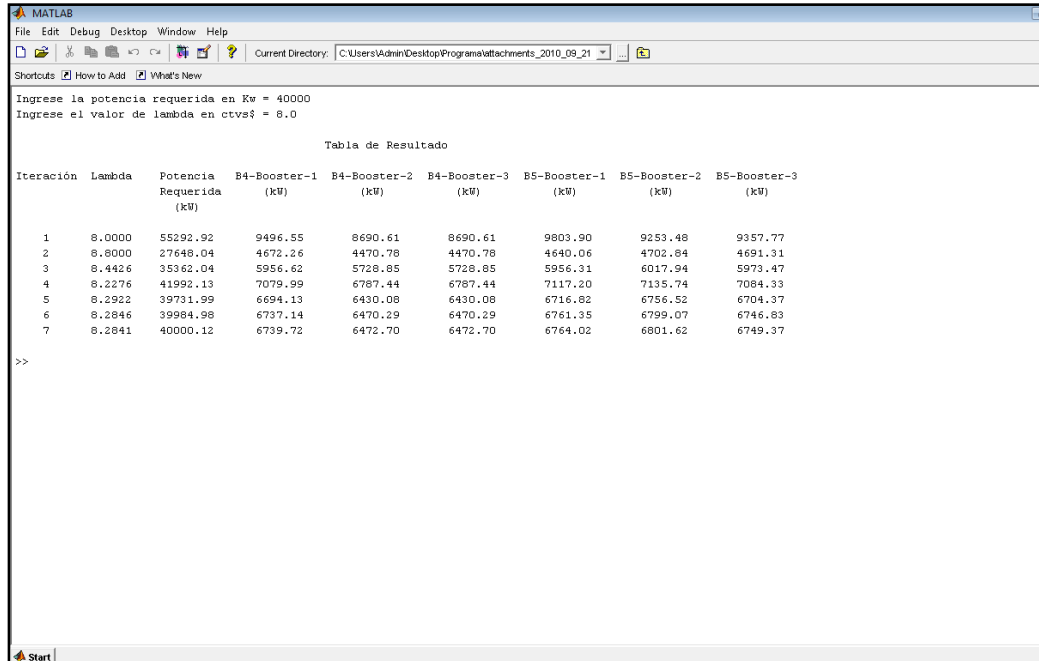


Fig. 2.8 A Ingreso de Datos para el DESPACHO ECONÓMICO EN LA CENTRAL TERMOGUAYAS GENERATION S.A.

Fuente: Los Autores

2. Tabla de Resultado.

En la tabla de resultado se muestra el número de iteraciones, la optimización de las potencias con que cada Unidad Booster debe de trabajar y el costo incremental óptimo que con lleva Generar los 40Mw.



```

MATLAB
File Edit Debug Desktop Window Help
Current Directory: C:\Users\Admin\Desktop\Programa\attachments_2010_09_21
Shortcuts How to Add What's New
Ingrese la potencia requerida en Kw = 40000
Ingrese el valor de lambda en ctvs$ = 8.0

Tabla de Resultado

Iteración Lambda Potencia B4-Booster-1 B4-Booster-2 B4-Booster-3 B5-Booster-1 B5-Booster-2 B5-Booster-3
Requerida (kW) (kW) (kW) (kW) (kW) (kW) (kW) (kW)
1 8.0000 55292.92 9496.55 8690.61 8690.61 9803.90 9253.48 9357.77
2 8.8000 27648.04 4672.26 4470.78 4470.78 4640.06 4702.84 4691.31
3 8.4426 35362.04 5956.62 5728.85 5728.85 5956.31 6017.94 5973.47
4 8.2276 41992.13 7079.99 6787.44 6787.44 7117.20 7135.74 7084.33
5 8.2922 39731.99 6694.13 6430.08 6430.08 6716.82 6756.52 6704.37
6 8.2846 39984.98 6737.14 6470.29 6470.29 6761.35 6799.07 6746.83
7 8.2841 40000.12 6739.72 6472.70 6472.70 6764.02 6801.62 6749.37

>>

```

Fig. 2.8 B Tabla de Resultado del DESPACHO ECONÓMICO EN LA CENTRAL TERMOGUAYAS GENERATION S.A.

Fuente: Los Autores

3. Proyecciones de Lambda.

A manera de un resultado gráfico se desarrolló la presentación de los lambdas proyectados, para demostrar que la solución ha sido encontrada satisfactoriamente.

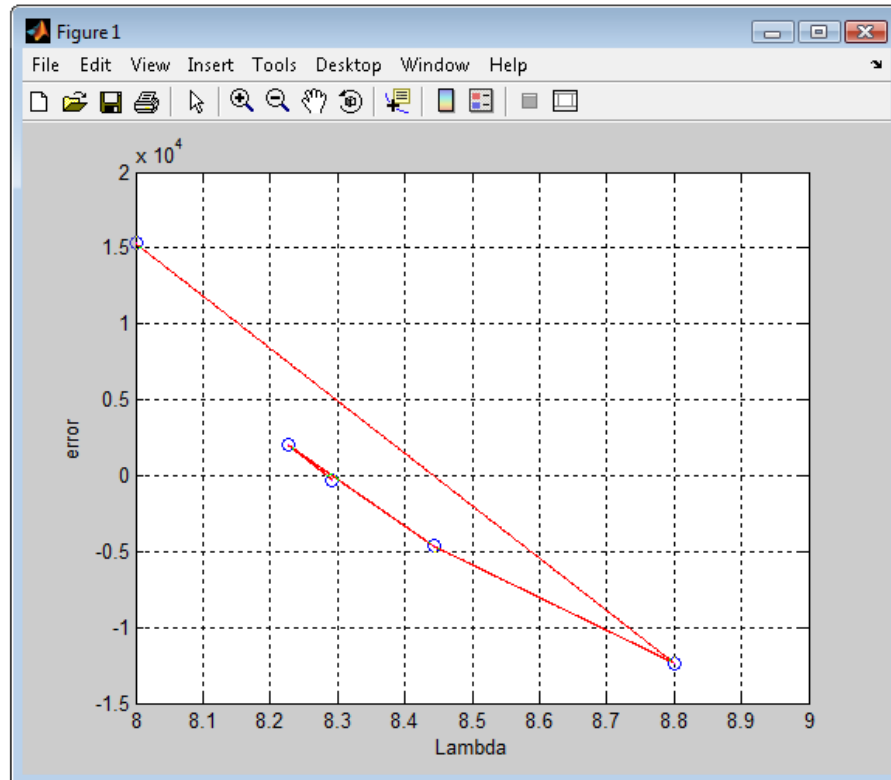


Fig. 2.8 C Proyecciones de LAMBDA del DESPACHO ECONÓMICO EN LA CENTRAL TERMOGUAYAS GENERATION S.A.

Fuente: Los Autores

2.9 Aplicación del Método de la Secante en el Proceso de Lambda Iterativo.

Utilizando la tabla de resultado de la Figura 2.8 B se calculan los valores de lambda proyectado, en este proceso se aplica el Método de la Secante.

Fórmula General del Método de la Secante:

$$P_n = P_{n-1} - \frac{f(P_{n-1})(P_{n-1} - P_{n-2})}{f(P_{n-1}) - f(P_{n-2})}$$

Para adecuarla a nuestra aplicación quedaría de la siguiente manera:

$$\lambda_n = \lambda_{n-1} - \frac{f(\lambda_{n-1})(\lambda_{n-1} - \lambda_{n-2})}{f(\lambda_{n-1}) - f(\lambda_{n-2})}$$

Se encuentra los lambdas proyectados de la Fig. 2.8 B:

- Tercer lambda:

$$\lambda_3 = \lambda_2 - \frac{f(\lambda_2)(\lambda_2 - \lambda_1)}{f(\lambda_2) - f(\lambda_1)}$$
$$\lambda_3 = 8.8 - \frac{12352(0.8)}{12352 - (-15293)} = \mathbf{8.4425538}$$

- Cuarto lambda:

$$\lambda_4 = \lambda_3 - \frac{f(\lambda_3)(\lambda_3 - \lambda_2)}{f(\lambda_3) - f(\lambda_2)}$$
$$\lambda_4 = 8.4425538 - \frac{4638(-0.3574)}{4638 - (12352)} = \mathbf{8.227669}$$

- Quinto lambda:

$$\lambda_5 = \lambda_4 - \frac{f(\lambda_4)(\lambda_4 - \lambda_3)}{f(\lambda_4) - f(\lambda_3)}$$

$$\lambda_5 = 8.227669 - \frac{-1992(-0.215)}{-1992 - 4638} = \mathbf{8.29226628}$$

- Sexto lambda:

$$\lambda_6 = \lambda_5 - \frac{f(\lambda_5)(\lambda_5 - \lambda_4)}{f(\lambda_5) - f(\lambda_4)}$$

$$\lambda_6 = 8.29226628 - \frac{268(0.0646)}{268 - (-1992)} = \mathbf{8.28460574}$$

- Séptimo lambda:

$$\lambda_7 = \lambda_6 - \frac{f(\lambda_6)(\lambda_6 - \lambda_5)}{f(\lambda_6) - f(\lambda_5)}$$

$$\lambda_7 = 8.28460574 - \frac{15(-0.0076)}{15 - 268} = \mathbf{8.28415514}$$

CAPÍTULO III

APLICACIÓN AL PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN DE UNIDADES EN LA CENTRAL TÉRMICA TERMOGUAYAS GENERATION S.A.

3.1 Aplicación de la Programación Dinámica en la Central TermoGuayas Generation S.A.

Para la solución de la Programación Dinámica de cada etapa del problema en la Central, se deben calcular las salidas de los Despachos Económicos de las Unidades Generadoras disponibles. Esto con lleva un cierto número de combinaciones $2^K - 1$ posibles a ser examinadas en cada etapa de la Carga, por supuesto no todas las combinaciones son factibles debidos a las restricciones impuesta por la Carga. Adicionalmente para no poseer un gran número de combinaciones se desarrolla restricciones para clasificar cuales son las Unidades Base ó Unidades de Prioridad.

Para la aplicación de la Programación Dinámica, se propone a realizar un Despacho Horario, para saber cuánto es el costo horario de la Central. Para esto se debe de obtener las ecuaciones de Costo de las Unidades Boosters.

Al encontrar las ecuaciones de Costo Incremental en las Barcazas WARTSILA Y CATERPILLAR, se debe realizar la Integración de dichas ecuaciones. Se escoge la Unidad Booster 1 de la Barcaza 1.

$$\lambda = - 6,5255493223E-05x + 1,2341596482E+01 \text{ (ctvs. \$/Kwh)}$$

Integrando,

$$f = - 3,26277466E-05x^2 + 1,2341596E+01x + C \text{ (ctvs. \$/h)}$$

Ahora la Constante llamada “C”, indica el Costo de Arranque de la Unidad Booster. Para encontrar el coeficiente C se realiza las pruebas de arranque esto quiere decir, cuánto combustible debe de consumir hasta que la Unidad sea Sincronizada. Este procedimiento se efectúa en todas las ecuaciones de Costo Incremental obtenidas durante las pruebas.

A manera de explicación se muestra como se deduce el coeficiente C de la Integración en la Barcaza 1 de la Unidad Booster 1:

El Costo del Combustible no va a variar esto quiere decir 0,44 ctvs. \$/gln

El tiempo en que la máquina se encuentra en vacío se lo llama Relantín este tiempo dura 10 minutos, entonces se calcula el combustible necesario para este tiempo a través de los Flujómetros, como resultado se obtiene lo siguiente:

En el tiempo en que la máquina se encontraba en Relantín es decir los 10 minutos se consumió 100 litros de combustible, ahora al transformar en galones queda:

$$100 \text{ lts} * \frac{\text{gln}}{3,785 \text{ lts}} = 26,42 \text{ glns}$$

Como se describió con anterioridad el costo del Combustible es de 0,44 ctvs. \$/gln, se procede a realizar la conversión:

$$26,42 \text{ glns} * 0,44 \frac{\text{ctvs. \$}}{\text{gln}} = 1162,48 \text{ ctvs. \$} \approx 12 \$$$

Ahora este valor debe ser llevado a horas para que la ecuación no sea alterada, para esto se debe de recordar la cantidad de generadores que intervienen en esta Unidad Booster y transformar los 10 minutos a segundos que en este caso sería 600 segundos, conociendo esto el desarrollo es el siguiente:

$$1162,48 \frac{\text{ctvs. \$}}{600 \text{ seg}} * 3600 \frac{\text{seg}}{\text{hora}} * 4 = 27907,92 \text{ ctvs. \$/hora}$$

Se debe de tener en cuenta este procedimiento para la determinación de los coeficientes “C” en las integraciones de las ecuaciones de Costos Incrementales (λ).

A continuación se presentan las ecuaciones de costos de las Unidades Boosters de las Barcazas WARTSILA Y CATERPILLAR con sus respectivos coeficientes “C”.

Wartsila Barcaza 1. Booster 1

$$f = -3.262775E-05x^2 + 1.2341596E+01x + 27907.92 \left(\text{ctvs}\$/h \right)$$

Wartsila Barcaza 1. Booster 2

$$f = -4.0350504E-05x^2 + 1.3082714E+01x + 28800 \left(\text{ctvs}\$/h \right)$$

Wartsila Barcaza 3. Booster 1

$$f = -1.613594E-05x^2 + 1.185283E+01x + 28100.44 \left(\text{ctvs}\$/h \right)$$

Wartsila Barcaza 3. Booster 2

$$f = -3.7378166E-05x^2 + 1.2900771E+01x + 29100 \left(\text{ctvs}\$/h \right)$$

Caterpillar Barcaza 4. Booster 1

$$f = -4.50868403E-13x^4 + 2.26900721E-08x^3 - 4.241328E-04x^2 + 1.1461286E+01x + 14647.284 \left(\text{ctvs}\$/h \right)$$

Caterpillar Barcaza 4. Booster 2

$$f = -4.33643755E-13x^4 + 2.2014248E-08x^3 - 4.13871194E-04x^2 + 1.13374303E+01x + 14680.266 \left(\frac{ctvs\$}{h} \right)$$

Caterpillar Barcaza 4. Booster 3

$$f = -4.058423228E-13x^4 + 2.08622662E-08x^3 - 3.975905E-04x^2 + 1.12491695E+01x + 14670.255 \left(\frac{ctvs\$}{h} \right)$$

Caterpillar Barcaza 4. Booster 4

$$f = -2.171825950E-13x^4 + 1.514586271E-08x^3 - 3.883949E-04x^2 + 1.4943266E+01x + 19529.712 \left(\frac{ctvs\$}{h} \right)$$

Caterpillar Barcaza 5. Booster 1

$$f = -4.26081796E-13x^4 + 2.16946687E-08x^3 - 4.0847753E-04x^2 + 1.13597167E+01x + 14666.324 \left(\frac{ctvs\$}{h} \right)$$

Caterpillar Barcaza 5. Booster 2

$$f = -3.56705203E-13x^4 + 1.93902134E-08x^3 - 3.859123E-04x^2 + 1.12916285E+01x + 14673.678 \left(\frac{ctvs\$}{h} \right)$$

Caterpillar Barcaza 5. Booster 3

$$f = -4.32731294E-13x^4 + 2.21258345E-08x^3 - 4.1916148E-04x^2 + 1.14506873E+01x + 14734.143 \left(\text{ctvs}\$/h \right)$$

Caterpillar Barcaza 5. Booster 4

$$f = -2.298333149E-13x^4 + 1.6047416E-08x^3 - 4.10353447E-04x^2 + 1.5230343E+01x + 19723.824 \left(\text{ctvs}\$/h \right)$$

El **CENACE** quien es el encargado de programar el Despacho Horario de la Central **TERMOGUAYAS GENERATION S.A.**, envía un Cronograma de Despacho para ser realizado durante el día. A continuación se presentan tres (3) escenarios de Demandas donde se realizarán sus respectivos costos:

- Despacho Horario Demanda Alta.
- Despacho Horario Demanda Media
- Despacho Horario Demanda Baja.

3.2 DESPACHO HORARIO DEMANDA ALTA.

En la Figura 3.2 A se muestra el Cronograma de Despacho Horario durante una Demanda Alta de Generación.

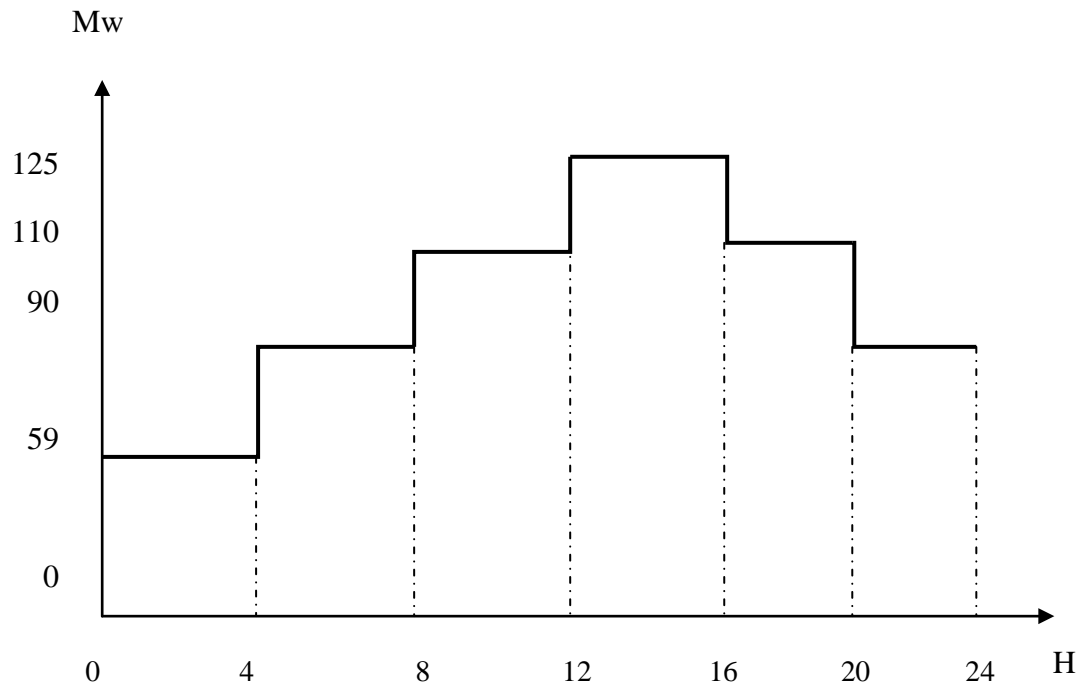


Fig. 3.2 A Cronograma de Despacho Horario Demanda Alta

Fuente: Los Autores

La Figura 3.2 B denota las posibles trayectorias que se utilizan para cumplir con la Demanda Requerida en los diversos periodos de tiempo del Despacho Horario, desde luego con la Programación Dinámica se obtendrá la ruta óptima. (Menor costo para cumplir con el Despacho Horario).

En el gráfico se obtiene una malla de 6 etapas del ciclo de carga y el costo de producción está situado dentro de cada nodo, cada nodo representa un número de equipos generando un valor de carga a un costo de producción determinado dependiendo en la etapa en que se encuentre.

En la malla se visualiza la ruta óptima identificada por una línea de color rojo, la ruta se obtuvo al ingresar los valores de costos al programa WINQSB. La ruta es la más óptima y la de menor costo de producir diferentes niveles de carga en un ciclo diario.

Estado de Carga (Combinación)

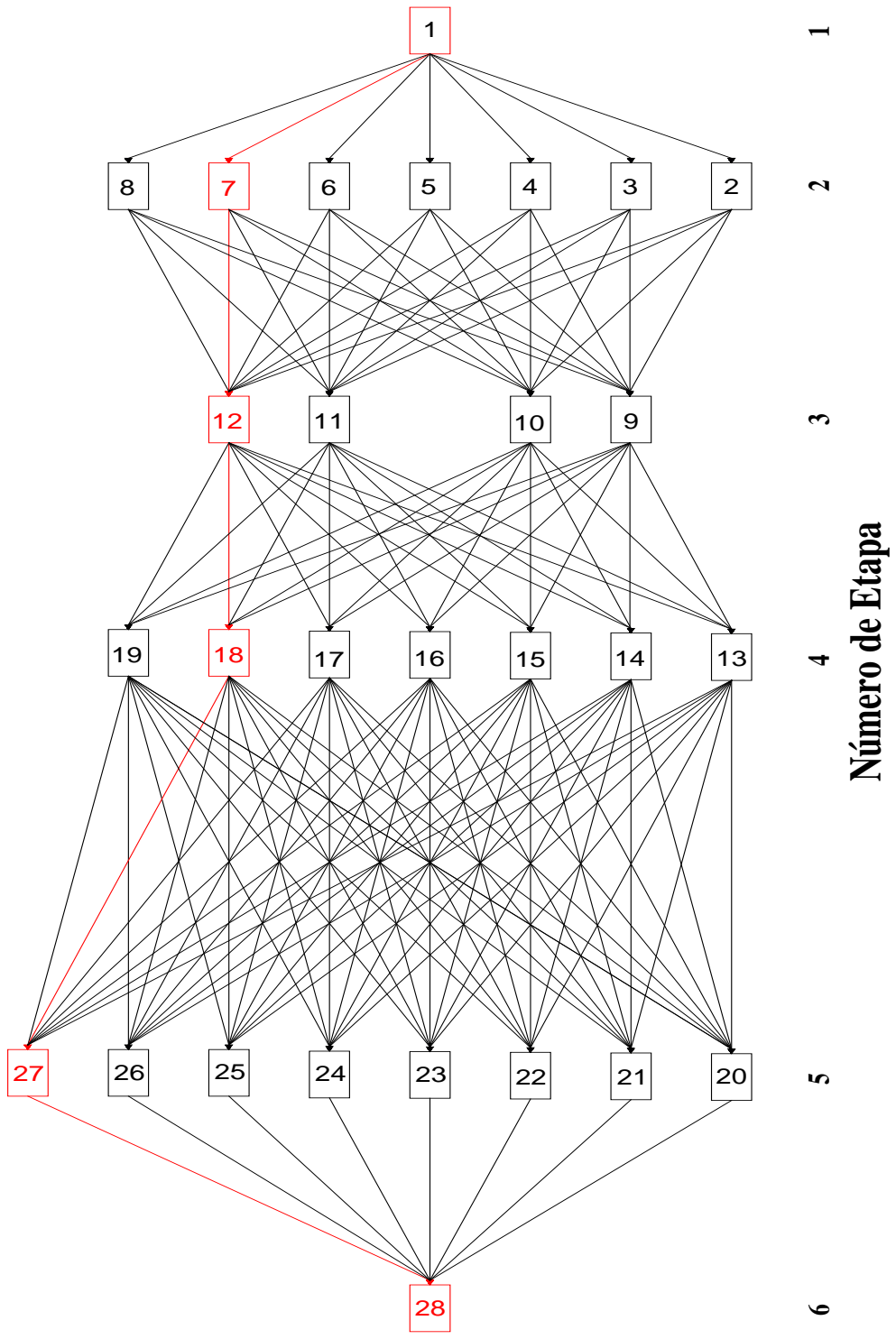


Fig. 3.2 B Rutas Posibles para la Programación de Unidades

Fuente: Los Autores

1. Tabla de Ingreso de Costos en WINQSB

A continuación se muestran las tablas de los valores de costos, los cuales se deberán ingresar al programa WINQSB de la Dinámica de Programación para obtener el resultado de la ruta más óptima y así poder suministrar los diferentes niveles de carga del ciclo de Demanda Diaria. Para tener una mejor referencia de cómo colocar los valores al programa consultar el ANEXO C Problema de la Diligencia.

Desde/A	Nodo 2	Nodo 3	Nodo 4	Nodo 5	Nodo 6	Nodo 7	Nodo 8
Nodo 1	26313.5	26046.5	26051.5	25784.5	26048	25781	25786

Desde/A	Nodo 9	Nodo 10	Nodo 11	Nodo 12
Nodo 2	56306	56648	56594	56646.9
Nodo 3	55025	54758	55313	55365.9
Nodo 4	55457	55799	55195	55797.9
Nodo 5	53949	53682	53687	54289.9
Nodo 6	54954.5	55296.5	55242.5	54689
Nodo 7	53393.5	53126.5	53681.5	53128
Nodo 8	53878.3	54220.5	53616.5	53128

Desde/A	Nodo 13	Nodo 14	Nodo 15	Nodo 16	Nodo 17	Nodo 18	Nodo 19
Nodo 9	63323	63665	63611	63953	63663.9	64005.9	63951.9
Nodo 10	61752	61485	62040	61773	62092.9	61825.9	62380.9
Nodo 11	62238	62580	61976	62318	62578.9	62920.9	62316.9
Nodo 12	61681.5	62023.5	61969.5	62311.5	61416	61758	61704

Desde/A	Nodo 20	Nodo 21	Nodo 22	Nodo 23	Nodo 24	Nodo 25	Nodo 26	Nodo 27
Nodo 13	56306	56648	56594	56936	56646.9	56988.9	56934.9	57276.9
Nodo 14	55025	54758	55313	55046	55365.9	55098.9	55653.9	55386.9
Nodo 15	55457	55799	55195	55537	55797.9	56139.9	55535.9	55877.9
Nodo 16	53949	53682	53687	53420	54289.9	54022.9	54027.9	53760.9
Nodo 17	54954.5	55296.5	55242.5	55584.5	54689	55031	54977	55319
Nodo 18	53393.5	53126.5	53681.5	53414.5	53128	52861	53416	53149
Nodo 19	53878.5	54220.5	53616.5	53958.5	53613	53955	53351	53693

Desde/A	Nodo 28
Nodo 20	48403.32
Nodo 21	46826.32
Nodo 22	47121.32
Nodo 23	45468.32
Nodo 24	46774.42
Nodo 25	44970.42
Nodo 26	45405.42
Nodo 27	43480.42

Tabla 3.2 Demanda Alta - Ingreso de Costos en WINQSB

Fuente: Los Autores

2. Resultados de costos y ruta óptima del recorrido del nodo 1 al nodo 28

La ventana siguiente presenta la iteración de los nodos desde 1 hasta el 28 informando la mejor trayectoria con el menor costo de producción, obteniendo además el valor en dólares del Ciclo Diario de Despacho de Demanda Alta.

11-27-2010 17:46:02	Stage	From Input State	To Output State	Distance	Distance to Node28	Status
1	1	Node1	Node7	25781	237.296,42	Optimal
2	2	Node2	Node12	56.646,90	215.034,31	
3	2	Node3	Node10	54758	213.213,31	
4	2	Node4	Node12	55.797,90	214.185,31	
5	2	Node5	Node10	53682	212.137,31	
6	2	Node6	Node12	54689	213.076,42	
7	2	Node7	Node12	53128	211.515,42	Optimal
8	2	Node8	Node12	53613	212.000,42	
9	3	Node9	Node18	64.005,90	160.635,31	
10	3	Node10	Node18	61.825,90	158.455,31	
11	3	Node11	Node19	62.316,90	159.490,31	
12	3	Node12	Node18	61758	158.387,42	Optimal
13	4	Node13	Node27	57.276,90	100.757,32	
14	4	Node14	Node27	55.386,90	98.867,32	
15	4	Node15	Node27	55.877,90	99.358,32	
16	4	Node16	Node27	53.760,90	97.241,32	
17	4	Node17	Node27	55319	98.799,42	
18	4	Node18	Node27	53149	96.629,42	Optimal
19	4	Node19	Node27	53693	97.173,42	
20	5	Node20	Node28	48.403,32	48.403,32	
21	5	Node21	Node28	46.826,32	46.826,32	
22	5	Node22	Node28	47.121,32	47.121,32	
23	5	Node23	Node28	45.468,32	45.468,32	
24	5	Node24	Node28	46.774,42	46.774,42	
25	5	Node25	Node28	44.970,42	44.970,42	
26	5	Node26	Node28	45.405,42	45.405,42	
27	5	Node27	Node28	43.480,42	43.480,42	Optimal
	From Node1	To Node28	Minimum	Distance =	237.296,42	CPU = 0

Fig. 3.2 C Presentación de la Ruta Óptima con su respectivo Costo

Fuente: Los Autores

3. Recorrido de la Ruta Óptima

En la Fig. 3.2 D presenta los nodos más apropiados en el recorrido de pasar del Nodo 1 estado 1 al Nodo 28 del estado 6, en este caso indica la trayectoria que se deberá trazar desde el Nodo 1, Nodo 7, Nodo 12, Nodo 18, Nodo 27 y Nodo 28, también se observa un valor de **237.296,42 dólares**. Este valor es el costo de producir con esta trayectoria los diferentes valores de carga en el Despacho Diario de Demanda Alta.



Fig. 3.2 D Presentación de Nodos para la Ruta Óptima en el Recorrido

Fuente: Los Autores

3.3 DESPACHO HORARIO DEMANDA MEDIA

En la Figura 3.3 A se muestra el Cronograma de Despacho Horario durante una Demanda Media de Generación.

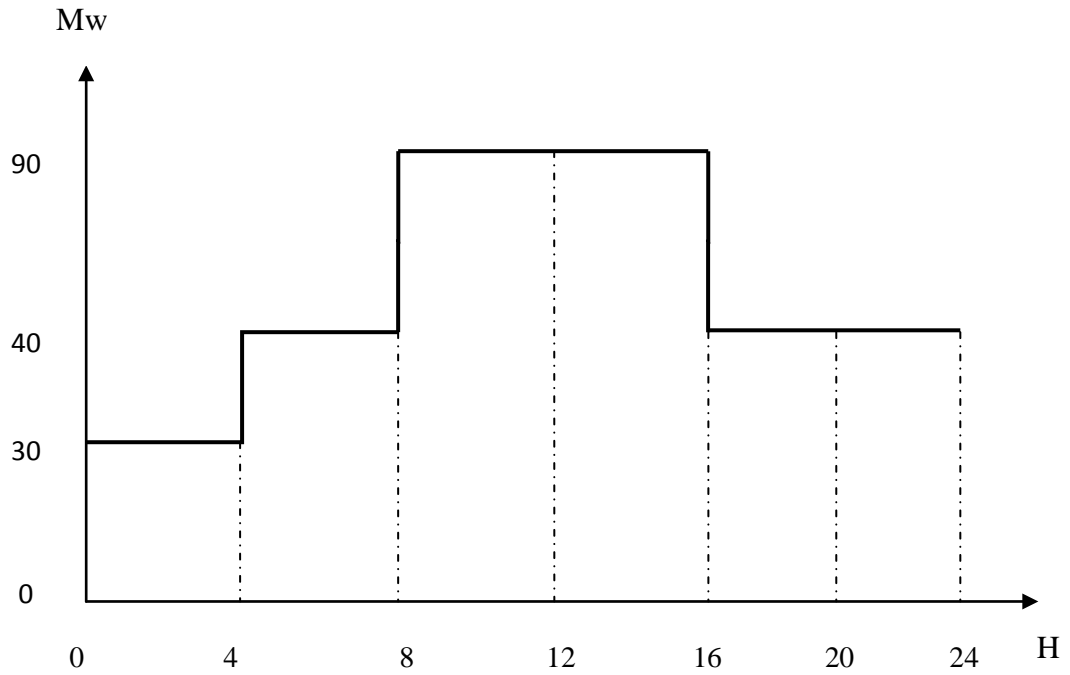


Fig. 3.3 A Cronograma de Despacho Horario de Demanda Media

Fuente: Los Autores

La Figura 3.3 B denota las posibles trayectorias que se utilizan para cumplir con la demanda requerida en los diversos periodos de tiempo del Despacho Horario, desde luego con la Programación Dinámica se obtendrá la ruta óptima. (Menor costo para cumplir con el Despacho Horario).

En el gráfico se obtiene una malla de 5 etapas del ciclo de carga y el costo de producción está situado dentro de cada nodo, cada nodo representa un número de equipos generando un valor de carga a un costo de producción determinado dependiendo en la etapa en que se encuentre.

Estado de Carga (Combinación)

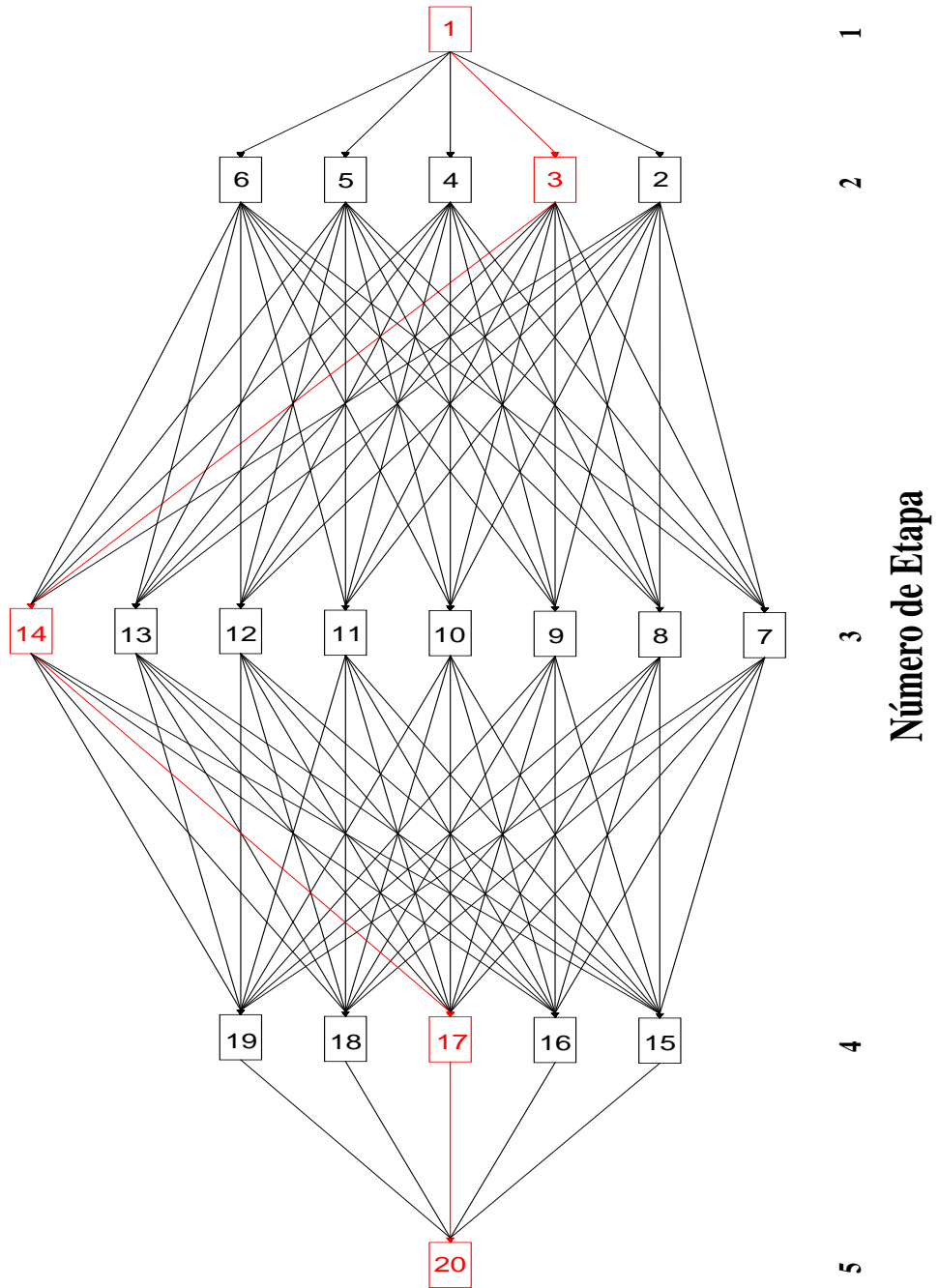


Fig. 3.3 B Rutas Posibles para la Programación de Unidades

Fuente: Los Autores

1. Tabla de Ingreso de Costos en WINQSB

Desde/A	Nodo 2	Nodo 3	Nodo 4	Nodo 5	Nodo 6
Nodo 1	13849.92	13688.42	13686.92	14065.92	14067.92

Desde/A	Nodo 7	Nodo 8	Nodo 9	Nodo 10	Nodo 11	Nodo 12
Nodo 2	20168.83	19901.83	19906.83	19639.83	19903.33	19636.33
Nodo 3	19382.628	19115.628	19120.628	18853.628	19117.128	18850.128
Nodo 4	19395.82	19128.82	19133.82	18866.82	19130.32	18863.32
Nodo 5	19395.29	19128.29	19133.29	18866.29	19129.79	18862.79
Nodo 6	19415.69	19148.69	19153.69	18886.69	19150.19	18883.19

Desde/A	Nodo 13	Nodo 14
Nodo 2	19641.33	19374.33
Nodo 3	18855.128	18588.128
Nodo 4	18868.32	18601.32
Nodo 5	18867.79	18600.79
Nodo 6	18888.19	18621.19

Desde/A	Nodo 15	Nodo 16	Nodo 17	Nodo 18	Nodo 19
Nodo 7	95212.24	95430.24	95429.24	95428.24	95430.24
Nodo 8	92403.58	92621.58	92620.58	92619.58	92621.58
Nodo 9	92936.32	93154.32	93153.32	93152.32	93154.32
Nodo 10	89975.88	90193.88	90192.88	90191.88	90193.88
Nodo 11	92297.86	92515.86	92514.86	92513.86	92515.86
Nodo 12	89032.72	89250.72	89249.72	89248.72	89250.72
Nodo 13	89848.22	90066.22	90065.22	90064.22	90066.22
Nodo 14	86339.09	86557.09	86556.09	86555.09	86557.09

Desde/A	Nodo 20
Nodo 15	19108.33
Nodo 16	17942.62
Nodo 17	17955.32
Nodo 18	18334.79
Nodo 19	18355.19

Tabla 3.3 Demanda Media - Ingreso de Costos en WINQSB

Fuente: Los Autores

2. Resultados de costos y ruta óptima del recorrido del nodo 1 al nodo 20

La ventana siguiente presenta la iteración que realiza el programa entre los nodos de la malla en sus diferentes etapas presentando la mejor trayectoria para formar la ruta óptima de costo mínimo de producción para el Ciclo Diario de Despacho de Demanda Media.

11-19-2010 23:58:29	Stage	From Input State	To Output State	Distance	Distance to Node20	Status
1	1	Node1	Node3	13.688,42	136.787,97	Optimal
2	2	Node2	Node14	19.374,33	123.885,74	
3	2	Node3	Node14	18.588,13	123.099,55	Optimal
4	2	Node4	Node14	18.601,32	123.112,73	
5	2	Node5	Node14	18.600,79	123.112,20	
6	2	Node6	Node14	18.621,19	123.132,60	
7	3	Node7	Node16	95.430,24	113.372,86	
8	3	Node8	Node16	92.621,58	110.564,20	
9	3	Node9	Node16	93.154,32	111.096,94	
10	3	Node10	Node16	90.193,88	108.136,50	
11	3	Node11	Node16	92.515,86	110.458,48	
12	3	Node12	Node16	89.250,72	107.193,34	
13	3	Node13	Node16	90.066,22	108.008,84	
14	3	Node14	Node17	86.556,09	104.511,41	Optimal
15	4	Node15	Node20	19.108,33	19.108,33	
16	4	Node16	Node20	17.942,62	17.942,62	
17	4	Node17	Node20	17.955,32	17.955,32	Optimal
18	4	Node18	Node20	18.334,79	18.334,79	
19	4	Node19	Node20	18.335,19	18.335,19	
	From Node1	To Node20	Minimum	Distance =	136.787,97	CPU = 0,00

Fig. 3.3 C Presentación de la Ruta Óptima con su respectivo Costo

Fuente: Los Autores

3. Recorrido de la Ruta Óptima

En la Fig. 3.3 D presenta los nodos más apropiados en el recorrido de pasar del Nodo 1 estado 1 al Nodo 20 del estado 5, en este caso indica la trayectoria que se deberá trazar desde el Nodo 1, Nodo 3, Nodo 14, Nodo 17 y Nodo 20, también se observa un valor de **136.787,97 dólares**. Este valor es el costo de producir con esta trayectoria los diferentes valores de carga en el Despacho Diario de Demanda Media.

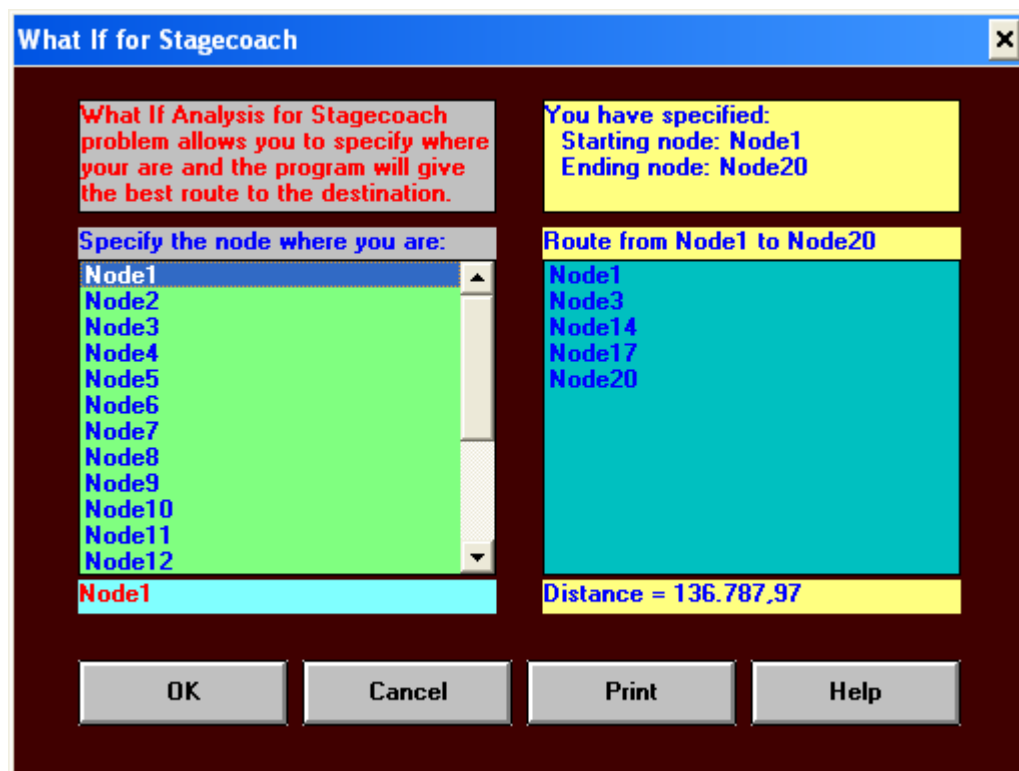


Fig. 3.3 D Presentación de Nodos para la Ruta Óptima en el Recorrido

Fuente: Los Autores

3.4 DESPACHO HORARIO DEMANDA BAJA

En la Figura 3.4 A se muestra el Cronograma de Despacho Horario durante una Demanda Baja de Generación.

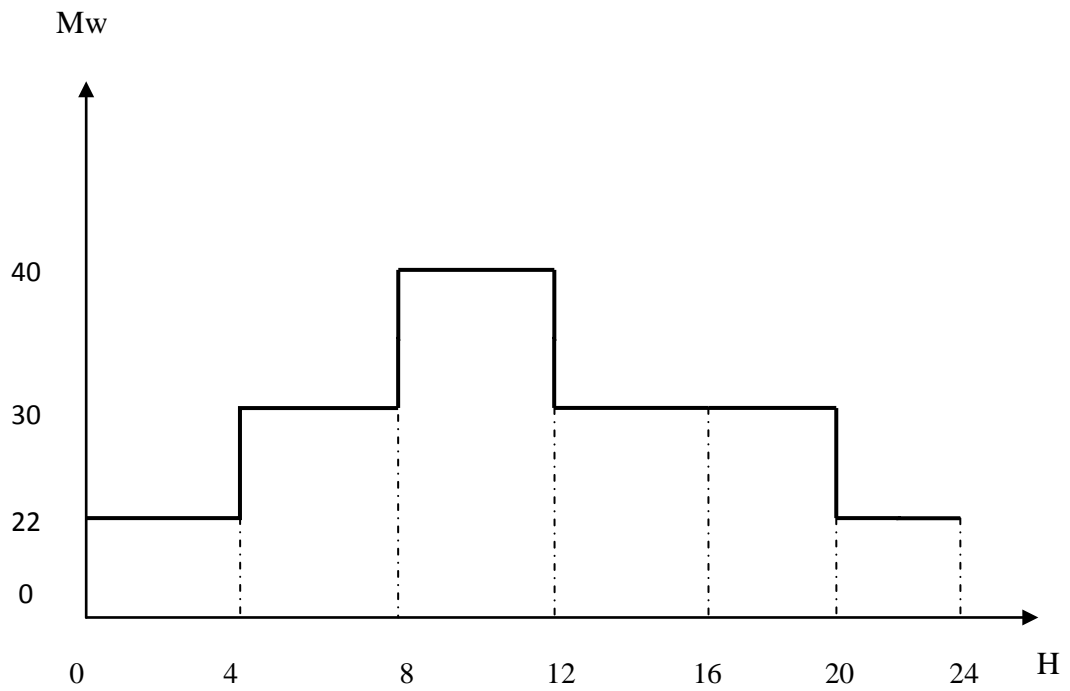


Fig. 3.4 A Cronograma de Despacho Horario de Demanda Baja

Fuente: Los Autores

La Figura 3.4 B denota las posibles trayectorias que se utilizan para cumplir con la demanda requerida en los diversos periodos de tiempo del Despacho Horario, desde luego con la Programación Dinámica se obtendrá la ruta óptima. (Menor costo para cumplir con el Despacho Horario).

En el gráfico se obtiene una malla de 5 etapas del ciclo de carga y el costo de producción está situado dentro de cada nodo, cada nodo representa un número de equipos generando un valor de carga a un costo de producción determinado dependiendo en la etapa en que se encuentre.

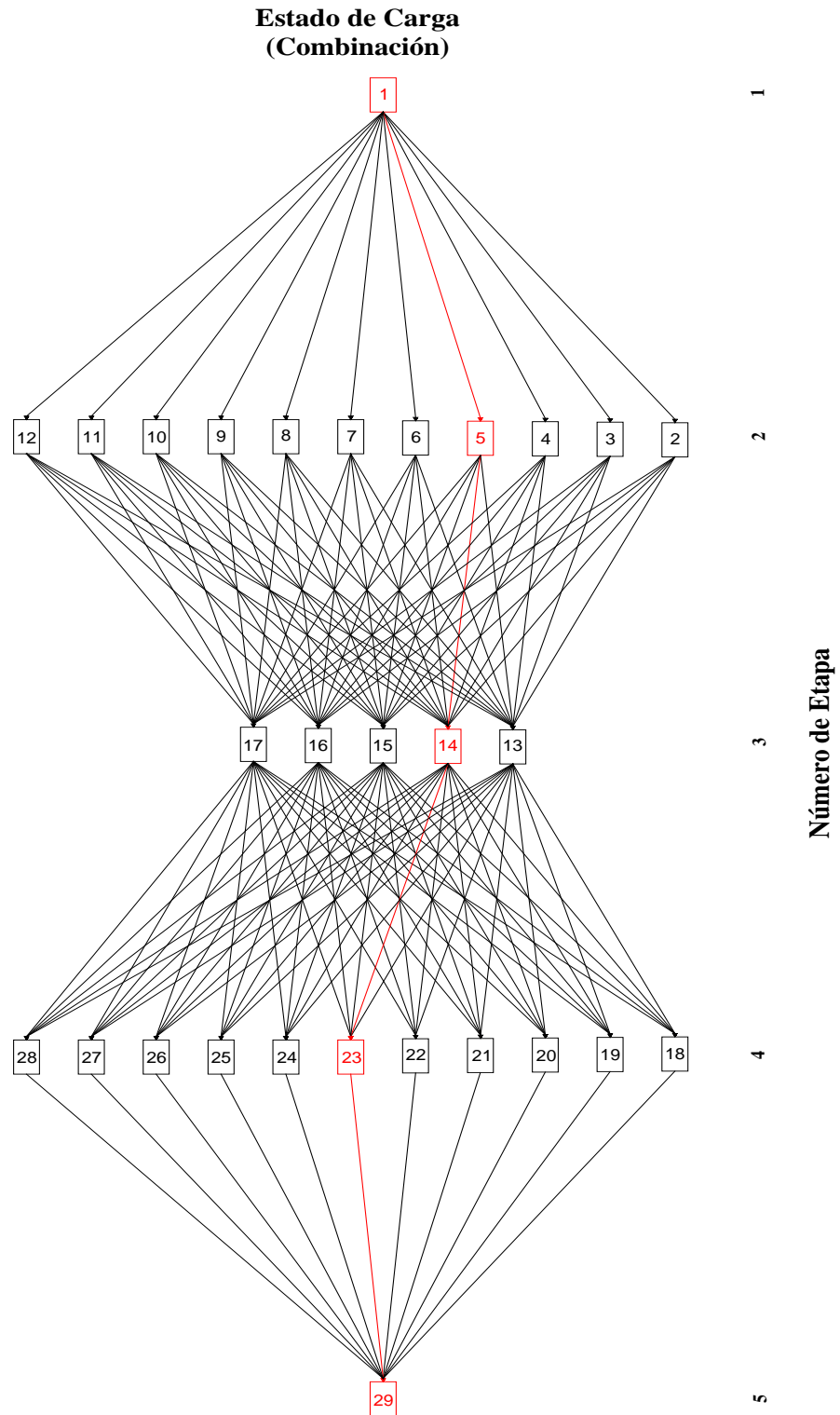


Fig. 3.4 B Rutas Posibles para la Programación de Unidades

Fuente: Los Autores

1 Tabla de Ingreso de Costos en WINQSB

Desde/A	Nodo 2	Nodo 3	Nodo 4	Nodo 5	Nodo 6	Nodo 7
Nodo 1	10461.16	10299.66	10298.16	10136.66	10299.16	10137.66

Desde/A	Nodo 8	Nodo 9	Nodo 10	Nodo 11	Nodo 12
Nodo 1	10136.16	10679.19	10517.66	10516.16	10517.16

Desde/A	Nodo 13	Nodo 14	Nodo 15	Nodo 16	Nodo 17
Nodo 2	15285.347	15503.347	15502.347	15501.347	15503.347
Nodo 3	14594.04	14432.54	14811.04	14810.04	14812.04
Nodo 4	14607.9	14825.9	14444.90	14823.9	14825.9
Nodo 5	13849.929	13688.429	13686.929	14065.929	14067.929
Nodo 6	14607.1	14825.1	14824.1	14445.10	14825.1
Nodo 7	13849.44	13687.94	14066.44	13687.44	14067.44
Nodo 8	13862.75	14080.75	13699.75	13700.75	14080.75
Nodo 9	14623.319	14841.319	14840.319	14839.319	14461.819
Nodo 10	13869.39	13707.39	14085.89	14084.89	13707.39
Nodo 11	13882.23	14100.23	13719.23	14098.23	13720.33
Nodo 12	13880.03	14098.03	14097.03	13718.03	13718.53

Desde/A	Nodo 18	Nodo 19	Nodo 20	Nodo 21	Nodo 22	Nodo 23
Nodo 13	18673.33	18891.33	18890.33	19108.33	18889.33	19107.33
Nodo 14	17887.128	17725.628	18104.128	17942.628	18103.128	17941.628
Nodo 15	17900.32	18118.32	17737.32	17898.82	18116.32	18334.32
Nodo 16	17899.79	18117.79	18116.79	18334.79	17737.79	17955.79
Nodo 17	17920.19	18138.19	18137.19	18355.19	18136.19	18354.19

Desde/A	Nodo 24	Nodo 25	Nodo 26	Nodo 27	Nodo 28
Nodo 13	19106.33	18891.33	19109.33	19108.33	19107.33
Nodo 14	18320.128	18105.128	17943.628	18322.128	18322.128
Nodo 15	17953.32	18118.32	18336.32	17955.32	18334.32
Nodo 16	17954.79	18117.79	18335.79	18334.79	17955.79
Nodo 17	18353.19	17758.69	17976.69	17975.69	17974.69

Desde/A	Nodo 29
Nodo 18	31221.69
Nodo 19	29298.08
Nodo 20	29323.8
Nodo 21	27266.85
Nodo 22	29325.2
Nodo 23	27051.88
Nodo 24	27293.5
Nodo 25	29736.13
Nodo 26	27686.28
Nodo 27	27710.96
Nodo 28	27709.56

Tabla 3.4 Demanda Baja - Ingreso de Costos en WINQSB

Fuente: Los Autores

2 Resultados de costos y ruta óptima del recorrido del nodo 1 al nodo 29

La Figura 3.4 C presenta la iteración que realiza el programa entre los nodos de la malla en sus diferentes etapas presentando la mejor trayectoria para formar la ruta óptima de costo mínimo de producción para el Ciclo Diario de Despacho de Demanda Baja.

11-20-2010 17:33:43	Stage	From Input State	To Output State	Distance	Distance to Node29	Status
1	1	Node1	Node5	10.136,66	68.818,59	Optimal
2	2	Node2	Node14	15.503,35	60.496,86	
3	2	Node3	Node14	14.432,54	59.426,05	
4	2	Node4	Node15	14.444,90	59.610,57	
5	2	Node5	Node14	13.688,43	58.681,94	Optimal
6	2	Node6	Node16	14.445,10	59.452,77	
7	2	Node7	Node14	13.687,94	58.681,45	
8	2	Node8	Node16	13.700,75	58.708,42	
9	2	Node9	Node14	14.841,32	59.834,83	
10	2	Node10	Node14	13.707,39	58.700,90	
11	2	Node11	Node15	13.719,23	58.884,90	
12	2	Node12	Node16	13.718,03	58.725,70	
13	3	Node13	Node23	19.107,33	46.159,21	
14	3	Node14	Node23	17.941,63	44.993,51	Optimal
15	3	Node15	Node21	17.898,82	45.165,67	
16	3	Node16	Node23	17.955,79	45.007,67	
17	3	Node17	Node23	18.354,19	45.406,07	
18	4	Node18	Node29	31.221,69	31.221,69	
19	4	Node19	Node29	29.298,08	29.298,08	
20	4	Node20	Node29	29.323,80	29.323,80	
21	4	Node21	Node29	27.266,85	27.266,85	
22	4	Node22	Node29	29.325,20	29.325,20	
23	4	Node23	Node29	27.051,88	27.051,88	Optimal
24	4	Node24	Node29	27.293,50	27.293,50	
25	4	Node25	Node29	29.736,13	29.736,13	
26	4	Node26	Node29	27.686,28	27.686,28	
27	4	Node27	Node29	27.710,96	27.710,96	
28	4	Node28	Node29	27.709,56	27.709,56	
	From Node1	To Node29	Minimum	Distance =	68.818,60	CPU = 0,01

Fig. 3.4 C Presentación de la Ruta Óptima con su respectivo Costo

Fuente: Los Autores

3 Recorrido de la Ruta Óptima

En la Fig. 3.4 D presenta cuales nodos son los más apropiados en el recorrido de pasar del Nodo 1 estado 1 al Nodo 29 del estado 5, en este caso indica la trayectoria que se deberá trazar la cual es Nodo 1, Nodo 5, Nodo 14, Nodo 23 y Nodo 29, también se observa un valor de **68.818,59 dólares**. Este valor es el costo de producir con esta trayectoria los diferentes valores de carga en el Despacho Diario de Demanda Baja.

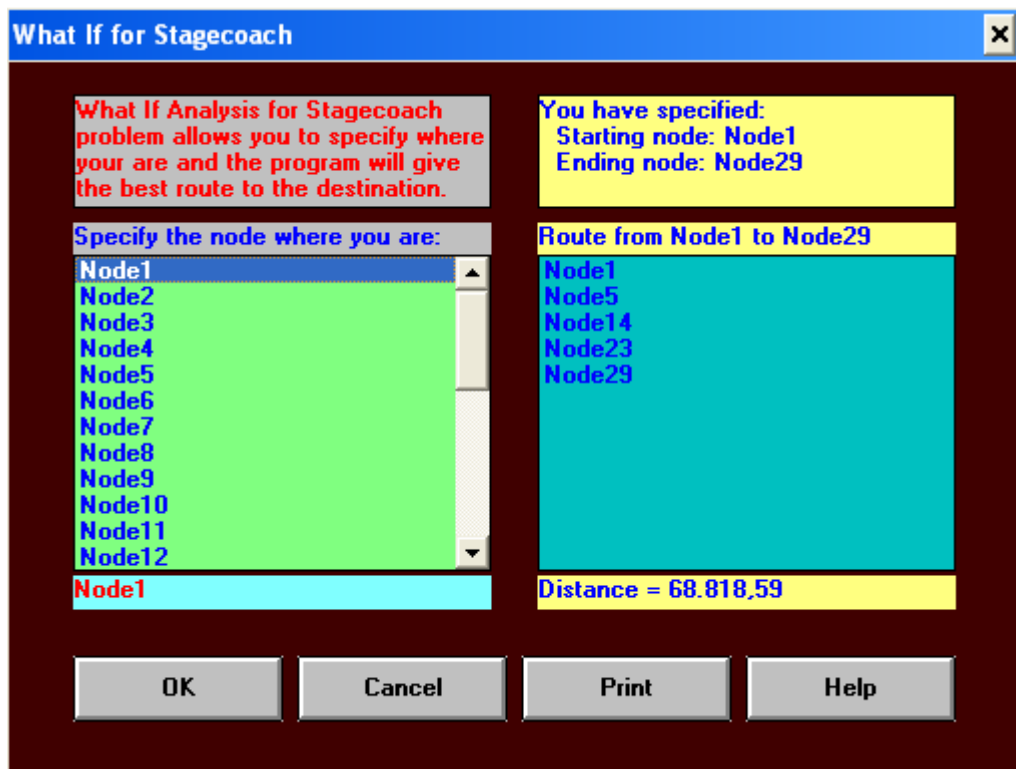


Fig. 3.4 D Presentación de Nodos para la Ruta Óptima en el Recorrido

Fuente: Por los Estudiantes

CONCLUSIONES

En este trabajo se aplica una estrategia de Despacho Económico y Programación de Unidades de la Central la cual permitirá determinar la generación adecuada en cada una de las etapas del periodo del Despacho con el fin de atender una cierta demanda en cada etapa buscando minimizar el costo global de operación que emite cada uno de los generadores que intervienen en el sistema, con un nivel de confiabilidad aceptable y cumpliendo con tres restricciones técnicas: balance de potencia, límites de capacidad de generadores y pérdidas contemplando una configuración de la red eléctrica. Cabe mencionar que el modelo no minimiza las pérdidas en las líneas solo minimiza el costo total de operación que es el que nos interesa para una buena planeación de la Generación en la Central.

La estrategia observa otras alternativas y realiza un análisis comparativo para seleccionar el mejor Despacho Económico con mayores justificaciones. Estas alternativas son generadas de manera sistemática variando el panorama de planeación para observar su efecto en las soluciones para cada etapa. Esto es importante ya que el tamaño del horizonte de planeación, así como el tamaño de las etapas, tienen su influencia en la calidad de las alternativas de planeación.

La estrategia se aplicó para el sistema de generación presentada. De los resultados se concluye lo siguiente:

- La metodología utilizada en este trabajo da como resultado el ahorro económico en el despacho de fuentes de generación, así entonces los resultados arrojados muestran claramente que se pueden minimizar los costos de operación ya que un despacho económico bien realizado disminuirá y mantendrá los límites sin violarlos, así como el costo al generar la energía eléctrica.
- Es importante el minimizar los costos de operación, puesto que el objetivo principal del despacho económico es satisfacer la demanda eléctrica al menor costo y proveer del servicio bajo las reglas de continuidad y flexibilidad.

- Cada generador que intervenga en el despacho económico aporta cierta potencia a las pérdidas de las líneas de transmisión, es por esto que cuando existen pérdidas en las líneas los generadores aunque sean muy caros deben aportar potencia para poder satisfacer las pérdidas y las demandas en los nodos.
- El modelo computacional da validez y muestra como los Generadores aportan la potencia necesaria a la red para así satisfacer la demanda del sistema.
- Con la ayuda del modelo computacional que se ha desarrollado en este proyecto se sabrá cuánto es el costo incremental de la Central así como el costo por hora de las unidades que deberán entrar en servicio cuando se programe el despacho horario.

La estrategia propuesta puede adaptarse satisfactoriamente al número de etapas en el cual es dividido el horizonte de planeación así como a las exigencias técnicas y económicas de los sistemas de distribución.

Los resultados obtenidos en este proyecto, demuestran que la estrategia propuesta es prometedora para el Desarrollo del Despacho así como el de Programación de Unidades, ya que se obtienen buenos resultados con la nueva estrategia y no solo dan pauta a encontrar una solución óptima sino que si no encuentra está dada como alternativa a volver a formular el modelo y encontrar una solución factible.

Finalmente, el **CONELEC** quien es el encargado de elaborar el Plan Maestro de Electrificación, garantiza la continuidad del suministro de energía eléctrica, y en particular la de Generación basado en el aprovechamiento óptimo de los recursos naturales. Dicta regulaciones a las cuales deberán ajustarse los **GENERADORES**, tales regulaciones se darán en materia de seguridad, protección ambiental, normas y procedimientos técnicos que determinen la Ley. Además las Centrales de Generación están obligadas a proporcionar al **CONELEC**, la información Técnica y Financiera que le sea requerida.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) CONELEC Regulaciones, Decreto Ejecutivo 591, *Reglamento de Despacho y Operación del SNI*, Reforma Noviembre 2006.
- (2) CONELEC Regulaciones, Resolución No. 0125/00 *Procedimientos de Despacho y Operación (Versión 2.0)*, Agosto 2000.
- (3) GRAINER John J. y STEVENSON William D. Jr., *Análisis de Sistema de Potencia*, Universidad del Estado del Norte de California, USA 1985.
- (4) NAVARRO PÉREZ M.C. Roberto, 2^{da} Edición, *Planeación de la Operación y Pre Despacho*.
- (5) NEUENSWANDER, John R., *Modern Power System*, Universidad de Detroit, USA 1974.
- (6) WOOD Allen J. y WOLLENBERG Bruce F., *Power Generation Operation & Control*, Power Technologies, Inc. Schenectady, New York 1966.

ANEXO A

GLOSARIO DE TÉRMINOS

GENERADOR

Máquinas destinadas a transformar la energía mecánica en eléctrica.

POTENCIA

Se define como la cantidad de trabajo por unidad de tiempo realizado por una corriente eléctrica.

POTENCIA MÁXIMA

Es la máxima capacidad en que un generador puede trabajar.

POTENCIA MÍNIMA

Es la mínima capacidad en que un generador puede trabajar.

DESPACHO ECONÓMICO

El despacho económico consiste en usar los recursos energéticos (térmicos, hidráulicos, solares, eólicos, etc.) disponibles para la generación de energía eléctrica en una forma óptima de tal manera que cubra la demanda de electricidad a un mínimo costo y con un determinado grado de confiabilidad, calidad y seguridad.

Este consiste también en conocer la cantidad de potencia que debe de suministrar cada generador para satisfacer una condición de demanda de los consumidores minimizando los costos de generación del sistema eléctrico sujeto a diferentes tipos de restricciones operativas de las plantas de generación tales como: rapidez para tomar la carga en el sistema, límites de generación, tipos de combustible, etc.

Sin dejar a un lado las restricciones de transmisión y seguridad de la red eléctrica, esto es como una sintonización de todos los generadores operando a un mismo costo incremental.

COSTO INCREMENTAL

La curva de costo incremental representa la pendiente o derivada de la característica **Entrada – Salida (Millones de BTU/hrs vs Kw)**, indica el incremento en costo ó en consumo de combustible que se requiere para un incremento en la potencia de salida. Conociendo la Curva de Entrada – Salida se puede encontrar la característica de costo incremental derivando la relación de Entrada – Salida.

La característica de esta curva es ascendente pero en otros casos puede que la curva sea descendente, ya que para cada aumento de producción corresponde un aumento de combustible.

La curva de costos incrementales es usada en estudios de Despacho Económico de generación y en la planeación de sistemas de potencia. **Esta curva también es utilizada para fijar precios de venta de energía en algunas centrales.**

Su ecuación matemática se la representa de la siguiente manera,

$$\lambda = \frac{dF_n}{dP_n} = \frac{\$}{Kwhr}$$

Donde,

F_n = entrada a la unidad n , en dólares por hora

P_n = salida de la unidad n , en kilovatios

Si varias unidades generadoras dentro de una misma planta van a operar juntas en el mejor modo Económico. El criterio básico para esta operación es que cada unidad opere en el mismo valor de costo incremental. Su ecuación matemática se la representa de la siguiente manera,

$$\lambda = \frac{dF_1}{dP_1} = \frac{dF_2}{dP_2} = \dots = \frac{dF_n}{dP_n}$$

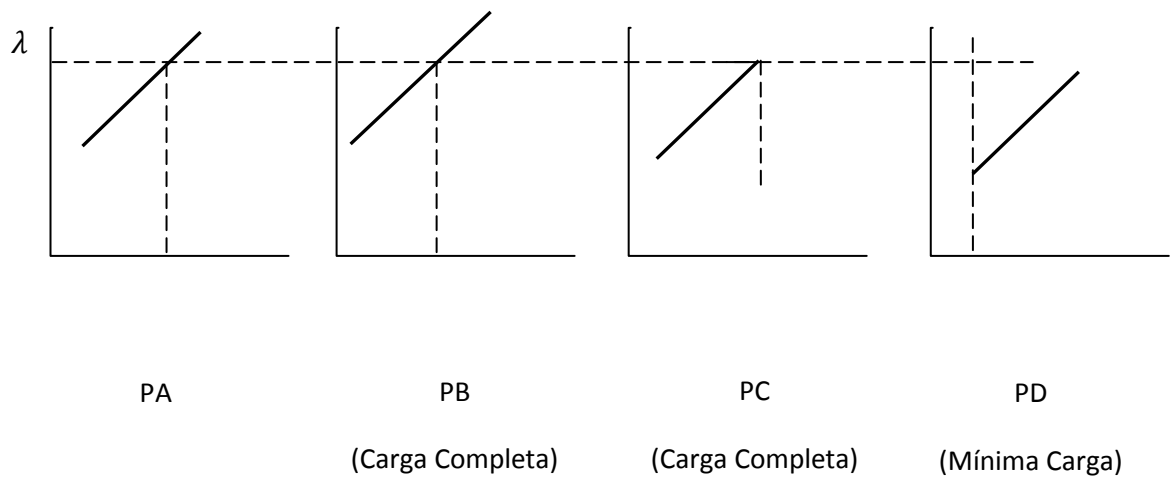


Fig. A Demostración Económica entre cuatro Unidades Generadoras

Fuente: Modern Power System, NEUENSWANDER, John R.

En esta figura se da la demostración de la distribución Económica de carga entre cuatro unidades generadoras.

$$P_{total} = P_A + P_B + P_C + P_D$$

Una unidad con un rango de costo incremental como está descrito en la curva de la unidad C, debería estar con su carga completa antes de que las otras unidades encuentren sus niveles de carga mínima, al menos desde el punto de vista de la Economía. Similarmente, la unidad D, con un alto rango de costo incremental, sería usada como reserva, teniendo la carga al mínimo nivel. Por lo descrito anteriormente es satisfactorio considerar un valor de λ como el total de salida de la planta.

Centrales Hidroeléctricas

Las centrales hidroeléctricas utilizan la energía potencial del agua como fuente primaria para generar electricidad. Estas plantas se localizan en sitios en donde existe una diferencia de altura entre la central eléctrica y el suministro de agua.

De esta forma, la energía potencial del agua se convierte en energía cinética que es utilizada para impulsar el rodete de la turbina y hacerla girar para producir energía mecánica. Acoplado a la flecha de la turbina se encuentra el generador, que finalmente se convierte en energía eléctrica.

Una característica importante es la imposibilidad de su estandarización, debido a la heterogeneidad de los lugares en donde se dispone de aprovechamiento hidráulico, dando lugar a una gran variedad de diseños, métodos constructivos, tamaños y costos de inversión. Las centrales hidroeléctricas se pueden clasificar de acuerdo con dos diferentes criterios fundamentales:

- 1.1 Por su tipo de embalse.
- 2.1 Por su altura de la caída de agua.

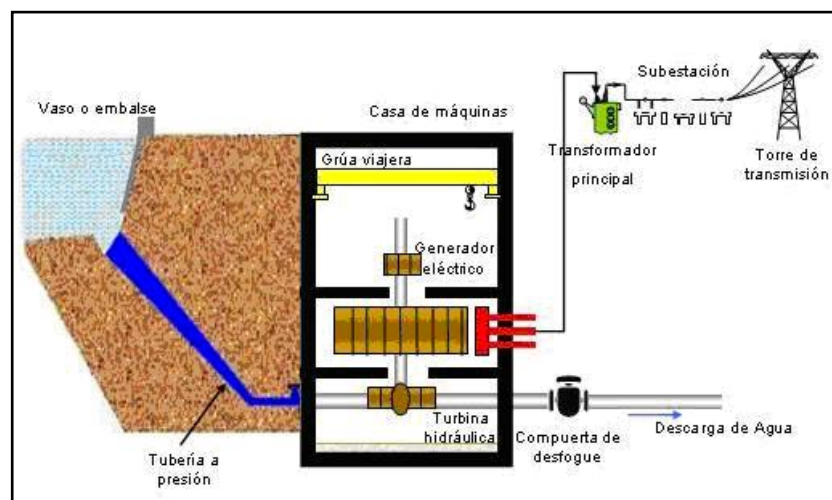


Fig. B Esquema de una Central Hidroeléctrica

Fuente: Modelo de las Unidades Termoeléctricas, Isaías Guillen Moya

Centrales Eólicas

Este tipo de central convierte la energía del viento en electricidad mediante una aeroturbina que hace girar un generador. Es decir, aprovecha un flujo dinámico de duración cambiante y con desplazamiento horizontal, de donde resulta que la cantidad de energía obtenida es proporcional al cubo de la velocidad del viento.

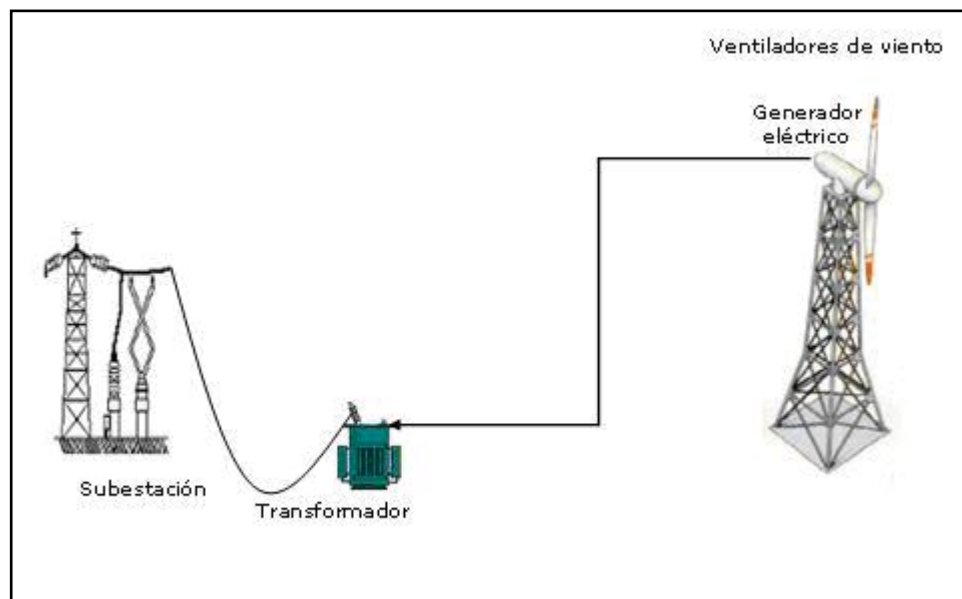


Fig. C Esquema de una Central Eólica

Fuente: Modelo de las Unidades Termoeléctricas, Isaías Guillen Moya

Centrales Termoeléctricas Convencionales

Este tipo de centrales puede utilizar como fuente de energía primaria, combustible fósil o gas natural. Se muestra en forma esquemática el funcionamiento de una central termoeléctrica, en este puede observarse que el generador de vapor transforma el poder calorífico del combustible en energía térmica, la cual es aprovechada para llevar el agua de la forma líquida a la fase de vapor. Este vapor, ya sobre calentado, es conducido a la turbina donde su energía cinética es convertida en mecánica, misma que es transmitida al generador para producir energía eléctrica.

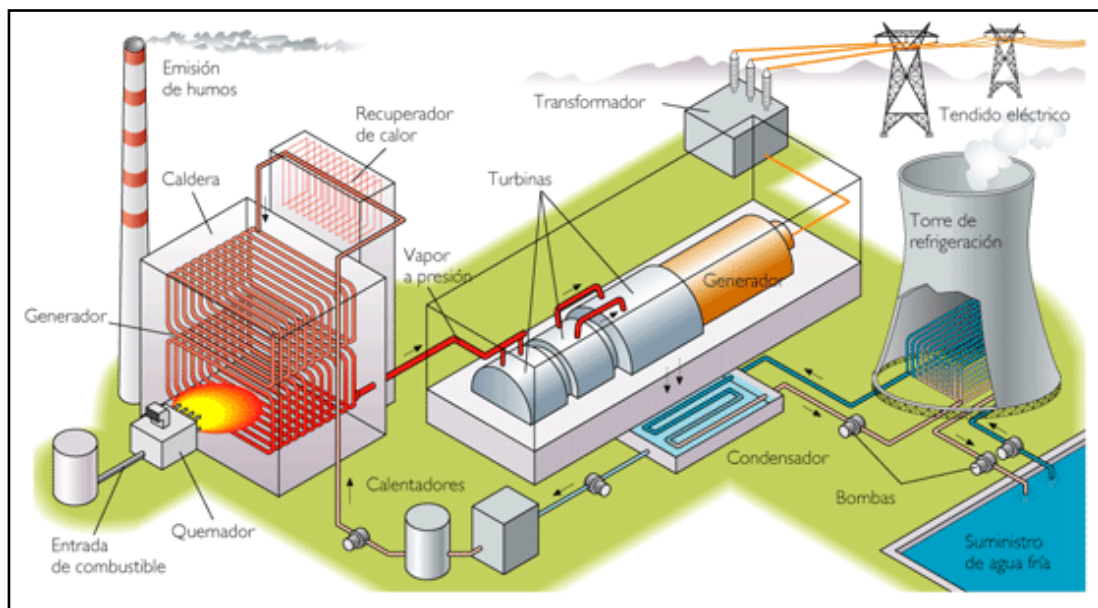


Fig. D Esquema de una Central Térmica a Vapor

Fuente: Modelo de las Unidades Termoeléctricas, Isaías Guillen Moya

Unidades Turbo-gas

La generación de energía eléctrica en las unidades turbo-gas, se logra cuando el sistema toma aire de la atmósfera a través de un filtro y una entrada después al compresor. El aire es comprimido, aquí antes de llegar a la cámara de combustión, donde el combustible, inyectado en las toberas, se mezcla con el aire altamente comprimido, quemándose posteriormente. De ello resultan gases de combustión calientes los cuales al expandirse hacen girar la turbina de gas. El generador, acoplado a la turbina de gas, transforma esta energía mecánica en energía eléctrica. Se muestra esquemáticamente el funcionamiento de este ciclo; como se observa los gases de combustión, después de mover la turbina, son descargados directamente a la atmósfera. Estas unidades se emplean como combustible, gas natural o diesel en forma alternativa y en los modelos avanzados también pueden quemar combustible fósil. Es una máquina preparada para ello, donde el cambio de combustible puede realizarse en forma automática en cualquier momento; este cambio tiene efectos sobre la potencia y la eficiencia.

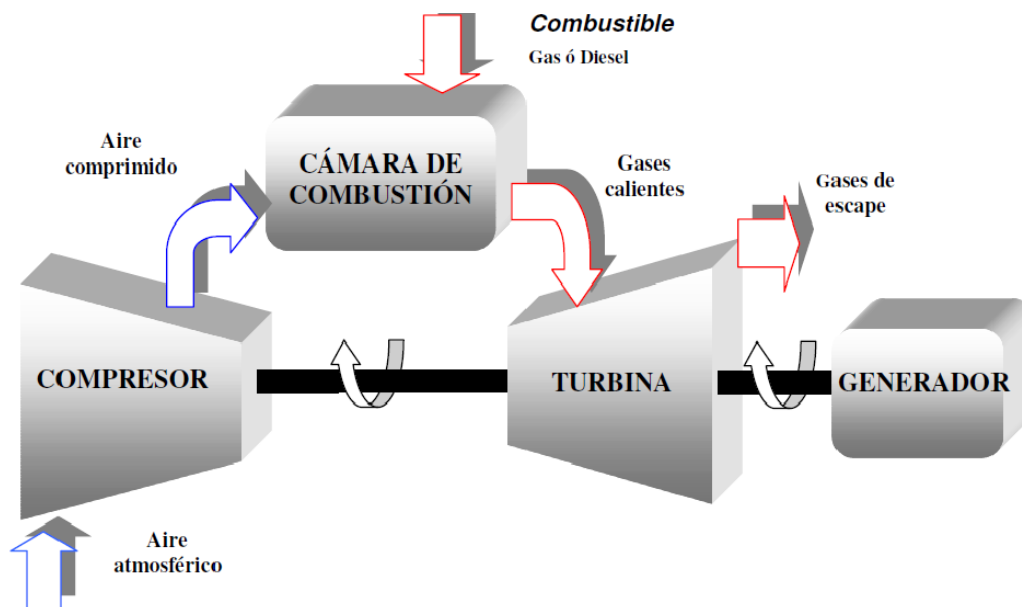


Fig. E Esquema de una Central Térmica a Gas

Fuente: Modelo de las Unidades Termoeléctricas, Isaías Guillen Moya

Centrales de Ciclo Combinado

Las centrales de ciclo combinado están integradas por dos tipos de diferentes unidades generadoras: turbo-gas y vapor.

Una vez terminado el ciclo térmico de la unidad turbo-gas, los gases desechados poseen un importante contenido energético, el cual manifiesta en su temperatura. Esta energía es utilizada en un recuperador de calor para aumentar la temperatura del agua y llevarla a la fase de vapor, donde es aprovechada para generar energía eléctrica, siguiendo un proceso semejante al descrito para las plantas termoeléctricas convencionales.

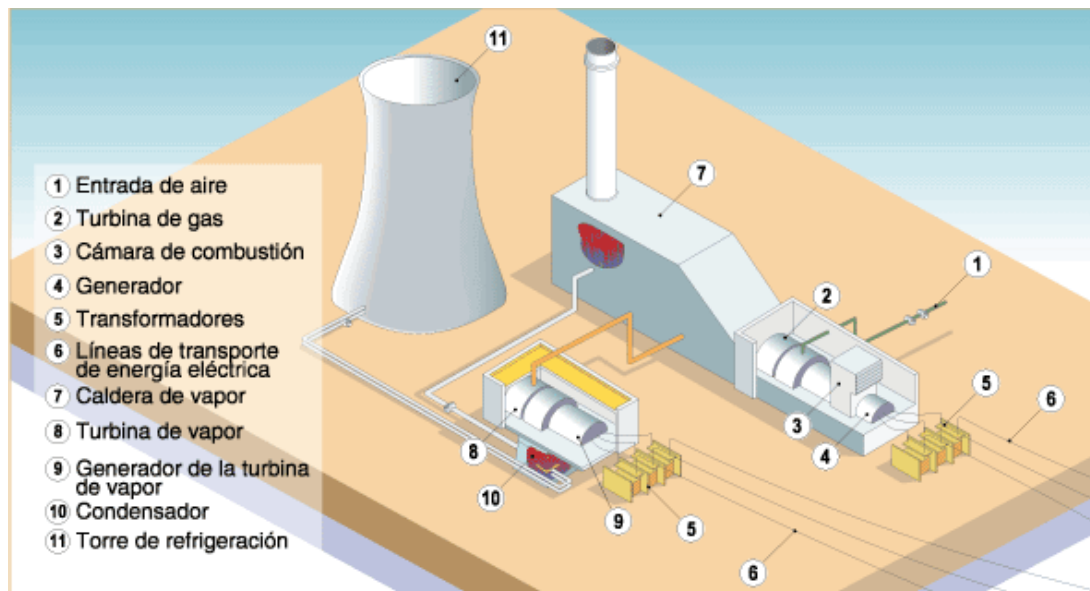


Fig. F Esquema de una Central de Ciclo Combinado

Fuente: Modelo de las Unidades Termoeléctricas, Isaías Guillen Moya

ANEXO B

Método de Mínimos Cuadrados ponderados (MMCP) para determinar los Coeficientes a, b y c del Modelo.

Para determinar los coeficientes a, b y c, se requiere por lo menos 3 mediciones de régimen térmico. Los coeficientes se ajustan para minimizar el error entre el modelo y las mediciones de Régimen Térmico (consumo específico).

El error cuadrático medio ϵ con n mediciones, se define como:

$$\epsilon = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{a}{g_i} + b + c g_i - \frac{q_i}{g_i} \right)^2$$

Minimizando el error se tienen las siguientes tres condiciones:

Primera condición

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial a} = 0$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial a} = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{a}{g_i} + b + c g_i - \frac{q_i}{g_i} \right) \left(\frac{1}{g_i} \right) = 0$$

$$a \sum_{i=1}^n \frac{1}{g_i^2} + b \sum_{i=1}^n \frac{1}{g_i} + c \sum_{i=1}^n 1 = \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{g_i^2}$$

Segunda Condición

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial b} = 0$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial b} = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{a}{g_i} + b + c g_i - \frac{q_i}{g_i} \right) = 0$$

$$a \sum_{i=1}^n \frac{1}{g_i} + b \sum_{i=1}^n 1 + c \sum_{i=1}^n g_i = \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{g_i}$$

Tercera Condición

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial c} = 0$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial c} = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{a}{g_i} + b + c g_i - \frac{q_i}{g_i} \right) (g_i) = 0$$

$$a \sum_{i=1}^n 1 + b \sum_{i=1}^n g_i + c \sum_{i=1}^n g_i^2 = \sum_{i=1}^n q_i$$

Las ecuaciones anteriores definen un sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas, cuya solución se expresa como:

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \frac{1}{g_i^2} & \sum_{i=1}^n \frac{1}{g_i} & n \\ \sum_{i=1}^n \frac{1}{g_i} & n & \sum_{i=1}^n g_i \\ n & \sum_{i=1}^n g_i & \sum_{i=1}^n g_i^2 \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{g_i^2} \\ \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{g_i} \\ \sum_{i=1}^n q_i \end{bmatrix}$$

ANEXO C

PROGRAMACIÓN DE UNIDADES

Dado que la carga total del sistema de potencia varía a lo largo del día y alcanza un valor pico diferente de un día para otro, la compañía eléctrica tiene que decidir previamente cuáles generadores se deben arrancar y cuándo deben conectarse a la red (y la secuencia en que las unidades que se encuentren operando deben ser apagadas y por cuánto tiempo). El procedimiento computacional para tomar esas decisiones se conoce con el nombre de PROGRAMACIÓN DE UNIDADES y cuando una unidad se programa para conexión se dice que está COMPROMETIDA. Aquí se considera la demanda de unidades de combustible fósiles que tienen diferentes costos de producción debido a sus diferentes eficiencias, diseños y tipos de combustibles. La economía de operación es el factor de mayor importancia, aunque existen muchos otros factores prácticos para determinar cuándo se programan las unidades para encenderse o apagarse y así satisfacer las necesidades operativas del sistema. A diferencia de los Despachos Económicos que distribuyen económicamente la carga real del sistema conforme se eleva a las diferentes unidades que ya están en operación, la programación de unidades planea cuál es el mejor conjunto de unidades disponibles para alimentar la carga predicha o estimada del sistema en un determinado periodo de tiempo. Para desarrollar el concepto de programación de unidad, se considerará el problema de programar unidades térmicas de combustibles fósiles, en donde los costos agregados (tales como los costos de encendido, de combustible y de apagado) se minimizan en un ciclo de carga diaria. Los principios fundamentales de esto se explican más fácilmente si se desprecian las pérdidas de transmisión en el sistema. Sin pérdidas, la red de transmisión es equivalente a una sola barra de la planta a la que se conecta todos los generadores y todas las cargas, y la salida de la planta P_{gT} es, entonces, igual a la carga total del sistema P_D .

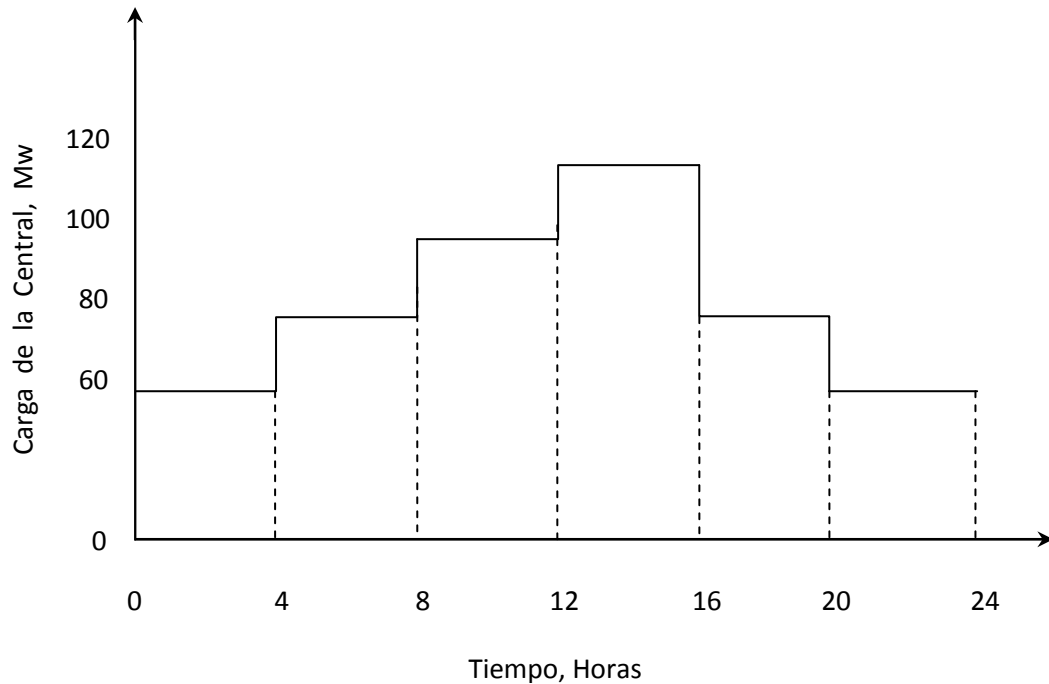


Fig. G Niveles de Carga para un Despacho Diario de Carga
Fuente: POWER GENERATION OPERATION & CONTROL

Se subdivide el día de 24 horas en intervalos o etapas discretas, y la carga predicha del sistema se considera constante en cada intervalo, de la manera ejemplificada en la Figura G. El procedimiento de programación de unidad busca entonces la combinación factible más económica de unidades generadoras para alimentar a la carga estimada del sistema en cada etapa del ciclo de carga.

El sistema de potencia con K unidades generadoras (todas diferentes) debe tener al menos una unidad operando para alimentar la carga del sistema, que nunca es cero, en el ciclo de carga diaria. Si cada unidad se puede considerar como conectada (designada por 1) o desconectada (denotada por 0), hay $2^k - 1$ combinaciones posibles a ser examinadas en cada etapa del periodo de estudio. Por ejemplo, si $K = 4$, las 15 combinaciones teóricamente posibles para cada intervalo son:

Combinaciones

Unidad	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}
1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0
2	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0
3	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0
4	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1

Tabla. L1 Número de Combinaciones Posibles

Fuente: POWER GENERATION OPERATION & CONTROL

Donde X_i es la combinación i de las cuatro unidades. Por supuesto, no todas las combinaciones son posibles debido a las restricciones impuestas por el nivel de carga y otros requisitos prácticos de la operación del sistema. Por ejemplo, una combinación de unidades, con capacidad total menor de 1400 Mw, no puede alimentar una carga de 1400 Mw o mayor; esta combinación no es factible y puede despreciarse en cualquier intervalo de tiempo en que ocurra ese nivel de carga. Para llegar a la formulación matemática del problema de la programación de unidad, sea

$$X_i(K) = \text{combinaciones } X_i \text{ del intervalo } K$$

Entonces, $X_j(K + 1)$ representa la combinación X_j del intervalo $(K + 1)$. Si K es igual a 1 e i es igual a 9 en el ejemplo de cuatro unidades, la combinación $X_9(1)$ significa que sólo las unidades 1 y 2 están operando durante el primer intervalo de tiempo. El costo de producción para suministrar la potencia en cualquier intervalo del ciclo de carga diario depende de la combinación dada X_i , el costo mínimo de producción P_i es igual a la suma de los costos de Despacho Económico de las unidades individuales. De esta manera, se designa

$$P_i(K) = \text{costo de producción mínimo de la combinación } X_i(K)$$

Entonces $P_j(K + 1)$ es el costo mínimo de producción de la combinación $X_j(K + 1)$. Además del costo de producción, el problema de programación de unidades debe también considerar el costo de transición, que es el que está asociado con el cambio de una combinación a otra de las unidades que producen la potencia.

Generalmente, se asigna un costo fijo de desconexión de una unidad que ha estado operando en el sistema porque el costo de desconexión es, por lo general, independiente del intervalo de tiempo en que la unidad ha estado operando.

Sin embargo, en situaciones prácticas el costo de conexión de una unidad depende de qué tanto tiempo ha estado apagada la unidad a partir de la operación previa. Esto era de esperarse porque la temperatura del combustible que requiere para establecer la temperatura de operación depende de la duración del enfriamiento. Para explicar de manera más sencilla el concepto de programación de unidad, se considera un costo de conexión fijo para cada unidad.

Así, el costo de transición asociado con el cambio de una combinación de unidades operando, a otra, tendrá componentes fijas de conexión y de desconexión denotadas por

$$T_{ij}(K) = \text{costo de transición de la combinación } X_i(K) \text{ a la combinación } X_j(K + 1) \\ \text{entre los intervalos } K \text{ y } K + 1$$

Si cada unidad puede ser conectada y desconectada sin incurrir en un costo de transición, entonces, desde el punto de vista económico, el problema de programar unidades a operarse en cualquier hora, puede separarse y quedar totalmente sin relación con el problema de programación en cualquier otra hora del ciclo de carga.

En concordancia, el problema de minimización de costos en una etapa está ligado a las combinaciones de las unidades seleccionadas para las otras etapas y se dice que la programación de unidad es un problema de minimización de costos con múltiples etapas o dinámico.

El proceso de decisión en múltiples etapas del problema de programación de unidad se puede reducir dimensionalmente a través de restricciones prácticas de las operaciones del sistema y por un procedimiento de búsqueda que se basa en las siguientes observaciones:

- El programa diario tiene N intervalos discretos de tiempo o etapas, cuya duración no necesariamente es igual. La etapa 1 precede a la etapa 2 y así sucesivamente hasta la etapa final N .
- Se hace la decisión para cada etapa K considerando la combinación particular de unidades que operen durante esa etapa. Éste es el subproblema de la etapa K .
- Para encontrar una solución a partir de las N decisiones, se resuelven secuencialmente N subproblemas (llamados principio de optimización), de manera que la mejor combinación de decisiones para los N subproblemas conduce a la mejor solución global del problema original.

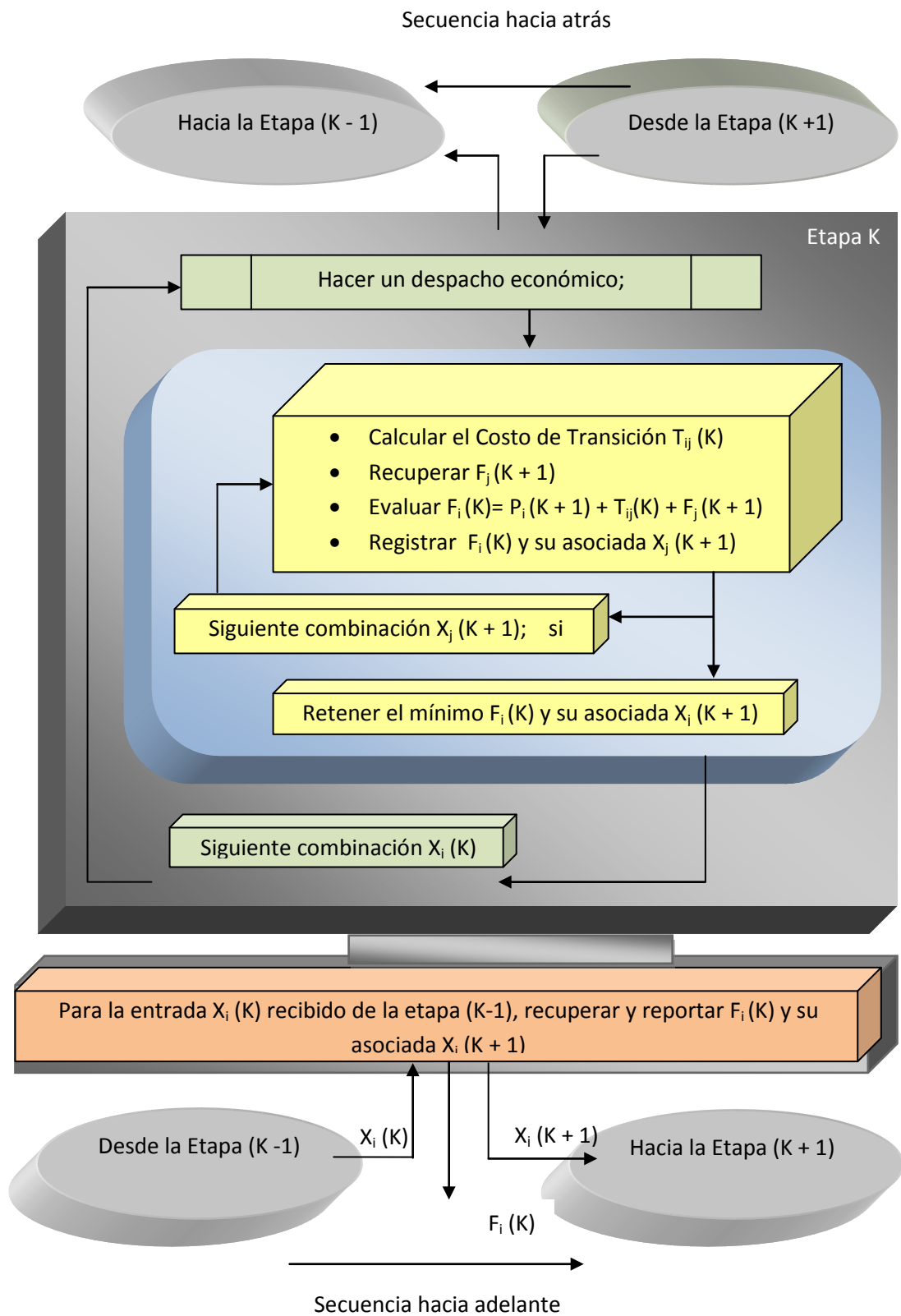


Fig. H Método de la Programación Dinámica

Fuente: POWER GENERATION OPERATION & CONTROL

Ahora, con estas condiciones se puede llegar a la siguiente fórmula recursiva la cual se utilizará para el desarrollo del problema de programación de unidades

$$F_i(K) = \min_{\{x_j(K+1)\}} \{P_i(K) + T_{ij}(K) + F_j(K + 1)\}$$

Como se presenta en el flujo del programa la solución de Programación Dinámica se la realiza con una secuencia hacia adelante o con una secuencia hacia atrás. En el siguiente gráfico se denota como la Programación Dinámica resuelve el Problema de Despacho de Unidades.

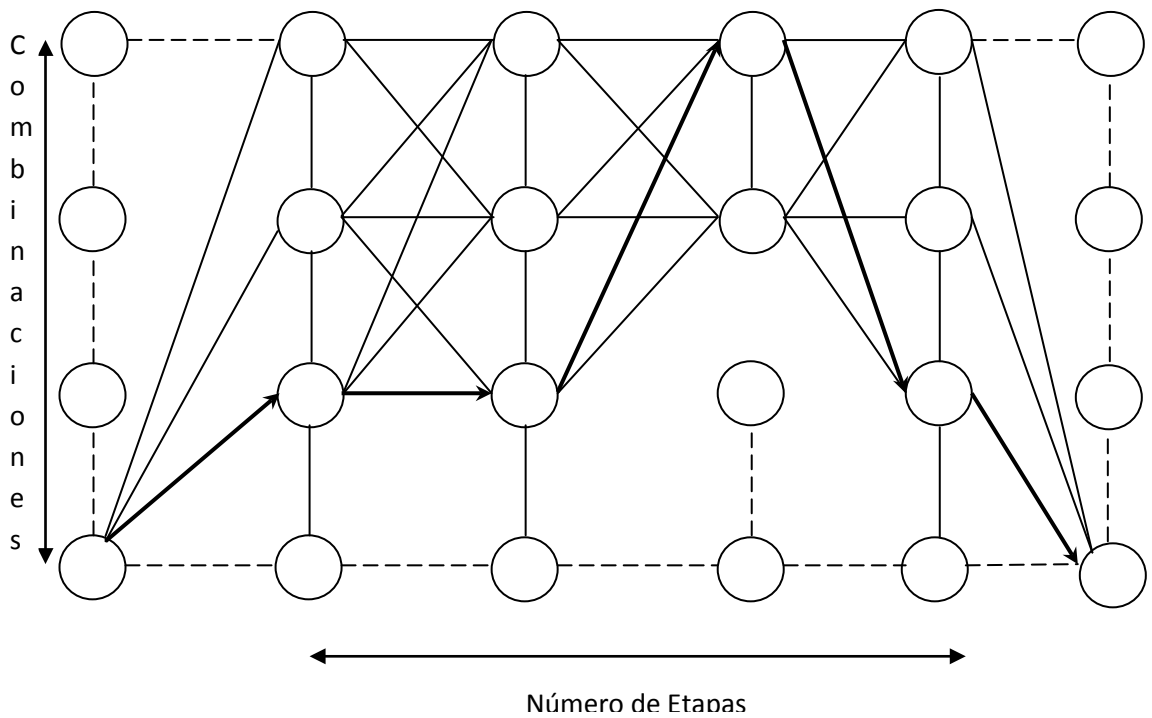


Fig. I Solución Gráfica de la Programación Dinámica

Fuente: POWER GENERATION OPERATION & CONTROL

PROGRAMACIÓN DINÁMICA CON WINQSB

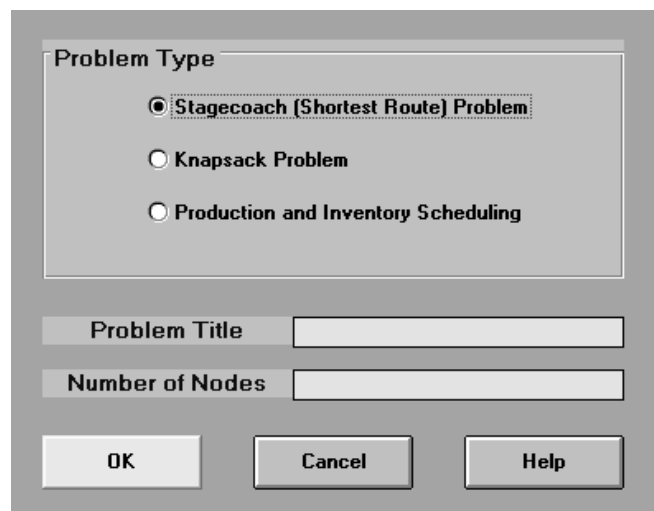
La programación dinámica es un enfoque general para la solución de problemas en los que es necesario tomar decisiones en etapas sucesivas. Las decisiones tomadas en una etapa condicionan la evolución futura del sistema, afectando a las situaciones en las que el sistema se encontrará en el futuro (denominadas estados), y a las decisiones que se plantearán en el futuro.

Conviene resaltar que a diferencia de la programación lineal, el modelado de problemas de programación dinámica no sigue una forma estándar. Así, para cada problema será necesario especificar cada uno de los componentes que caracterizan un problema de programación dinámica.

El procedimiento general de resolución de estas situaciones se divide en el análisis recursivo de cada una de las etapas del problema, en orden inverso, es decir comenzando por la última y pasando en cada iteración a la etapa antecesora. El análisis de la primera etapa finaliza con la obtención del óptimo del problema.

MODELOS DE PROGRAMACIÓN DINÁMICA

Existen tres modelos diferentes manejados por WINQSB.



The image shows a dialog box titled "Problem Type" from the WINQSB software. It contains three radio button options: "Stagecoach (Shortest Route) Problem" (which is selected), "Knapsack Problem", and "Production and Inventory Scheduling". Below the options are two input fields: "Problem Title" and "Number of Nodes". At the bottom of the dialog are three buttons: "OK", "Cancel", and "Help".

Fig. J Programación Dinámica

Fuente: Programa WINQSB

- *Problema de la diligencia (Stagecoach Problem)*
- *Problema de la mochila (Snapsack Problem)*
- *Programación de producción e inventarios (Production and Inventory Scheduling)*

EL PROBLEMA DE LA DILIGENCIA

Ejemplo 1:

Considérese el gráfico que contempla las rutas posibles para ir desde la ciudad 1 hasta la ciudad 10. Cada nodo representa una ciudad y los arcos la infraestructura vial disponible. La tabla recoge el costo asociado al desplazamiento entre cada par de nodos para cada una de las etapas. Se supone que todos los desplazamientos tienen la misma duración, y que el viaje ha de realizarse en cuatro etapas. Cada una de ellas se corresponde con un único desplazamiento entre un par de nodos, así al finalizar la primera etapa estaremos en una de las ciudades 2, 3 ó 4. La segunda etapa finalizará en la ciudad 5, 6 ó 7. La tercera jornada nos llevará a la ciudad 8 ó a la número 9. La cuarta etapa permite finalizar el viaje en la ciudad 10.

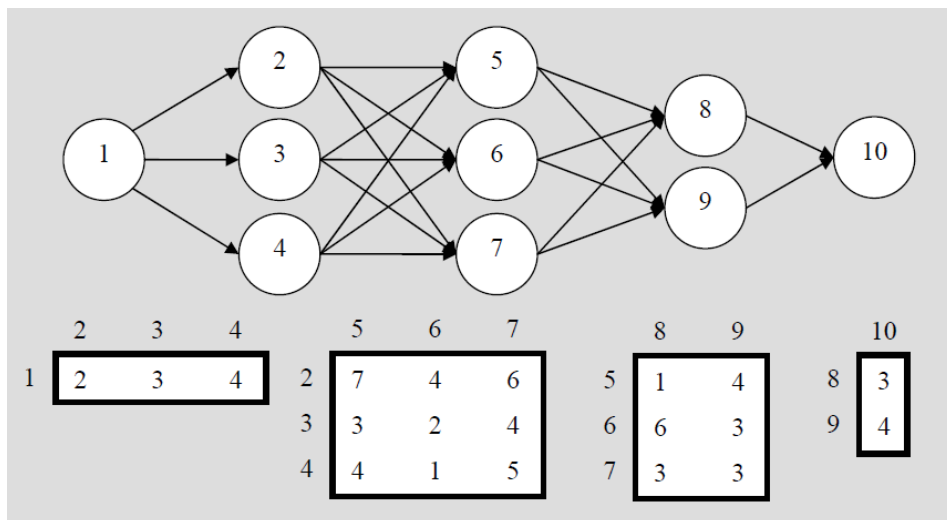


Fig. K Ejemplo 1 Problema de la Diligencia

Fuente: Programa WINQSB

TERMINOLOGÍA Y NOTACIÓN BÁSICA

Períodos o etapas: Sea $N = \{1, 2, \dots, n\}$ un conjunto finito de elementos. Mediante el índice $n \in N$, representamos cada uno de ellos. N es el conjunto de períodos o etapas del proceso. En la ilustración anterior $N = \{1, 2, 3, 4\}$, las cuatro etapas del viaje, cada una de ellas es un período y se representa mediante un valor del índice n , así cuando $n = 1$ nos estamos refiriendo a la primera etapa del proceso.

Espacio de estados: $\{S \in N\}$ es una familia de conjuntos, uno para cada período n . S se denomina espacio de estados en el período n . Cada uno de sus elementos, que se representa mediante S_n , es un estado, que describe una posible situación del proceso en ese período. En nuestro ejemplo, $S_1 = \{1\}$, $S_2 = \{2, 3, 4\}$, $S_3 = \{5, 6, 7\}$, $S_4 = \{8, 9\}$.

La función recursiva: Dados unos nodos y unos arcos que conectan estos nodos, el problema de la diligencia intenta encontrar la ruta más corta que conecta un nodo de arranque con el nodo final (el destino).

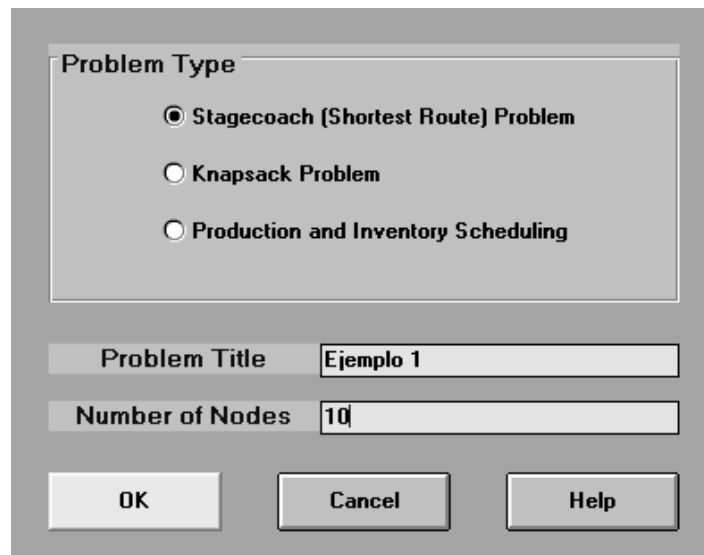
Sea s : el estado de inicio; j : estado destino

- n : la fase, normalmente representa el número de arcos hasta el destino.
- $C(s, j)$: costo o distancia de ir desde s hasta j .
- $f(n, s)$: la política de costo mínimo cuando se encuentra en el estado s de la etapa n .

La relación recursiva dinámica se expresa como $f(n, s) = \text{mínimo} [C(s, j) + f(n-1, j)]$ para todos los arcos (s, j) en la red.

INGRESANDO EL PROBLEMA AL WINQSB

El problema contiene 10 nodos claramente identificados:



Problem Type

Stagecoach (Shortest Route) Problem

Knapsack Problem

Production and Inventory Scheduling

Problem Title: Ejemplo 1

Number of Nodes: 10

OK Cancel Help

Fig. L Resolviendo el Ejemplo 1

Fuente: Programa WINQSB

Al pulsar **OK** podremos ingresar el resto de información, el cual se basa en las relaciones existentes entre los nodos:

From \ To	Node1	Node2	Node3	Node4	Node5	Node6	Node7	Node8	Node9
Node1									
Node2									
Node3									
Node4									
Node5									
Node6									
Node7									
Node8									
Node9									
Node10									

Tabla. M Resolviendo el Ejemplo 1

Fuente: Programa WINQSB

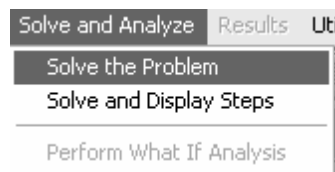
Los valores van de acuerdo a la red establecida en el problema:

From \ To	Node1	Node2	Node3	Node4	Node5	Node6	Node7	Node8	Node9	Node10
Node1		2	4	3						
Node2					7	4	6			
Node3					3	2	4			
Node4					5	6	7			
Node5								1	4	
Node6								6	3	
Node7								3	3	
Node8										3
Node9										4
Node10										

Tabla. N Ingreso de los Costos en los Nodos

Fuente: Programa WINQSB

Para resolver el problema pulsamos la opción *Resolver el problema (Solve the Problem)* del menú *Resolver y analizar (Solve and Analyze)*.



La ventana siguiente permite identificar los nodos de inicio y fin:

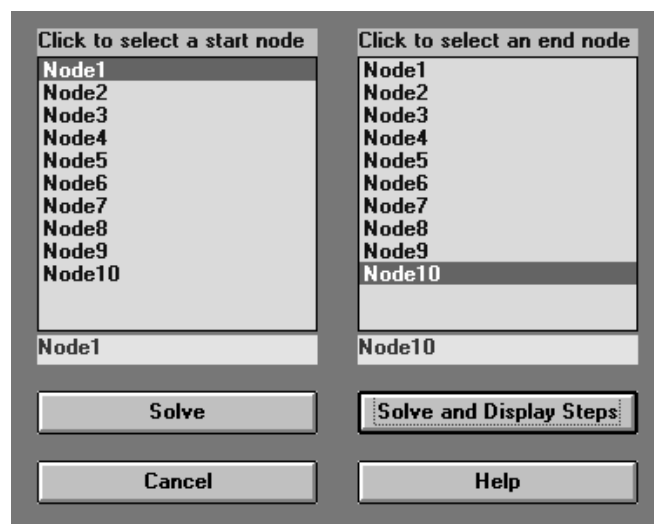


Fig. M Solución del Ejemplo 1. Ruta Óptima de Nodos

Fuente: Programa WINQSB

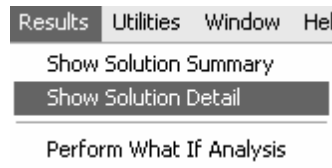
Al pulsar *SOLVE* generamos la solución al problema:

11-30-2005 Stage	From Input State	To Output State	Distance	Cumulative Distance	Distance to Node10
1	Node1	Node3	4	4	11
2	Node3	Node5	3	7	7
3	Node5	Node8	1	8	4
4	Node8	Node10	3	11	3
	From Node1	To Node10	Min. Distance	= 11	CPU = 0

Tabla. O Solución del Ejemplo 1. Costo de la Ruta

Fuente: Programa WINQSB

Si queremos una solución detallada debemos pulsar sobre *Mostrar solución detallada (Show Solution Detail)* en el menú *Resultados (Results)*:



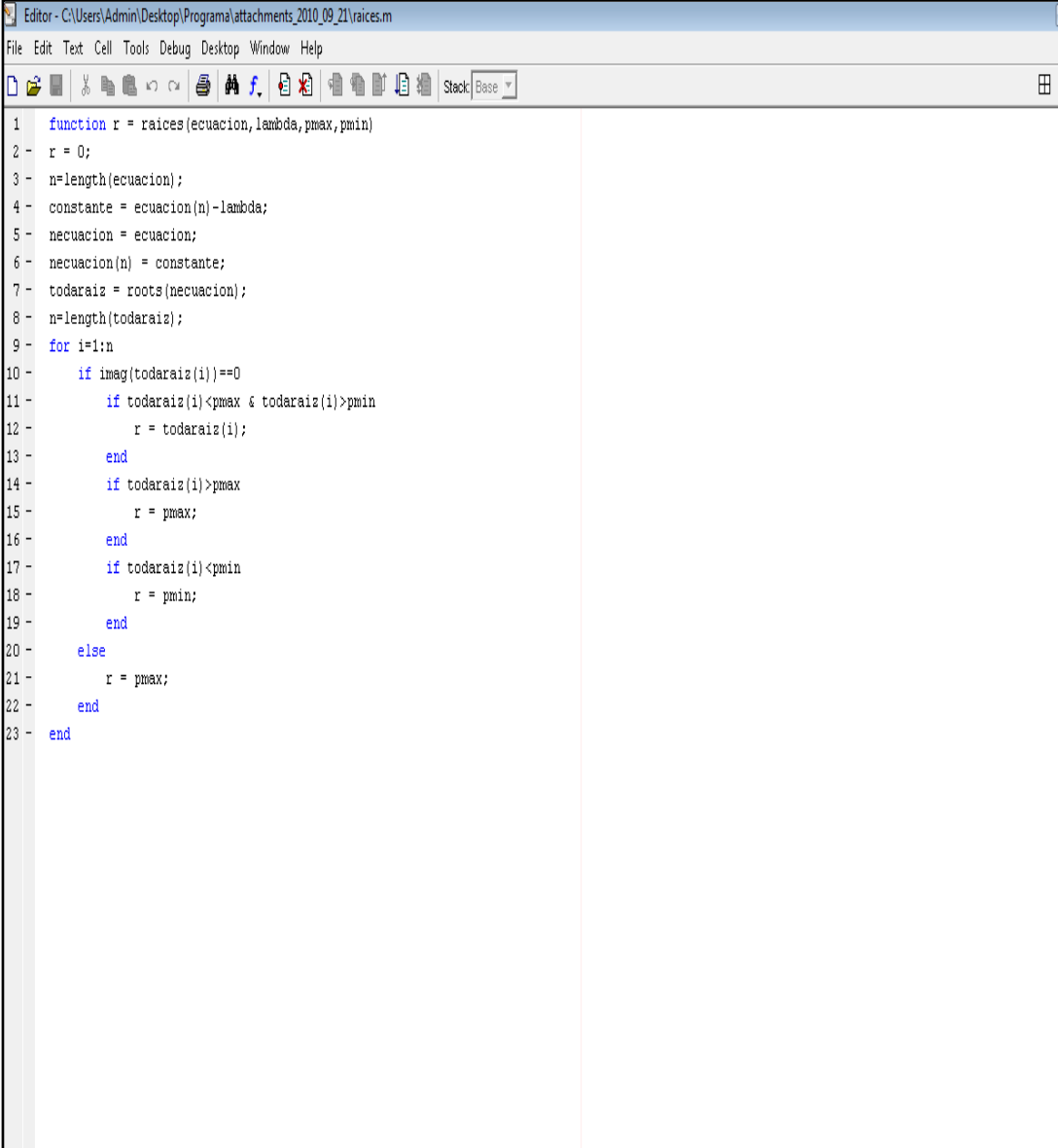
11-30-2005 17:04:56	Stage	From Input State	To Output State	Distance	Distance to Node10	Status
1	1	Node1	Node3	4	11	Optimal
2	2	Node2	Node5	7	11	
3	2	Node3	Node5	3	7	Optimal
4	2	Node4	Node5	5	9	
5	3	Node5	Node8	1	4	Optimal
6	3	Node6	Node9	3	7	
7	3	Node7	Node8	3	6	
8	4	Node8	Node10	3	3	Optimal
9	4	Node9	Node10	4	4	
	From Node1	To Node10	Minimum	Distance =	11	CPU = 0

Tabla. P Detalle y Costo de la Ruta Óptima

Fuente: Programa WINQSB

DESARROLLO DEL DESPACHO ECONÓMICO EN MATLAB

A continuación se presentan las líneas del Programa bajo la plataforma de Matlab. Este se divide en 2 editores con los nombres raíces y costo.

The image shows a screenshot of the MATLAB Editor interface. The title bar indicates the file path: 'Editor - C:\Users\Admin\Desktop\Programa\attachments_2010_09_21\raices.m'. The menu bar includes 'File', 'Edit', 'Text', 'Cell', 'Tools', 'Debug', 'Desktop', 'Window', and 'Help'. The toolbar contains various icons for file operations and editing. The main workspace displays the following MATLAB code:

```
1 function r = raices(ecuacion, lambda, pmax, pmin)
2 - r = 0;
3 - n=length(ecuacion);
4 - constante = ecuacion(n)-lambda;
5 - necuacion = ecuacion;
6 - necuacion(n) = constante;
7 - todaraiz = roots(necuacion);
8 - n=length(todaraiz);
9 - for i=1:n
10 -     if imag(todaraiz(i))==0
11 -         if todaraiz(i)<pmax & todaraiz(i)>pmin
12 -             r = todaraiz(i);
13 -         end
14 -         if todaraiz(i)>pmax
15 -             r = pmax;
16 -         end
17 -         if todaraiz(i)<pmin
18 -             r = pmin;
19 -         end
20 -     else
21 -         r = pmax;
22 -     end
23 - end
```

Fig. N Desarrollo del Despacho Económico de la Central TERMOGUAYAS GENERATION S.A. Aplicado en Programa MATLAB, Editor Raíces

Fuente: Los Autores


```
Editor - C:\Users\Admin\Desktop\Programa\attachments_2010_09_21\costo.m
File Edit Text Cell Tools Debug Desktop Window Help
[Icons] Stack: Base
1 - clc;
2 - Pr = input('Ingrese la potencia requerida en Kw = ');
3 - lambda(1) = input('Ingrese el valor de lambda en ctvs$ = ');
4 - bandera = 0;
5 - flag=0;
6
7 %Valores de Potencias Mínimas y Máximas de las unidades Base
8 - pbmax(1) = 9900;
9 - pbmin(1) = 3600;
10 - pbmax(2) = 9900;
11 - pbmin(2) = 3600;
12 - pbmax(3) = 9900;
13 - pbmin(3) = 3600;
14 - pbmax(4) = 9900;
15 - pbmin(4) = 3600;
16 - pbmax(5) = 9900;
17 - pbmin(5) = 3600;
18 - pbmax(6) = 9900;
19 - pbmin(6) = 3600;
20
21 - Potbmax = 0;
22 - Potbmin = 0;
23
24 - for i=1:6
25 -     Potbmax = Potbmax + pbmax(i);
26 -     Potbmin = Potbmin + pbmin(i);
27 - end
28
29 - if Pr<=Potbmin
30 -     bandera = 1;
31 - end
32
33 - if Pr>Potbmin & Pr<=Potbmax
34 -     ecuaciones = [-1.803474E-12 6.807022E-08 -8.482656E-04 1.146129E+01;...
35 -                 -1.6233693E-12 6.2586799E-08 -7.9518109E-04 1.1249170E+01;...
```

Fig. O Desarrollo del Despacho Económico de la Central TERMOGUAYAS GENERATION S.A. Aplicado en Programa MATLAB, Editor Costo

Fuente: Los Autores

```
Editor - C:\Users\Admin\Desktop\Programa\attachments_2010_09_21\costo.m
File Edit Text Cell Tools Debug Desktop Window Help
[Icons] Stack: Base
34 - ecuaciones = [-1.803474E-12 6.807022E-08 -8.482656E-04 1.146129E+01; ...
35 -             -1.6233693E-12 6.2586799E-08 -7.9518109E-04 1.1249170E+01; ...
36 -             -1.6233693E-12 6.2586799E-08 -7.9518109E-04 1.1249170E+01; ...
37 -             -1.7043272E-12 6.5084006E-08 -8.1695508E-04 1.1359717E+01; ...
38 -             -1.4268208E-12 5.8170640E-08 -7.7182460E-04 1.1291629E+01; ...
39 -             -1.7309252E-12 6.6377504E-08 -8.3832297E-04 1.1450687E+01];
40
41     %1ra iteración
42 -     total = 0;
43 -     resultado(1,1) = 1;
44 -     resultado(1,2) = lambda(1);
45 -     resultado(1,3) = 0;
46 -     [s t] = size(ecuaciones);
47 -     for i=1:s
48 -         for j=1:t
49 -             ecuacion(j) = ecuaciones(i,j);
50 -         end
51 -         resultado(1,i+3) = raices(ecuacion, lambda(1), pbmax(i), pbmin(i));
52 -         total = total + resultado(1,i+3);
53 -     end
54 -     resultado(1,3) = total;
55 -     error(1) = total - Pr;
56
57     %2da iteración
58 -     if total > Pr
59 -         lambda(2) = 1.1*lambda(1);
60 -     else
61 -         lambda(2) = 0.9*lambda(1);
62 -     end
63 -     total = 0;
64 -     resultado(2,1) = 2;
65 -     resultado(2,2) = lambda(2);
66 -     resultado(2,3) = 0;
67 -     for i=1:s
68 -         for j=1:t
```

Fig. P Desarrollo del Despacho Económico de la Central TERMOGUAYAS GENERATION S.A. Aplicado en Programa MATLAB, Editor Costo

Fuente: Los Autores

```

Editor - C:\Users\Admin\Desktop\Programa\attachments_2010_09_21\costo.m
File Edit Text Cell Tools Debug Desktop Window Help
Stack: Base
67 -     for i=1:s
68 -         for j=1:t
69 -             ecuacion(j) = ecuaciones(i,j);
70 -         end
71 -         resultado(2,i+3) = raices(ecuacion,lambda(2),pbmax(i),pbmin(i));
72 -         total = total + resultado(2,i+3);
73 -     end
74 -     resultado(2,3) = total;
75 -     error(2) = total - Pr;
76 -
77 -     %siguientes iteraciones
78 -     e = 3;
79 -     total = 0;
80 -     while abs(error(e-1))>0.5 & flag==0
81 -         resultado(e,1) = e;
82 -         bandera = 2;
83 -         if error(e-1)==error(e-2)
84 -             if abs(lambda(e-1))==lambda(e-1)
85 -                 if resultado(e-1,3)>Pr
86 -                     lambda(e) = 1.1*lambda(e-1);
87 -                 end
88 -                 if resultado(e-1,3)<Pr
89 -                     lambda(e) = 0.9*lambda(e-1);
90 -                 end
91 -             else
92 -                 lambda(e) = -1*lambda(e-1);
93 -             end
94 -         else
95 -             lambda(e) = lambda(e-1)-((error(e-1)*(lambda(e-1)-lambda(e-2)))/(error(e-1)-error(e-2)));
96 -         end
97 -         resultado(e,2) = lambda(e);
98 -         resultado(e,3) = 0;
99 -         for i=1:s
100 -             for j=1:t
101 -                 ecuacion(j) = ecuaciones(i,j);

```

Fig. Q Desarrollo del Despacho Económico de la Central TERMOGUAYAS GENERATION S.A. Aplicado en Programa MATLAB, Editor Costo

Fuente: Los Autores

```
Editor - C:\Users\Admin\Desktop\Programa\attachments_2010_09_21\costo.m
File Edit Text Cell Tools Debug Desktop Window Help
[Icons] Stack: Base
100 -         for j=1:t
101 -             ecuacion(j) = ecuaciones(i,j);
102 -         end
103 -         resultado(e,i+3) = raices(ecuacion, lambda(e), pbmax(i), pbmin(i));
104 -         total = total + resultado(e,i+3);
105 -     end
106 -     resultado(e,3) = total;
107 -     error(e) = total - Pr;
108 -     e = e + 1;
109 -     total = 0;
110 -     if e==100
111 -         flag=1;
112 -         bandera = 5;
113 -     end
114 - end
115 - end
116
117
118 %Valores de Potencias Mínimas y Máximas de las demás unidades
119 - pmax(1) = 14000;
120 - pmin(1) = 4800;
121 - pmax(2) = 14700;
122 - pmin(2) = 4800;
123 - pmax(3) = 14000;
124 - pmin(3) = 4800;
125 - pmax(4) = 14700;
126 - pmin(4) = 4800;
127 - pmax(5) = 13200;
128 - pmin(5) = 4800;
129 - pmax(6) = 13200;
130 - pmin(6) = 4800;
131
132 - Potmax = Potbmax;
133 - Potmin = Potbmax;
134
```

Fig. R Desarrollo del Despacho Económico de la Central TERMOGUAYAS GENERATION S.A. Aplicado en Programa MATLAB, Editor Costo

Fuente: Los Autores

```

Editor - C:\Users\Admin\Desktop\Programa\attachments_2010_09_21\costo.m
File Edit Text Cell Tools Debug Desktop Window Help
[Icons] Stack: Base
133 - Potmin = Potbmax;
134
135 - for i=1:6
136 -     Potmax = Potmax + pmax(i);
137 -     Potmin = Potmin + pmin(i);
138 - end
139
140 - if Pr>Potmin & Pr<=Potmax
141 -     ecuaciones = [ 0 0 -6.5255493223E-05 1.2341596482E+01;...
142 -                 0 0 -8.0701007582E-05 1.3082714475E+01;...
143 -                 0 0 -3.2271886295E-05 1.1852832530E+01;...
144 -                 0 0 -7.4756331929E-05 1.2900770633E+01;...
145 -                 -9.1933325980E-13 4.8142248228E-08 -8.2070689424E-04 1.5230343489E+01;...
146 -                 -8.687304E-13 4.543759E-08 -7.767900E-04 1.494327E+01];
147
148     %1ra iteración
149 -     total = 0;
150 -     resultado(1,1) = 1;
151 -     resultado(1,2) = lambda(1);
152 -     resultado(1,3) = 0;
153 -     [s t] = size(ecuaciones);
154 -     for i=1:s
155 -         for j=1:t
156 -             ecuacion(j) = ecuaciones(i,j);
157 -         end
158 -         resultado(1,i+3) = pbmax(i);
159 -         resultado(1,i+9) = raices(ecuacion, lambda(1), pmax(i), pmin(i));
160 -         total = total + resultado(1,i+9);
161 -     end
162 -     total = total + Potbmax;
163 -     resultado(1,3) = total;
164 -     error(1) = total - Pr;
165
166     %2da iteración
167 -     if total>Pr

```

Fig. S Desarrollo del Despacho Económico de la Central TERMOGUAYAS GENERATION S.A. Aplicado en Programa MATLAB, Editor Costo

Fuente: Los Autores

```

Editor - C:\Users\Admin\Desktop\Programa\attachments_2010_09_21\costo.m
File Edit Text Cell Tools Debug Desktop Window Help
Stack: Base
166 %2da iteración
167 - if total>Pr
168 -     lambda(2) = 1.1*lambda(1);
169 - else
170 -     lambda(2) = 0.9*lambda(1);
171 - end
172 - total = 0;
173 - resultado(2,1) = 2;
174 - resultado(2,2) = lambda(2);
175 - resultado(2,3) = 0;
176 - for i=1:s
177 -     for j=1:t
178 -         ecuacion(j) = ecuaciones(i,j);
179 -     end
180 -     resultado(2,i+3) = pbmax(i);
181 -     resultado(2,i+9) = raices(ecuacion, lambda(2), pmax(i), pmin(i));
182 -     total = total + resultado(2,i+9);
183 - end
184 - total = total + Potbmax;
185 - resultado(2,3) = total;
186 - error(2) = total - Pr;
187
188 %siguientes iteraciones
189 - e = 3;
190 - total = 0;
191 - while abs(error(e-1))>0.5 & flag==0
192 -     bandera = 3;
193 -     resultado(e,1) = e;
194 -     if error(e-1)==error(e-2)
195 -         if abs(lambda(e-1))==lambda(e-1)
196 -             if resultado(e-1,3)>Pr
197 -                 lambda(e) = 1.1*lambda(e-1);
198 -             end
199 -             if resultado(e-1,3)<Pr
200 -                 lambda(e) = 0.9*lambda(e-1);

```

Fig. T Desarrollo del Despacho Económico de la Central TERMOGUAYAS GENERATION S.A. Aplicado en Programa MATLAB, Editor Costo

Fuente: Los Autores

```

Editor - C:\Users\Admin\Desktop\Programa\attachments_2010_09_21\costo.m
File Edit Text Cell Tools Debug Desktop Window Help
Stack Base
199 -         if resultado(e-1,3)<Pr
200 -             lambda(e) = 0.9*lambda(e-1);
201 -         end
202 -         else
203 -             lambda(e) = -1*lambda(e-1);
204 -         end
205 -     else
206 -         lambda(e) = lambda(e-1)-((error(e-1)*(lambda(e-1)-lambda(e-2)))/(error(e-1)-error(e-2)));
207 -     end
208 -     resultado(e,2) = lambda(e);
209 -     resultado(e,3) = 0;
210 -     for i=1:s
211 -         for j=1:t
212 -             ecuacion(j) = ecuaciones(i,j);
213 -         end
214 -         resultado(e,i+3) = pbmax(i);
215 -         resultado(e,i+9) = raices(ecuacion, lambda(e), pmax(i), pmin(i));
216 -         total = total + resultado(e,i+9);
217 -     end
218 -     total = total + Potbmax;
219 -     resultado(e,3) = total;
220 -     error(e) = total - Pr;
221 -     e = e + 1;
222 -     total = 0;
223 -     if e==100
224 -         flag=1;
225 -         bandera = 6;
226 -     end
227 - end
228 - end
229
230 - if Pr>Potmax
231 -     bandera = 4;
232 - end
233

```

Fig. U Desarrollo del Despacho Económico de la Central TERMOGUAYAS GENERATION S.A. Aplicado en Programa MATLAB, Editor Costo

Fuente: Los Autores

```

Editor - C:\Users\Admin\Desktop\Programa\attachments_2010_09_21\costo.m
File Edit Text Cell Tools Debug Desktop Window Help
[Icons] Stack Base
232 - end
233
234 %Presentación de resultados
235 if bandera==1
236     fprintf('\n');
237     fprintf('    La Potencia Minima que se puede generar es de %.2f kW\n',Potbmin);
238 - end
239
240 if bandera==2
241     [m n] = size(resultado);
242     for i=1:m
243         for j=1:n
244             tabla(j,i)= resultado(i,j);
245         end
246     end
247     fprintf('\n');
248     fprintf('                                Tabla de Resultado\n\n');
249     fprintf('Iteración Lambda   Potencia   B4-Booster-1   B4-Booster-2   B4-Booster-3   B5-Booster-1   B5-Booster-2   B5-Booster-3\n');
250     fprintf('                Requerida   (kW)         (kW)         (kW)         (kW)         (kW)         (kW)\n');
251     fprintf('                (kW)\n\n');
252     fprintf('%5.0f %10.4f %10.2f %11.2f %12.2f %12.2f %12.2f %12.2f %12.2f\n',tabla);
253     fprintf('\n');
254     plot(lambda, error, 'w');
255     hold on
256     grid on;
257     xlabel('Lambda');
258     ylabel('error');
259     comet(lambda(1), error(1));
260     for i=1:length(lambda)-1
261         a=linspace(lambda(i), lambda(i+1), 500);
262         b=linspace(error(i), error(i+1), 500);
263         comet(a,b);
264     end
265 - end
266

```

Fig. V Desarrollo del Despacho Económico de la Central TERMOGUAYAS GENERATION S.A. Aplicado en Programa MATLAB, Editor Costo

Fuente: Los Autores


```

Editor - C:\Users\Admin\Desktop\Programa\attachments_2010_09_21\costo.m
File Edit Text Cell Tools Debug Desktop Window Help
Stack: Base
267 - if bandera==3
268 -     [m n] = size(resultado);
269 -     for i=1:m
270 -         for j=1:n
271 -             tabla(j,i)= resultado(i,j);
272 -         end
273 -     end
274 -     fprintf('\n');
275 -     fprintf('                          Tabla de Resultado\n\n');
276 -     fprintf('Iteración Lambda   Potencia   B4-Booster-1   B4-Booster-2   B4-Booster-3   B5-Booster-1   B5-Booster-2   B5-Booster-3   B1-Booster-1
277 -     Requerida       (kW)       (kW)       (kW)       (kW)       (kW)       (kW)       (kW)       (kW)
278 -     (kW)\n\n');
279 -     fprintf('%5.0f %10.4f %10.2f %11.2f %12.2f %12.2f %12.2f %12.2f %12.2f %12.2f %12.2f %12.2f %12.2f %12.2f\n',tabla);
280 -     fprintf('\n');
281 -     plot(lambda, error, 'w');
282 -     hold on
283 -     grid on;
284 -     xlabel('Lambda');
285 -     ylabel('error');
286 -     comet(lambda(1), error(1));
287 -     for i=1:length(lambda)-1
288 -         a=linspace(lambda(i),lambda(i+1),500);
289 -         b=linspace(error(i),error(i+1),500);
290 -         comet(a,b);
291 -     end
292 - end
293
294 - if bandera==4
295 -     fprintf('\n');
296 -     fprintf('      La Potencia Máxima que se puede generar es de %.2f kW\n\n',Potmax);
297 - end
298
299 - if bandera==5
300 -     [m n] = size(resultado);
301 -     for i=1:m

```

Fig. W Desarrollo del Despacho Económico de la Central TERMOGUAYAS GENERATION S.A. Aplicado en Programa MATLAB, Editor Costo

Fuente: Los Autores

```

Editor - C:\Users\Admin\Desktop\Programa\attachments_2010_09_21\costo.m
File Edit Text Cell Tools Debug Desktop Window Help
Stack: Base
297 - end
298
299 - if bandera==5
300     [m n] = size(resultado);
301     for i=1:m
302         for j=1:n
303             tabla(j,i)= resultado(i,j);
304         end
305     end
306     fprintf('\n');
307     fprintf('
308         Tabla de Resultado\n');
309     fprintf('Iteración Lambda Potencia B4-Booster-1 B4-Booster-2 B4-Booster-3 B5-Booster-1 B5-Booster-2 B5-Booster-3\n');
310     fprintf('Requerida (kW) (kW) (kW) (kW) (kW) (kW)\n');
311     fprintf('
312     (kW)\n');
313     fprintf('%5.0f %10.4f %10.2f %11.2f %12.2f %12.2f %12.2f %12.2f %12.2f\n',tabla);
314     fprintf('\n\n');
315     fprintf('
316     Los datos no convergen... Intente con otros valores\n\n');
317 - end
318
319 - if bandera==6
320     [m n] = size(resultado);
321     for i=1:m
322         for j=1:n
323             tabla(j,i)= resultado(i,j);
324         end
325     end
326     fprintf('\n');
327     fprintf('
328         Tabla de Resultado\n');
329     fprintf('Iteración Lambda Potencia B4-Booster-1 B4-Booster-2 B4-Booster-3 B5-Booster-1 B5-Booster-2 B5-Booster-3 B1-Booster-1\n');
330     fprintf('Requerida (kW) (kW) (kW) (kW) (kW) (kW) (kW) (kW)\n');
331     fprintf('
332     (kW)\n');
333     fprintf('%5.0f %10.4f %10.2f %11.2f %12.2f %12.2f %12.2f %12.2f %12.2f %12.2f %12.2f %12.2f %12.2f %12.2f\n',tabla);
334     fprintf('\n\n');
335     fprintf('
336     Los datos no convergen... Intente con otros valores\n\n');
337 - end

```

Fig. X Desarrollo del Despacho Económico de la Central TERMOGUAYAS GENERATION S.A. Aplicado en Programa MATLAB, Editor Costo

Fuente: Los Autores