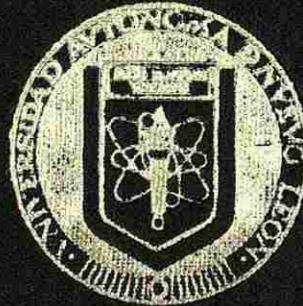


UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



OPTIMIZACION DE POTENCIA ACTIVA
Y REACTIVA EN SISTEMAS DE POTENCIA

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA ELECTRICA
CON ESPECIALIDAD EN POTENCIA

PRESENTA:
RAFAEL LEON VELAZQUEZ

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L. JUNIO DE 1997

TM

25853

.M2

FINE

1997

L46



1020119053



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

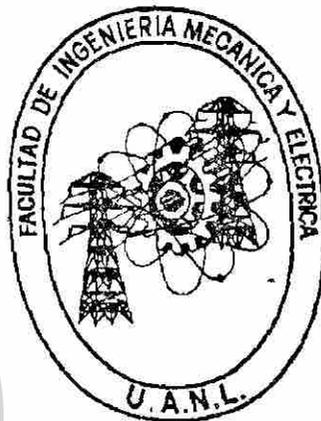


DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE POST-GRADO



**OPTIMIZACION DE POTENCIA ACTIVA Y REACTIVA
EN
SISTEMAS DE POTENCIA**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

TESIS

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DE INGENIERIA ELECTRICA
CON LA ESPECIALIDAD EN POTENCIA**

PRESENTA

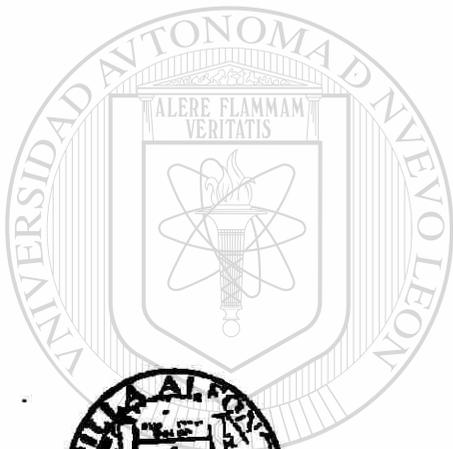
RAFAEL LEON VELAZQUEZ

SAN NICOLAS DE LOS GARZA N.L.

JUNIO DE 1997

TM
Z5853
.M2
F ME
1997
L46

0119-51960



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

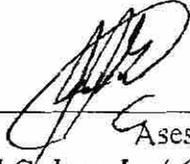
FONDO TESIS

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

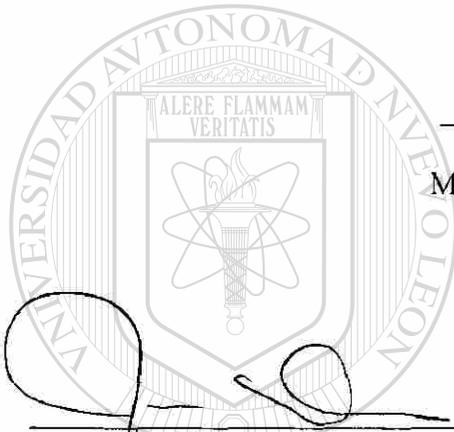
Los Miembros del Comité de tesis recomendamos que la tesis "OPTIMIZACION DE POTENCIA ACTIVA Y REACTIVA EN SISTEMAS DE POTENCIA" realizada por el Ing. Rafael de León Velázquez sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con especialidad en Sistemas de Potencia.

El Comité de Tesis



Asesor

M.C. Juan José Guerrero Garza



Coasesor

M.C. Juan Diego Garza González



Coasesor

M.C. Luis Manuel Martínez Villarreal

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



V.o.Bo.

M.C. Roberto Villareal Garza
División de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, N.L. a 23 de Junio de 1997

I N D I C E

	PAG.
PROLOGO	IVi
SINTESIS	VIIIi
I. EL PROBLEMA DE DESPACHO ECONOMICO	1
INTRODUCCION	1
1.1 Componentes de un sistema eléctrico de potencia	2
1.1.1 Subestación elevadora	5
1.1.2 Subestación de distribución	5
1.1.3 Subestación de carga o consumo	6
1.2 El problema de despacho económico	7
1.3 Restricciones en los sistemas eléctricos de potencia	9
1.3.1 Restricciones de igualdad	9
1.3.2 Restricciones de desigualdad	10
1.3.3 Restricciones de voltaje	11
1.3.4 Restricciones de reserva rodante	12
1.3.5 Restricciones de líneas de transmisión	12
II. CARACTERÍSTICAS DE LAS UNIDADES DE GENERACIÓN	14
INTRODUCCIÓN	14
2.1 Curvas características	15
2.1.1 Curva de entrada-salida	15
2.1.2 Curva de costo incremento	17
2.1.3 Curva de coeficientes del polinomio de entrada salida a partir de la prueba de consumo específico	19
III. TÉCNICAS DE SOLUCIÓN AL PROBLEMA DE DESPACHO ECONOMICO	29
INTRODUCCIÓN	29
3.1 Técnicas de solución	30
3.1.1 Multiplicadores de Lagrange	32
3.1.2 Método de igual costo incremental	36
3.1.3 Métodos de despacho económico por el método del gradiente	39
3.1.3.1 Método del gradiente de primer orden	39
3.1.3.2 Método del gradiente de segundo orden	44
3.1.4 Despacho económico de potencia reactiva	48

PROLOGO

Durante la formación que se tuvo en la escuela de postgrado, siempre existió la inquietud de aprender a analizar los sistemas de potencia, en todas sus áreas. Pero conforme se estudian todas las áreas del sistema de potencia se requiere de mucho esfuerzo para tener un amplio conocimientos sobre todas ellas.

Conforme se avanza en el postgrado, el estudiante se da cuenta cuál es el área de interés del mismo, para cuando llega el momento de proponer algún tema de tesis,

el alumno tiene idea de los objetivos principales de lo que se pretende lograr en su trabajo.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Una de las inquietudes durante la formación, fue aprender las distintas metodologías que existen para el análisis de despacho económico, de ahí que surge el trabajo que se está presentando. Al analizar las diferentes metodologías que existen para el análisis de despacho económico, la idea fundamental de este trabajo es encontrar una solución al problema de despacho económico, por medio de métodos lineales, ya que al proponer una solución mediante un método lineal, es más manejable que un método no-lineal.

Con este tipo de trabajo, se logra el ir enriqueciendo sobre ésta área y poder tener una visión más amplia de la problemática de despacho económico. Cuando se lleva a cabo un estudio en el área económica de los sistemas de potencia es muy importante, que el propósito fundamental sea producir al menor costo posible pero manteniendo una solución factible, por lo tanto la inquietud principal de toda persona que trabaja en esta área, es investigar nuevas herramientas que ayuden a predecir la generación y la distribución de la energía en una forma óptima.

La manera en que nace la inquietud sobre investigar las distintas formulaciones que existen para despacho económico, se debe a que se busca un mejor aprovechamiento de los recursos energéticos. La ecuación fundamental de costos de cualquier generador de una planta termoeléctrica se aproxima a una representación por medio de un polinomio cuadrático, de ahí que la búsqueda de nuevas formulaciones en el

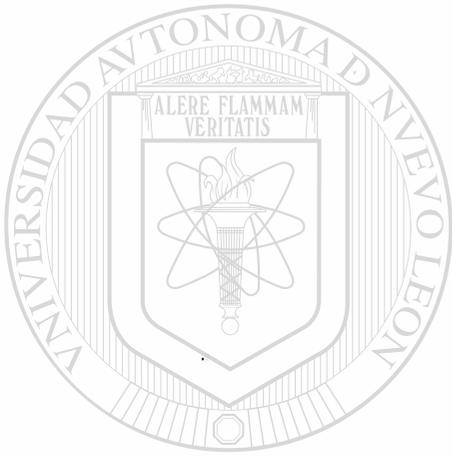
ámbito de la programación no lineal, representa el reto de buscar nuevas soluciones para que las centrales generadoras produzcan de la manera más óptima.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Básicamente en este trabajo se presenta un algoritmo de despacho económico, que toma en cuenta las restricciones más importantes del sistema eléctrico de potencia, dicho programa se llevo a cabo en una hoja de calculo avanzada llamado MATLAB.

El objetivo de la elaboración del programa es tratar de demostrar que la solución de los sistemas lineales presenta mayores ventajas que los sistemas no lineales. De ahí nace la idea fundamental de buscar métodos de optimización eficientes que resuelvan sistemas lineales.

En la actualidad existen programas de computo, que resuelven sistemas lineales y no lineales, básicamente lo que se debe de investigar, son nuevas formulaciones que ayuden a determinar en forma más eficiente el problema a solucionar, la simulación por computadora es una herramienta útil para lograr el objetivo que estamos buscando.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

SÍNTESIS

Este trabajo tiene como objetivo principal dar a conocer a las personas involucradas en el área de despacho económico, una alternativa más para la solución de despacho.

Este método parte del modelo cuadrático, propia de los generadores, el cual se modifica para proponer un método de programación lineal. Al mismo se motiva hacia la búsqueda de nuevas soluciones alternativas.

En este trabajo se desarrollan VI capítulos fundamentales.

En el Capítulo I se mencionan y se describen los componentes más importantes de un sistema de potencia, la problemática de despacho económico y se comentan se comentan las restricciones más importantes en la operación de un sistema eléctrico de potencia.

En el Capítulo II se analizan las características de las unidades de generación, se muestran las curvas y modelos de mayor importancia en el estudio de despacho económico, también se menciona la manera de obtener los coeficientes del polinomio entrada-salida, a partir de pruebas a un sistema de generación termoeléctrico real.

En el Capítulo III se analizan las técnicas no lineales de solución al problema de despacho económico mediante: multiplicadores de Lagrange, método de igual costo incremental, método del gradiente de primer orden y método del gradiente de segundo orden.

En el Capítulo IV se menciona el problema de despacho económico tomando en cuenta las restricciones más importantes del sistema .

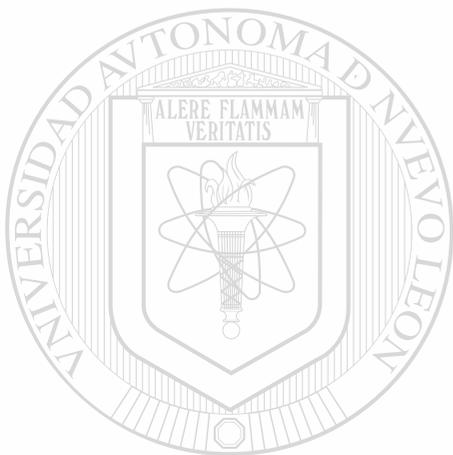
En el Capítulo V se analizan los resultados obtenidos de diferentes formulaciones. El programa desarrollado en este trabajo, se fundamenta en el desarrollo de un algoritmo de computadora propuesto para la solución de despacho económico de un sistema eléctrico de potencia. Primeramente se calcula el despacho económico sin pérdidas, tomando solo en cuenta la demanda de energía del sistema

y los límites de generación, después se calculan las pérdidas por el método de coeficientes de corriente directa, que facilitan el cálculo de los factores de penalización, con estos factores calculados se procede a hacer un ajuste de voltajes y ángulos respetando sus límites, por medio de estudios de flujos desacoplado rápido.

Una vez ajustados estos parámetros se procede a encontrar el despacho económico con pérdidas.

En el Capítulo VI se analizan los resultados y se comentan la calidad de los mismos. Cabe mencionar que el modelo que se tomó para el estudio, fue un sistema de tres generadores, donde únicamente se tomó en cuenta la restricción de demanda y los límites de generación.

En este Capitulo se hace mención, de los resultados obtenidos en el algoritmo propuesto. Donde dicho algoritmo se elaboro, tomando en cuenta las restricciones mas importantes del sistema de potencia.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE DESPACHO ECONÓMICO

INTRODUCCIÓN:

En la medida que se agotan los recursos no renovables se incrementará el interés por buscar nuevas formas de explotación de éstos recursos energéticos con mayor eficiencia. En los sistemas eléctricos de potencia, el despacho económico de carga es la forma de abastecer la demanda de energía eléctrica optimizando los recursos

de generación termoeléctrica disponible, su campo de acción abarca la generación y transmisión de electricidad. En lo referente a la generación, el despacho económico se centra en el estudio de las centrales térmicas, donde el costo de combustible es el factor principal.

El problema de despacho económico empieza cuando se tienen dos o más plantas generadoras, con sus límites respectivos de generación, y se tiene que abastecer cierta cantidad de demanda, que es mayor que la capacidad de cualquiera de las dos unidades, por lo tanto se cuestiona la forma de dividir la demanda entre las dos unidades para buscar un costo mínimo de operación; además intervienen otros factores como las

características de la red de transmisión, la capacidad de transmisión, las pérdidas de transmisión, reserva rodante, velocidad de respuesta ante variaciones de carga en máquinas térmicas, etc.

Dentro del despacho económico es muy importante conocer el funcionamiento de las centrales generadoras y sus características que desea representar, gran parte de esta información la proporcionan las curvas características de los generadores, las cuales son trascendentes en el planteamiento de la operación económica de un sistema de potencia.

1.1 COMPONENTES DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA.

El desarrollo de una planta industrial, de un centro poblacional, esta a la par con la disponibilidad que tengan de fuentes de energía para desarrollar trabajos útiles. El constante incremento de la demanda de energía eléctrica provoca que día con día se pretendan tener mas eficientes los sistemas de producción, transmisión y la utilización de electricidad, los cuales han evolucionado desde pequeños circuitos aislados de pocos kilómetros, hasta los actuales sistemas interconectados que unen a todo un país como sucede en México. Ahora las actuales redes eléctricas son capaces de abastecer grandes demandas de energía, a grandes distancias, con un mínimo de pérdidas y sobre todo con calidad y continuidad en el servicio.

Un sistema eléctrico de potencia es un conjunto de partes y elementos que tienen como objetivo la disponibilidad de la energía eléctrica desde las plantas de generación a los

centros de consumo. Se compone de tres partes principales, las centrales generadoras, las líneas de transmisión y las redes de distribución.

La central generadora es el lugar donde se lleva a cabo la conversión de energía química, termica, hidráulica. etc. a energía eléctrica, aprovechando condiciones naturales, como saltos de agua, o la proporcionada por de algún tipo de combustible.

Las centrales eléctricas pueden ser: hidroeléctricas, como las de embalse, las de agua corriente o las de acumulación por bombeo. Termoeléctricas las que se dividen en: geotérmicas, turbo gas, de combustible fósil, núcleo eléctricas. También hay otras llamadas de fuentes alternativas de energía, las cuales están en constante evolución debido al inevitable agotamiento de combustibles convencionales, algunos ejemplos de estas plantas generadoras son: plantas eólicas, de vapor de salmuera, plantas de energía solar, generación por mareas del mar, biomasa , entre otras.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Todas las fuentes de energía mencionadas anteriormente son aprovechadas por el [®] generador para producir electricidad. El generador es una máquina que convierte la energía mecánica, termica o química en energía eléctrica. La potencia transferida a la flecha del generador proporciona movimiento en el rotor y crea por el efecto de inducción electromagnética un voltaje en las terminales del generador.

Al elemento que hace girar al generador se le llama primotor; en el caso de una planta termoeléctrica el primotor es una turbina, también lo es para las hidroeléctricas y otras

centrales pero con otras características. Otros primotores pueden ser las hélices y los cigüeñales de las máquinas de combustión interna.

Se puede decir que el generador es la parte principal del sistema, en él se forman además de la energía eléctrica, los parámetros de ella, tales como: el número de fases (si el sistema es polifásico), frecuencia, potencia, voltaje y amperaje, aunque estos tres últimos se pueden alterar por la carga y por relaciones de transformación. El generador ya junto con su primotor y su sistema de transformación de energía, contiene otros parámetros significativos, como las pérdidas, curvas de potencia, entre otros, que son dignos de investigaciones posteriores.

En la mayoría de los casos, los centros de generación se encuentran retirados de los centros de consumo como ocurre en los países en desarrollo; no es posible instalar una central eléctrica en un lugar solo porque existe concentración de consumo, hay que tomar en cuenta también, la posibilidad de aprovechar un recurso natural, o de abastecimiento de combustible y la facilidad para distribuir la energía eléctrica.

Las líneas de transmisión son el enlace entre los centros de consumo y la generación de electricidad. Dependiendo de su longitud se pueden clasificar en cortas, menos de 80 Km., líneas de longitud media, de 80 a 240 Km., y líneas largas de más de 240 Km. Transportar por las líneas de transmisión, los valores bajos de voltaje de las centrales generadoras, resultaría muy oneroso por las pérdidas ocasionadas por el efecto Joule

(I^2R), es aquí, donde interviene un elemento importante en los sistemas eléctricos de potencia, el transformador, el cual cambia los parámetros de voltaje y corriente, elevando los valores de voltaje para su transmisión y después al llegar al centro de consumo reducirlo para ser utilizado. El transformador es un máquina eléctrica estática que transforma energía eléctrica de ciertos valores de voltaje y corriente a otros, a través bobinas forma un circuito magnético, por el efecto de inducción y la relación de transformación. Es además una máquina eficiente, divide físicamente un circuito del otro. Cabe mencionar que la decisión hace muchos años, entre seguir utilizando la corriente directa o cambiar a la corriente alterna, se hizo a favor de la segunda gracias al transformador y a su capacidad de alterar voltaje y corriente. El transformador se localiza en la subestación, los tipos de subestaciones son:

1.1.1 SUBESTACION ELEVADORA.

Se encuentra en las plantas generadoras, su función es elevar el nivel de voltaje de generación a un voltaje de transmisión, el cual depende de la distancia y la potencia a enviar, los voltajes de generación más comunes son 2.4, 4.4, 6.9, 13.2, y 13.8 Kv, y los voltajes más usuales de transmisión son 230 Kv., para potencias de hasta 100 Mva, 230 Kv., que puede transportar potencias de hasta 200 Mva., 400 Kv usados en México y 765 Kv, 1000 kv, usados en otros países del mundo.

1.1.2 SUBESTACION DE DISTRIBUCIÓN.

Esta reduce los altos niveles de voltaje de las líneas de transmisión a un voltaje

adecuado para la distribución en los centros de consumo. Algunos valores normalizados de distribución son 64 Kv., 34.5 Kv., a estos dos voltajes se les llama también voltajes de subtransmisión, también se maneja 13.8 Kv., 13.2 Kv., 4.4 Kv., y 2,4 Kv. El voltaje de distribución depende del tamaño de la carga y la distancia.

1.1.3 SUBESTACION DE CARGA O CONSUMO.

Es el último escalón de voltaje antes de ser utilizado en la industria, área rural o concentración urbana. Las subestaciones de consumo existen debido a que el voltaje de distribución es impropio para su utilización. Los voltajes más usados para consumo son, 440, 220 y 127 volts. hay que mencionar también que ciertas industrias manejan valores de voltaje diferentes, y otras debido a su gran carga reciben ahí mismo voltaje de transmisión, es decir tienen subestaciones de potencia que alimentan a otras subestaciones de consumo.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Por último es preciso comentar que cada parte de un sistema eléctrico cuenta además, ® con elementos de desconexión, protección y control. Elementos de desconexión como los interruptores, cuchillas, fusibles; protecciones contra sobrevoltaje, corto circuito, bajo voltaje y muchas más. Los elementos de medición más usados son los voltímetros, amperímetros, fasímetros, frecuencímetros, wáttmetros y vármetros. Entre otros dispositivos y elementos que proporcionan protección al equipo y operarios, y mantienen la continuidad en el servicio.

1.2 EL PROBLEMA DE DESPACHO ECONÓMICO.

La explosiva alza del precio del petróleo crudo en los 70' s causó desconcierto en un mundo que basa su economía en el consumo de petróleo, a partir de esa fecha se intensifica la búsqueda de un mejor aprovechamiento de los recursos naturales, en aquel tiempo retomó importancia el aspecto del despacho económico de energía en los sistemas eléctricos de potencia, aunque se sabe que en 1920^[1] los ingenieros ya estaban preocupados por los problemas de costo, y pensaban en como dividir la carga entre los generadores de un sistema, además ya para 1930 fue propuesto el método de igual costo incremental^[1], en el cual se basan los nuevos métodos y que todavía tiene vigencia en nuestro días.

El método de igual costo incremental antes llamado método incremental^[2], fue uno de los principales avances en el despacho económico, los primeros autores en implementarlo proponen que en un sistema eléctrico de generación, el próximo aumento de carga sea suministrado por el generador con igual costo incremental al del sistema, reconociendo después que el resultado era que todas las plantas generadoras trabajaran al mismo costo incremental. Al madurar las ideas concluyeron un nuevo enfoque, que expresa si un aumento de carga en un generador y una igual disminución en otro provocaría un aumento o una disminución en los costos.

El problema de despacho óptimo de carga abarca en realidad dos diferentes problemas, el primero de ellos es el problema de asignación de unidades en donde se hace un balance de todas las fuentes de generación disponibles, a la vez que se efectúa un

estudio de la red de transmisión y se lleva a cabo un pronóstico de la demanda esperada en cierto período de tiempo, todo esto con el fin de crear un itinerario de operaciones en busca de un ahorro en la operación. El segundo aspecto es el despacho económico en acción o simplemente despacho, en donde se distribuye la demanda entre varios generadores conectados al sistema, para la optimización del costo total de abastecimiento que minuto a minuto requiere el sistema.

Lo anterior visto desde el enfoque de flujos de potencia explica que el despacho económico de carga es realmente la solución de varios subproblemas de flujos de potencia, eligiendo el mas óptimo en el sentido que requiere menos costos de generación, y respeta las restricciones impuestas se conoce como flujos óptimos. Es fácil entender que el costo total de generación es una función de la generación individual de cada una de las fuentes, las cuales toman valores dentro de ciertas

restricciones, el costo de operación dependerá también de las restricciones del sistema para una demanda de carga en particular. Esto significa que el costo total de operación no es un arreglo único para una demanda de carga en particular, pero dependerá de las restricciones del sistema. Por otra parte dice que la transferencia de energía de un generador a otro repercute en una variación del costo total hasta que las dos centrales se operan al mismo costo incremental. Este concepto deduce el criterio final de despacho económico de carga que dice que todas las unidades de generación deben funcionar al mismo costo incremental, remarcando que no se menciona que con la misma curva de costo incremental, ya que cada generador cuenta con una diferente.

1.3 RESTRICCIONES EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA.

Durante la operación económica de carga se encuentra que en un moderno sistema eléctrico de potencia opera bajo ciertas restricciones de la propia generación y de la red de transmisión. Las restricciones siempre están presentes y cualquier trabajo que busque un despacho óptimo de carga sin considerarlas arrojará un resultado erróneo o incompleto.

Antes de cualquier intento por solucionar un despacho económico es preciso comprender y analizar las restricciones del sistema. A continuación se mencionan los tipos de restricciones más comunes: las restricciones de igualdad y las de desigualdad. A la vez que las restricciones de desigualdad también se dividen en restricciones del tipo duro o inflexible y restricciones del tipo flexible.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

1.3.1 RESTRICCIONES DE IGUALDAD.

Son de característica inflexible, dentro de este grupo se encuentra la demanda del sistema eléctrico.

$$P_{demanda} = \sum_{i=1}^m P_{g_i} \quad (1-1)$$

Donde P_{g_i} es la potencia del i -ésimo generador.

Otro ejemplo típico de estas restricciones de igualdad se encuentran en las ecuaciones de flujo de carga.

$$Q_p = \sum_{q=1}^n [V_p (e_q G_{pq} + f_q B_{pq}) - e_p (f_p G_{pq} - e_q B_{pq})] \quad (1-3)$$

$$P_p = \sum_{q=1}^n [e_p (e_q G_{pq} + f_q B_{pq}) + f_p (f_q G_{pq} - e_q B_{pq})] \quad (1-2)$$

$$p = 1, 2, \dots, n$$

Donde e_p y f_p son los componentes real e imaginario del voltaje en el "p" nodo y G_{pq} y B_{pq} son la conductancia y susceptancia entre el "p" y nodo "q"

1.3.2. RESTRICCIONES DE DESIGUALDAD.

Entre las restricciones de desigualdad más comunes se encuentran:

Restricciones del generador. La carga de un generador en KVA está dada por $\sqrt{P_p^2 + Q_p^2}$ y esto no deberá exceder de un valor especificado de S (KVA)

$$P_p^2 + Q_p^2 \leq S_p^2 \quad (1-4)$$

En el generador existen limitantes del tipo térmico que se ven reflejadas en la capacidad de generación, la mínima potencia de generación es limitada por la inestabilidad de flama de los quemadores en una caldera, si la potencia de demanda es menor que la potencia mínima que puede suministrar la unidad, simplemente la máquina

no entra en funcionamiento ya sea por seguridad o por incosteabilidad, obviamente los generadores también poseen su límite máximo de generación. Por lo tanto la potencia de un generador no puede estar fuera del rango de potencias mínima y máxima

$$P_{Pmin} \leq P_p \leq P_{Pmax} \quad (1-5)$$

De la misma forma la potencia reactiva que suministra un generador está limitada. La máxima potencia reactiva está restringida por sobrecalentamiento del rotor y la mínima se restringe por el límite de estabilidad (motor-generador). Por lo tanto la potencia de generación reactiva debe estar dentro de los rangos establecidos por la restricción:

$$Q_{pmin} \leq Q_p \leq Q_{pmax} \quad (1-6)$$

1.3.3. RESTRICCIONES DE VOLTAJE.

En una red de transmisión es muy importante conservar las magnitudes de los voltajes [®] en los diferentes nodos, los valores de voltaje y ángulo de fase pueden variar, pero solo dentro de límites establecidos en donde no afecte al sistema ni a los equipos conectados. Por otro lado sería incosteable colocar reguladores de voltaje en cada lugar donde existiera un cambio en las magnitudes, por lo tanto existe un rango de voltaje de operación donde operan eficientemente los instrumento conectados, el cual es fácil de obtener esta restricción es utilizada en flujos óptimos.

$$V_{pmin} \leq V_p \leq V_{pmax} \quad (1-7)$$

$$\delta_{pmin} \leq \delta_p \leq \delta_{pmax} \quad (1-8)$$

1.3.4 RESTRICCIONES DE RESERVA RODANTE.

Estas restricciones son requeridas para enfrentar a contingencias como la salida de alguna de las unidades, o variaciones de carga inesperada en el sistema. Es muy común que la reserva rodante de los generadores en un sistema sea suficiente para suplir la salida de la unidad más grande, con esto se garantiza el suministro de energía ante esta contingencia. La total generación debe ser mayor que la demanda más las pérdidas, más un cierto valor preestablecido de reserva rodante.

$$\sum P_G \geq P_D + P_R \quad (1-9)$$

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Donde P_G es la total generación, P_D es la potencia suministrada y P_R es la reserva rodante. ®

1.3.5 RESTRICCIONES DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN.

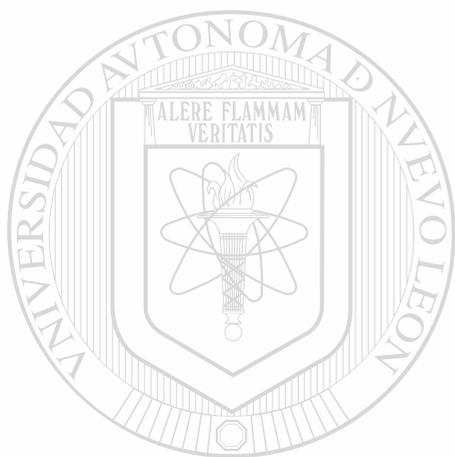
El flujo de potencia en una línea de transmisión está restringido principalmente por cuestiones de seguridad de estabilidad y de intercambio preestablecido, en este tipo de restricciones intervienen las características de la red y su capacidad:

$$T_p \leq T_{max}$$

(1-10)

T_p = Limite superior de transmisión

T_{max} = Limite máximo de transmisión



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CAPITULO II



CARACTERÍSTICAS DE LAS UNIDADES DE GENERACIÓN

UANL

INTRODUCCIÓN :

Todas las centrales generadoras tienen parámetros y características que los distinguen de otras, pero sin duda los más determinantes son los referentes a la eficiencia del sistema caldera- turbina- generador en el proceso de conversión de la energía.

En el caso de centrales termoeléctricas el factor de eficiencia se mide por la relación de potencia de entrada o gasto de combustible y la potencia de salida en megawatts , antes de entrar en detalles es preciso mencionar la forma de generación de una planta termoeléctrica, la cual cuenta con un sistema caldera-turbina-generador. La

caldera es un depósito con agua cuya función es proveer de vapor sobrecalentado a la turbina, es en la caldera en donde se realiza el primer cambio de energía, de los quemadores de combustible a la producción de vapor, es decir de energía química a energía térmica. El vapor es sobrecalentado, para evitar partículas líquidas, después es llevado a través de tubos a la turbina, la cual trabaja por acción o reacción. En todas las turbinas existen tres etapas, la etapa de alta presión, la etapa de presión intermedia y la de baja presión; con esto se aumenta considerablemente la eficiencia de la máquina ya que el vapor puede ser varias veces reutilizado antes de regresar a la caldera.

La energía mecánica producida en la turbina por el vapor es transmitida directamente por medio de una flecha al generador, el cual se encargará de transformar esa energía en electricidad. El sistema de una planta termoeléctrica consta de muchos otros componentes y etapas pero no es objeto de este capítulo describirlas.

2.1 CURVAS CARACTERISTICAS.

INTRODUCCION:

En el análisis de operación de cualquier sistema, es importante conocer las variables que intervienen en el proceso. En la operación económica de carga, las curvas características de las unidades generadoras, juegan un papel importante en la operación del sistema de potencia.

2.1.1 CURVA ENTRADA - SALIDA.

Todos los procesos brevemente mostrados tienen su repercusión en la eficiencia total

de la máquina, todas las pérdidas, deficiencias de fabricación, errores de manejo, se suman para lograr una sola eficiencia o una relación de potencia de entrada contra potencia de salida.

Los datos de la característica de entrada-salida, pueden ser obtenidos por cálculos en el diseño de las máquinas o por pruebas en la máquina instalada, cabe mencionar que cuando se pone en funcionamiento por primera vez una planta termoeléctrica o después de estar sin funcionar por largo tiempo, se le hacen pruebas de consumo específico aún conociendo las características de entrada-salida proporcionadas por el fabricante. Es lógico pensar que los datos dados por el fabricante pueden ser alterados y de hecho lo son por las condiciones geográficas del lugar o por cuestiones de instalación del equipo, por lo que se justifican las pruebas.

Comúnmente se encuentra que los resultados de las pruebas de eficiencia no caen en una curva plana con facilidad de interpretación, debido a que las plantas termoeléctricas tienen varios puntos críticos, especialmente los térmicos. Sin embargo cuando la prueba se efectúa con mucha resolución, en varios pasos, (puntos de prueba), generalmente de ocho a trece, desde su potencia mínima a su potencia máxima, se observa que los resultados pueden ser modelados en un polinomio de segundo grado:

$$F = a + bP_g + cP_g^2 \text{ Kcal/h} \quad (2-1)$$

Esta misma formulación también puede representar una función de costo, que es la más usada en despacho económico, quedando como:

$$\text{Costo} = a + bP_g + cP_g^2 \quad \$/h \quad (2-2)$$

Una gráfica representativa de esta relación de entrada-salida o de costo sería la siguiente:

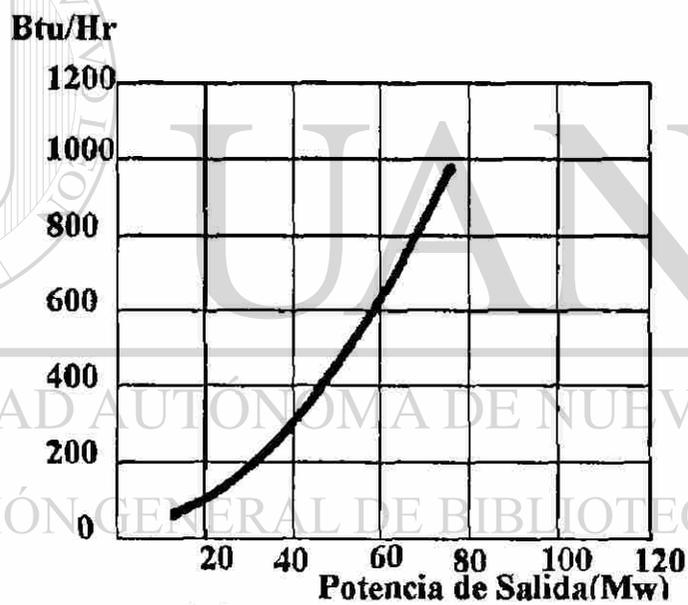


Figura 2.1 Curva de potencia entrada - salida

2.1.2 CURVA DE COSTO INCREMENTAL.

Cada planta cuenta con su representación polinomial única y muestra los resultados

finales de su eficiencia; ahora bien es posible conocer que a un aumento en la potencia de entrada se presenta un aumento en la potencia de salida, también es posible conocer la eficiencia, y esto se logra obteniendo la derivada de su curva de entrada-salida es decir su costo incremental, o incremento en costo que se necesita para un incremento en la potencia de salida.

El costo incremental puede ser comparado con otro y observar una coordinación de plantas eléctricas, la cual será la que suministre el próximo aumento de demanda, naturalmente que lo hará la de menor costo incremental. En pocas palabras la función de costo incremental expresa el costo del siguiente mega-watt en un generador. Por ser el costo incremental la derivada de la curva entrada-salida, se formula como:

$$\text{Costo Incremental} = \frac{dc}{dPg} = b + 2cPg \text{ \$/Mwh} \quad (2-3)$$

Desarrollando esta formulación queda la siguiente gráfica de costo incremental, donde la abcisa está en MW y la ordenada en Kcal/MwHr.

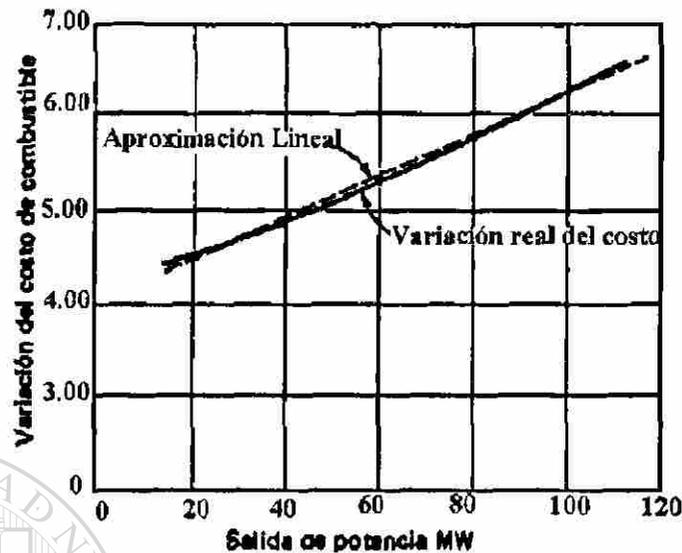


Figura 2.2 Costo incremental

2.1.3 CURVA DE CONSUMO ESPECIFICO.

Otra característica importante en las unidades termoeléctricas es la curva de consumo específico (heat- rate). Esta característica resulta de la energía de entrada sobre la energía eléctrica de salida, contra la potencia de salida. Esto es el recíproco de la característica de eficiencia desarrollada por la máquina. La característica de consumo específico se mide en BTU/Kwhr contra Mw.

La curva de consumo específico representa la eficiencia de un generador en forma instantánea; por ejemplo la mayoría de las unidades termoeléctricas tienen un rango de consumo específico de 11400 BTU/Kwhr en su potencia de menor eficiencia (Primeras), y 9800 BTU/Kwhr en su máxima eficiencia (potencias de generación

entre 80 y 90% de su capacidad máxima). De tal manera que las centrales termoeléctricas poseen una eficiencia total del 30 al 35%^[3], basándose en que un Kwhr, energía eléctrica, tiene una equivalencia mecánica de 3412 BTU, energía mecánica. La figura 2.3 muestra una curva de consumo específico característica de la central termoeléctrica.

Las pruebas de Heat Rate se usan para comprobar los parámetros de la curva de potencia de un generador, lo cual se comentará a continuación. La siguiente figura muestra una curva típica de consumo específico.

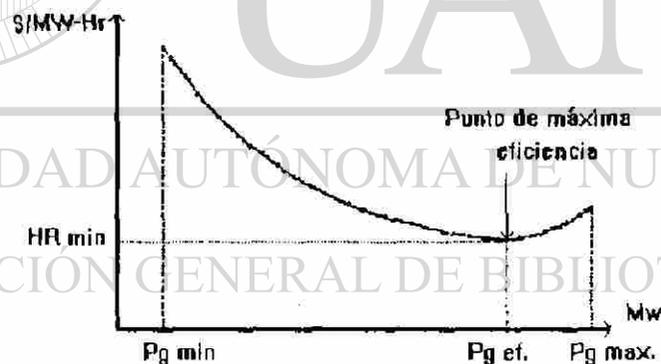


Figura 2.3 Consumo Especifico.

De esta curva por medio de ajuste se puede obtener el polinomio de entrada- salida.

2.2 OBTENCION DE COEFICIENTES DEL POLINOMIO DE ENTRADA SALIDA A PARTIR DE LA PRUEBA DE CONSUMO ESPECIFICO⁽³⁾.

Los datos referentes a los parámetros del polinomio de entrada-salida de una central generadora, o alguna otra unidad están propensos a cambios provocados por diversos factores. Por tal motivo es conveniente realizar pruebas de campo para rectificar los parámetros a,b,c, del polinomio de la curva de entrada-salida. Un error en los datos de la máquina traerá como consecuencia una curva errónea y por tal un mal despacho económico y uso inadecuado de los recursos.

La prueba de heat rate o consumo específico es propicia para realizar la obtención de los coeficientes a,b,c; a partir de ella se puede calcular la curva de entrada-salida si se cuenta con un número suficientes de muestras de consumo específico.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
 Partiendo de las pruebas de consumo específico para cada consumo le corresponde [®]
 DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS
 una potencia de salida:

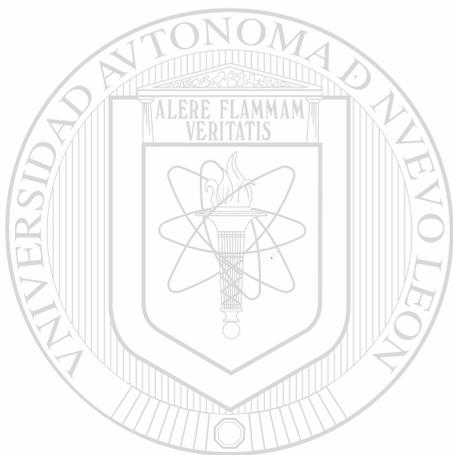
$$HR = \frac{a}{P} + b + cP \quad (\$/MW-Hr.) \quad (2-4)$$

Si se consideran n mediciones:

$$HR_1 = \frac{a}{Pg_1} + b + cPg_1 + \epsilon_1 \quad (2-5)$$

$$HR_1 = \frac{a}{Pg_2} + b + cPg_2 + \epsilon_2 \quad (2-6)$$

$$HR_3 = \frac{a}{Pg_3} + b + cPg_3 + \epsilon_3 \quad (2-7)$$



$$HR_n = \frac{a}{Pg_n} + b + cPg_n + \epsilon_n \quad (2-8)$$

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Donde ϵ_i es el error de la *i-sima* medición.

Aplicando directamente la técnica de los mínimos cuadrados se puede obtener un resultado negativo en algunos de los coeficientes a, b, c , lo cual debe ser evitado con el fin de lograr una buena aproximación. Se restringen a cumplir ciertas condiciones para lograr lo anterior.

Agregando la restricción de que la curva de heat rate tenga un punto mínimo, el

punto mínimo se encuentra derivando la ecuación de consumo específico:

$$\frac{dHR}{dPg} = -\frac{a}{Pg^2} + c = 0 \quad (2-9)$$

Por lo tanto:

$$Pg_{ef} = Pg^* = \pm \sqrt{\frac{a}{c}} \quad (2-10)$$

Se plantea la restricción:

$$0 = -\frac{a}{Pg_{ef}^2} + cPg_{ef} \quad (2-11)$$

Considerando la eficiencia de la máquina:

$$\alpha = \frac{Pg_{ef}}{Pg_{max}} \approx 80\% \text{ a } 90\% \quad (2-12)$$

Con las dos últimas ecuaciones se forma:

$$0 = -\frac{a}{\alpha^2 Pg_{max}^2} + c\alpha Pg_{max} \quad (2-13)$$

Introduciendo al sistema de ecuaciones para n mediciones, junto con la ecuación anterior, queda el siguiente sistema matricial:

$$\begin{array}{c}
 0 \\
 \text{HR1} \\
 \text{HR2} \\
 \text{HR3} \\
 \vdots \\
 \text{HRn}
 \end{array}
 =
 \begin{array}{c}
 -\frac{1}{\alpha P_{g_{\max}}} \quad 0 \quad \alpha P_{g_{\max}} \\
 \frac{1}{P_{g_1}} \quad 1 \quad P_{g_1} \\
 \frac{1}{P_{g_2}} \quad 1 \quad P_{g_2} \\
 \frac{1}{P_{g_3}} \quad 1 \quad P_{g_3} \\
 \vdots \\
 \frac{1}{P_{g_n}} \quad 1 \quad P_{g_n}
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 a \\
 b \\
 c \\
 \vdots
 \end{array}
 +
 \begin{array}{c}
 \epsilon_0 \\
 \epsilon_1 \\
 \epsilon_2 \\
 \vdots \\
 \epsilon_n
 \end{array}$$

En el sistema anterior se le aplica la técnica de mínimos cuadrados ponderados, que consiste básicamente en minimizar la sumatoria de los cuadrados de los errores, para lo cual el sistema anterior es puesto en forma de ecuación de matrices:

$$HR = H \cdot X + \epsilon \quad (2-14)$$

HR= Vector de Mediciones de Heat Rate

H= Matriz de mediciones de Potencia

X= Vector de incógnitas(a,b,c)

ϵ = Vector de errores de medición

A continuación se forma una matriz diagonal W para ponderar los errores:

$$W = \begin{pmatrix} w_0 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & w_1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & & w_2 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & & \ddots & \dots & 0 \\ \vdots & & & & \ddots & 0 \\ 0 & & & & & w_n \end{pmatrix}$$

Se controla el valor de w_0 , con respecto a los demás w_s . Asignando un valor de $w_0 = 10^{-10}$ y un valor de 1 para los demás w_s .

Se plantea un índice de funcionamiento mediante una sumatoria de los cuadrados de los errores.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS
Despejando ϵ de la ecuación de matrices se obtiene:

$$\epsilon = HR - H \cdot x \quad (2-15)$$

$$J = \sum \epsilon_i^2 = \epsilon^t \cdot W \cdot \epsilon \quad (2-16)$$

$$J = (HR - H \cdot x)^t \cdot W \cdot (HR - H \cdot x) \quad (2-17)$$

Efectuando los productos internos y derivando el índice J con respecto a los parámetros x se tiene:

$$\frac{\partial J}{\partial x} = HR'WH - H'WHR - 2H'WH \quad x = 0 \quad (2-18)$$

Despejando x :

$$x = (H'WH)^{-1} \cdot H'WHR \quad (2-19)$$

Con esto se obtiene una aproximación de los coeficientes a partir de los datos de las pruebas de consumo específico.

Ejemplo:

1er paso:

Se obtienen los puntos de la curva de consumo específico, para cada dato de consumo de la unidad, obteniéndose a la vez una potencia de salida. A partir de

estos puntos se obtiene el vector HR .

$$HR = \begin{bmatrix} 0 \\ 3.75 \\ 3.55 \\ 3.43 \\ 3.36 \\ 3.31 \\ 3.3 \\ 3.29 \\ 3.3 \\ 3.32 \\ 3.35 \\ 3.38 \end{bmatrix}$$

2do paso:

Se obtiene la relación para la máxima eficiencia de la unidad (α)

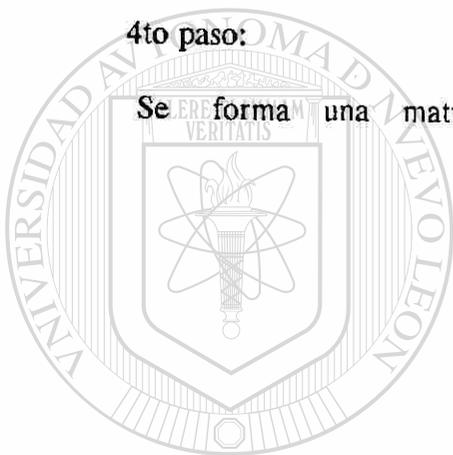
$$\alpha = \frac{PG_{\text{eff}}}{PG_{\text{máx}}} = \frac{120}{150} = .8$$

3er paso:

Se le agrega un vector de errores de medición.

4to paso:

Se forma una matriz de mediciones de potencia H.



UANL

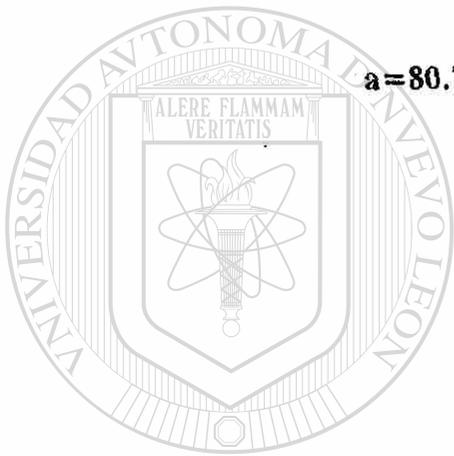
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



5to paso:

Con los vectores y las matrices calculadas, aplicando la ecuación (2-19), se encuentran los coeficientes $x = (a, b, c)$ del polinomio. El resultado se obtuvo planteando el sistema de ecuaciones en una hoja de calculo avanzada MATLAB, y son los siguientes.



$$a=80.7$$

$$b=1.82$$

$$c=.0068$$

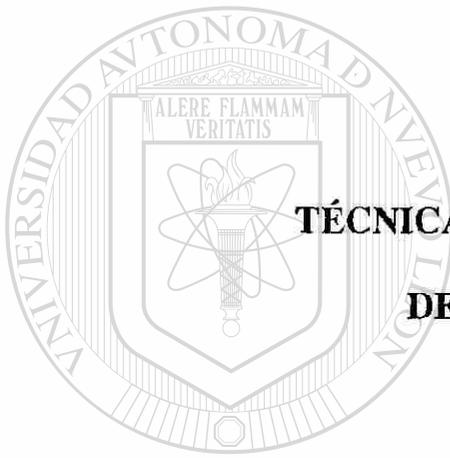
UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



CAPITULO III



TÉCNICAS DE SOLUCIÓN AL PROBLEMA DE DESPACHO ECONÓMICO

UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



INTRODUCCIÓN:

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Existen diversas formulaciones para resolver despacho económico, una de las más útiles es la de programación lineal^[4]. Al linealizar un modelo de segundo grado con la finalidad de simplificar el procedimiento, se logra un ahorro de tiempo. Esta es una técnica cuyos resultados son de un valor aproximado a los obtenidos con programación

no- lineal.

La finalidad del método lineal, es obtener un conjunto de rectas a partir del polinomio cuadrático de la ecuación de costo de las unidades generadoras. El despacho económico busca la forma óptima de distribuir la demanda de energía entre los generadores disponibles, el método lineal es una herramienta que ayuda a lograr este objetivo mostrando excelentes resultados.

En este trabajo se desarrollaron programas que ayudan a obtener el despacho económico sin pérdidas y con pérdidas, tomando en cuentas las restricciones más importantes del sistema.

Dichos programas arrojan resultados satisfactorios al momento de calcular el despacho económico, los programas son ejecutados en una hoja de calculo avanzada llamada MATLAB. Las rutinas de los programas se mencionarán en el apéndice.

A continuación se muestra algunas metodologías utilizadas para la solución de despacho, las cuales se presentan sin tomar en cuenta todas las restricciones del sistema.

3.1 TÉCNICAS DE SOLUCIÓN.

INTRODUCCIÓN:

Cuando se analiza un sistema de potencia desde el punto de vista de operación

económica, el objetivo principal es ver que existen diferentes maneras de satisfacer la demanda que esta solicitando el sistema, donde algunas condiciones serán mas costosas que otras . Para definir cual de las condiciones es la mejor dentro de unos limites de seguridad y calidad establecidos se requiere obtener un punto óptimo de operación dentro de los rangos posibles que permitan el ajuste de los niveles de generación en las centrales.

Estos planteamiento permitirán definir el problema en términos de optimización, debido a que se requiere generar energía y distribuirla en forma óptima.

El plantear el problema de operación económica en términos de optimización, permitirá plantear una función objetivo adecuada a las variables involucradas en el problema. El

conocimiento de las técnicas de optimización que se pueden adecuar a este tipo de problemas permitirá alcanzar el óptimo con prontitud.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

En los sistemas de potencia las condiciones de operación están cambiando constantemente , debido a este se visualiza la no linealidad del sistema. En este capitulo se analizaran diferentes formulaciones para darle solución al problema de despacho económica.

3.1.1 MULTIPLICADORES DE LAGRANGE .^[4]

El problema de despacho económico minimiza los costos de generación en base a dos consideraciones, una es que el costo total es la suma de los costos individuales de cada generador, y dos, la restricción principal de operación es que la suma de las potencias de generación deben ser igual a la demanda. Matemáticamente el problema tiene una función objetivo la cual se minimiza con la restricción de demanda. Sin olvidar que pueden existir otras restricciones como los flujos en las líneas de transmisión, límites en los generadores, límite en voltaje, etc.

$$C_t = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n \quad (3-1)$$

$$C_i = \sum C_i(P_i) \quad (3-2)$$

sujeta a:

$$\theta = P_{\text{demanda}} - \sum P_i \quad (3-3) \quad \text{®}$$

Este modelo matemático muestra un caso de mínimo con restricción, lo cual puede resolverse usando el método de multiplicadores de Lagrange. El mínimo con restricción se obtiene derivando el lagrangeano de la función por cada una de las variables independientes y también por un número escalar no nulo llamado multiplicador de Lagrange reconocido por la letra griega λ . Lo cual se muestra en las siguientes

ecuaciones:

$$\mathcal{L} = Ct + \lambda \theta \quad (3-4)$$

derivando parcialmente:

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial P_i} = \frac{dCi}{dPi} - \lambda = 0 \quad (3-5)$$

$$\sum P_i - Pd = 0 \quad (3-6)$$

Con este conjunto de ecuaciones se puede resolver el problema de despacho económico sin considerar pérdidas.

El despacho económico considerando pérdidas presenta más complicaciones debido a que interviene por lo menos otra restricción, la cual depende de los parámetros de las líneas de transmisión. La función objetivo Ct es la misma que la de despacho sin pérdidas, pero la ecuación de restricción se expande como se muestra a continuación:

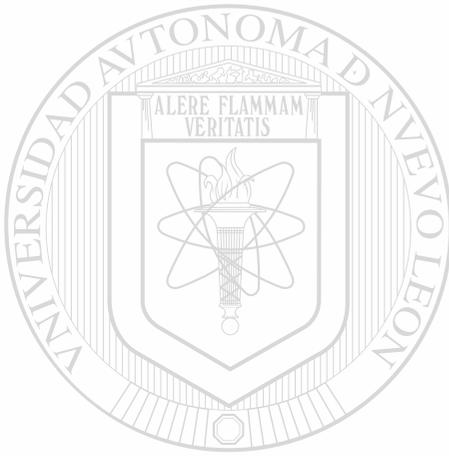
$$Pd + Pl - \sum P_i = 0 \quad (3-7)$$

P_L son las pérdidas del sistema. El mismo procedimiento es empleado para obtener el Lagrangeano y derivarlo con respecto a cada variable independiente y también sobre

λ para la obtención del mínimo. Con lo cual se obtiene lo siguiente:

$$\mathcal{L} = C_t + \lambda \theta \quad (3-8)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial P_i} = \frac{dC_i}{dP_i} - \lambda \left(1 - \frac{\partial P_i}{\partial P_i}\right) = 0 \quad (3-9)$$



$$\frac{dC_i}{dP_i} + \lambda \frac{\partial P_i}{\partial P_i} = \lambda \quad (3-10)$$

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

$$Pd + Pl - \sum P_i = 0 \quad (3-11)$$

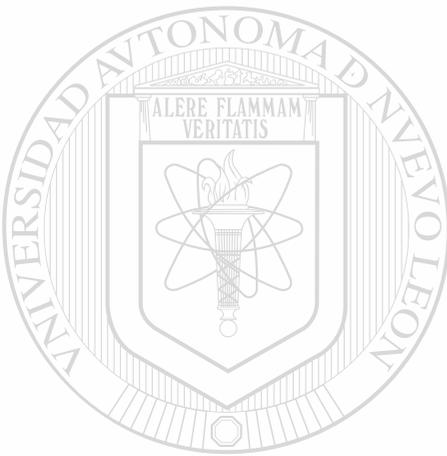
De la penúltima ecuación se obtiene el coeficiente de pérdidas, reconociendo que al variar la generación de una central solo puede afectarse el costo de producción de ella misma:

$$\frac{dC_i}{dP_i} \frac{1}{1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_i}} = \lambda \quad (3-12)$$

A L_i se le denomina el factor de penalización de la central i , que es único para cada central. La ecuación queda:

$$L_i = \frac{1}{1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_i}} \quad (3-13)$$

$$\frac{dC_i}{dP_i} L_i = \lambda \quad (3-14)$$



Si se sigue el criterio de igual costo incremental, se puede obtener un mínimo al variar el valor de λ , al mismo valor para todas las centrales. Con lo que se resume que los costos incrementales de una central multiplicados por su factor de penalización deben ser iguales entre todas las centrales e igual también a λ .

$$\frac{dC_1}{dP_1} L_1 = \frac{dC_2}{dP_2} L_2 = \frac{dC_3}{dP_3} L_3 = \lambda \quad (3-15)$$

Las pérdidas por transmisión P_L se pueden obtener por diferentes métodos, uno de ellos es de los coeficientes B , y estudios de flujos de potencia entre otros.

3.1.2 MÉTODO DE IGUAL COSTO INCREMENTAL^[5]

Es un método sencillo utilizado en problemas de despacho económico, en el cual la función de costos depende del costo de combustible y otros costos variables, además las restricciones de la red y las pérdidas se desprecian de los costos de generación, con lo que se simplifica notablemente. El método del costo incremental tiene su base en los multiplicadores de Lagrange, donde se establece que los costos incrementales de cada generador deben ser iguales^[1] entre si siempre y cuando se encuentren entre sus límites

$$C.I = \lambda.$$

$$\frac{d_{c_1}}{d_{p_1}} = \frac{d_{c_2}}{d_{p_2}} = \lambda \quad (3-16)$$

Conociendo el costo incremental inicial comienza el proceso iterativo desde un valor inicial de lambda hasta el que satisface la demanda. En cada iteración se pueden presentar estos casos:

. Que $\sum P_{g_i} < P$ demanda \rightarrow En este caso se efectua

Otra iteración aumentando el valor de λ

. Que $\sum P_{g_i} > P$ demanda \rightarrow En este caso se efectua

otra iteración disminuyendo el valor de λ

. Que $\sum P_{g_i} = P$ demanda \Rightarrow El valor de λ es el correcto

Se soluciona el problema

A continuación se muestra en la tabla I valores de lambda (λ), desde su valor inicial, hasta encontrar el valor de lambda que cumpla que la sumatoria de las potencias de

generación igual a la potencia de demanda, y en la **tabla II** el ajuste de (λ) hasta que cumpla con la restricción de demanda.

λ (Inicial)	λ (Aumento)	λ (Disminución)
4 \$/Mw-hr		
	4.3 \$/Mw-hr	
	4.6 \$/Mw-hr	
	4.69 \$/Mw-hr	
	4.9 \$/Mw-hr	
		4.85 \$/Mw-hr
		4.8 \$/Mw-hr

Tabla I.- Valores de lambda (λ), desde su valor inicial hasta encontrar el que satisfaga la restricción de demanda.

Con la obtención de lambda del sistema se calculan las potencias de cada generador. El costo total de generación del despacho económico es la suma de los costos individuales de cada generador a la potencia calculada. Aunque este método es lento, muestra claramente los efectos de cambiar el valor de lambda, los resultados son tabulables y además se observa cuando un generador viola un límite de generación. Este

método puede ser introducido en un algoritmo de computadora como el que se muestra en la figura No. 3.1 con el fin de aligerar el trabajo:

λ (Sistema)	Demanda (Mw)	Generador1(Mw)	Generador2(Mw)
4 \$/Mw-hr	500	250	83.33
4.3 \$/Mw-hr	500	287.5	108.33
4.6 \$/Mw-hr	500	325	133.33
4.69 \$/Mw-hr	500	336.25	140.83
4.9 \$/Mw-hr	500	362.5	158.33
4.85 \$/Mw-hr	500	353.75	154.16
4.83 \$/Mw-hr	500	353.75	152.50
4.80 \$/Mw-hr	500	350.00	150.00

Tabla II.- Incremento del valor de lambda (λ), hasta que el valor de la sumatoria de los generadores sea igual a la demanda.

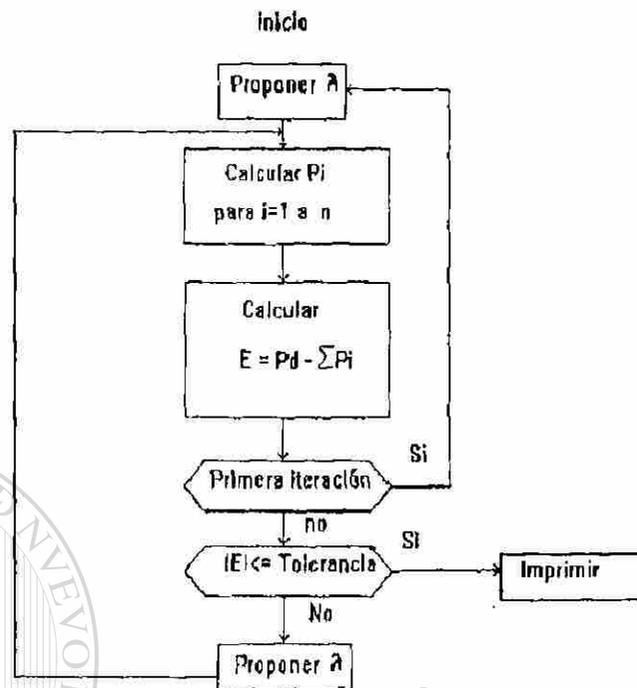


FIGURA No. 3.1 Método de igual costo incremental

3.1.3 DESPACHO ECONÓMICO POR EL MÉTODO DEL GRADIENTE.

3.1.3.1. MÉTODO DEL GRADIENTE DE PRIMER ORDEN^[6].

Este método es uno de los más exactos, es un procedimiento de alcance de su punto óptimo, por lo tanto de naturaleza iterativo. El gradiente de primer orden tiene variadas aplicaciones en problemas en donde es importante el conocimiento físico de las variables, la naturaleza del problema y la conducta de la función objetivo cuando son calculadas sus variables. El alcance con el gradiente empieza con una solución factible, es decir que cumple con la función objetivo y sus restricciones, y se busca una trayectoria factible hasta que en un proceso iterativo se alcanza la solución óptima.

Es una gran ventaja que el método del gradiente de primer orden siempre presente una solución factible en cada momento, esto permite decidir en cualquier momento de la iteración un conjunto de variables es conveniente, dependiendo de otras restricciones, que a veces no se pueden integrar al modelo, que son en cierto modo intangibles, como los efectos ecológicos. En este método se tiene la seguridad de que si conviene un cierto valor aunque no sea el óptimo, el resultado será factible.

La desventaja que presenta el método del gradiente de primer orden es que no tiene un indicador que establezca cuando parar, en cada iteración se va mejorando la función objetivo, esto dificulta la obtención del punto óptimo. Normalmente los alcances por gradientes siguen con sus iteraciones hasta que la ganancia de una iteración sea insignificante en la función objetivo, o hasta que el número de iteraciones haya excedido un valor determinado.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Para empezar la técnica del primer gradiente se toma la función objetivo y la ecuación de restricción:

$$Ct = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n \quad (3-17)$$

$$\theta = Pd - \sum P_i \quad (3-18)$$

Después se asume que el sistema es operado en un punto factible de solución, es decir

que la suma de las potencias de generación es igual a la demanda, enseguida se considera que la potencia de salida de cada generador es cambiada incrementándose en una pequeña cantidad para encontrar un nuevo punto factible de operación. Lo anterior se hace con la ayuda de la serie de Taylor aplicada a la función objetivo:

$$C_{t+\Delta C_t} = C_1(P_1) + C_2(P_2) + \dots + C_n(P_n) \quad (3-19)$$

$$+ \frac{dC_1}{dP_1} \Delta P_1 + \frac{dC_2}{dP_2} \Delta P_2 + \dots + \frac{dC_n}{dP_n} \Delta P_n$$

$$+ \frac{1}{2} \left(\frac{d^2C_1}{dP_1^2} [\Delta P_1]^2 + \frac{d^2C_2}{dP_2^2} [\Delta P_2]^2 + \dots \right) + \dots$$

La serie de Taylor es mostrada hasta los términos de segundo orden, pero se ha comprobado que en la relación del incremento pueden despreciarse los términos de segundo orden y mayores. La siguiente ecuación muestra el primer orden de cambios en la función objetivo:

$$\Delta C_t = \frac{dC_1}{dP_1} \Delta P_1 + \frac{dC_2}{dP_2} \Delta P_2 + \dots + \frac{dC_n}{dP_n} \Delta P_n \quad (3-20)$$

Enseguida se considera la ecuación de restricción, tomando el enfoque que la suma de todos los incrementos de potencia deben ser igual a cero, con esto se permiten que los

incrementos mantengan la condición de factibilidad:

$$\sum_{i=1}^n \Delta P_i = 0 \quad (3-21)$$

Esta restricción permite además un buen grado de libertad al poder decidir cual generador incrementará o decrementará su potencia. Sin embargo por cuestiones de implementación computacional de este método, por lo menos una unidad de generación debe ser seleccionada como variable dependiente. En este caso la variación de potencia de este generador dependiente (P_x), es la suma negativa del incremento de potencia de salida de las restantes unidades:

$$\Delta P_x = -\sum_{i \neq x}^n \Delta P_i \quad (3-22)$$

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN.®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Las últimas dos ecuaciones se combinan para formular el cambio en la función objetivo C_t , como una función del incremento en la potencia de salida, esta es la base del método del gradiente de primer orden. Después se hace una lista de incrementos en la potencia de cada generador, manteniendo la condición de factibilidad y comparando resultados. Enseguida se detecta una tolerancia y se decide si hay que hacer otra iteración o se termina el cálculo. La menor disminución de costos para una potencia establecida está dada por la siguiente ecuación:

$$\Delta C_t = \sum_{i=x}^n \left[\frac{dC_i}{dP_i} - \frac{dC_x}{dP_x} \right] \Delta P_i = \sum_{i=x}^n \frac{\partial C_t}{\partial P_i} \Delta P_i \quad (3-23)$$

Como se menciono anteriormente este método empieza con una solución factible inicial, luego se selecciona cual generador será el dependiente P_x , después se aplica un incremento a cada generador, inicialmente de igual cantidad y se aplica en la ecuación anterior.

El resultado obtenido tiene la particularidad de ser individual, de tal manera que se puede observar cual generador aporta una disminución y cual un aumento. Con lo anteriormente expuesto se toma el criterio de cual generador será ahora el dependiente en la siguiente iteración y se decide cuanto será en nuevo incremento en cada generador.

La Figura 3..2 muestra el algoritmo del método del gradiente de primer orden, los diferentes puntos de operación son revisados primero si alcanza un límite de generación tanto en las variables independientes como en la variable dependiente, se compara el decremento de la ecuación de costos y se decide si hay que hacer otra iteración, si es necesaria se vuelve a seleccionar la variable dependiente y el nuevo incremento.

Por último se checa si el incremento de C_t sobrepasa la tolerancia o si es aceptado como solución.

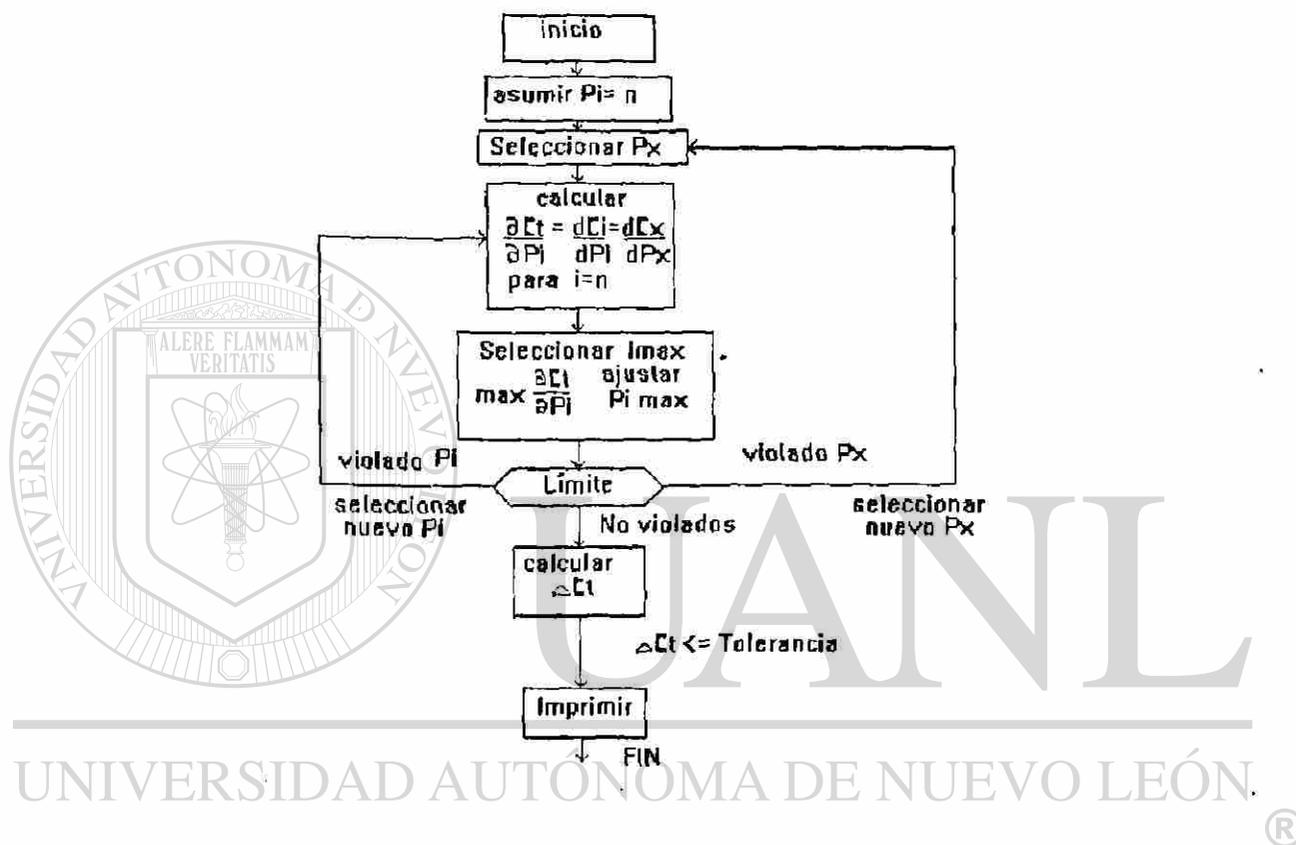


Figura 3.2 Método del gradiente de primer orden

3.1.3.2. MÉTODO DEL GRADIENTE DE SEGUNDO ORDEN⁽⁷⁾

Los resultados del método del gradiente de primer orden pueden ser mejorados notablemente en la trayectoria de búsqueda, usando los términos de segundo orden de

la expansión de la serie de Taylor de la ecuación del costo total de generación. El problema es el mismo, encontrar un camino económico de generación para un nivel de demanda.

$$C_{t+\Delta t} = C_1(P_1) + C_2(P_2) + \dots + C_n(P_n) \quad (3-24)$$

$$+ \frac{dC_1}{dP_1} \Delta P_1 + \frac{dC_2}{dP_2} \Delta P_2 + \dots + \frac{dC_n}{dP_n} \Delta P_n$$

$$+ \frac{1}{2} \left(\frac{d^2 C_1}{dP_1^2} (\Delta P_1)^2 + \frac{d^2 C_2}{dP_2^2} (\Delta P_2)^2 + \dots + \frac{d^2 C_n}{dP_n^2} (\Delta P_n)^2 \right) + \dots$$

Con esto se obtiene mayor exactitud al incluir las derivadas parciales de segundo orden en el problema. La segunda derivada del costo de generación para una unidad dada es normalmente dependiente de la potencia de salida de esa unidad o lo que es lo mismo:

$$\frac{\partial^2 C_i}{\partial P_i \partial P_j} = 0 \quad (3-25)$$

Para toda $i \neq j$ Este método también necesita considerar que la suma de las potencias de salida de los generadores debe ser igual a cero. Junto con esto aparece también la condición de adoptar una variable de generación dependiente P_x .

$$\sum_{i=1}^n \Delta P_i = 0 \quad (3-26)$$

$$\Delta P_x = -\sum_{i \neq x} \Delta P_i \quad (3-27)$$

Ahora bien si se sustituye la ecuación anterior (3-27) en la serie de Taylor de la función de costos, considerando los términos de primero y segundo grado, se obtiene:

$$\Delta Ct = \sum_{i \neq x} \left(\frac{dC_i}{dP_i} - \frac{dC_x}{dP_x} \right) \Delta P_i \quad (3-28)$$

$$+ \frac{1}{2} \left[\sum_{i \neq x} \left[\frac{d^2 C_1}{dP_1^2} (\Delta P_1)^2 + \frac{d^2 C_2}{dP_2^2} (\Delta P_2)^2 + \dots \right] \right. \\ \left. + \frac{d^2 C_x}{dP_x^2} (\Delta P_1^2 + \Delta P_2^2 + \dots + 2\Delta P_1 \Delta P_2 + 2\Delta P_1 \Delta P_3 + \dots) \right]$$

El cambio en el costo total de operación ΔCt se puede resolver usando métodos

ordinarios involucrando los cambios independientes de las potencias de salida ΔP_i . Las

restricciones que existen son los límites de generación de cada generador. El mejor

punto de operación se logra cuando la derivada parcial de ΔCt con respecto al

incremento de cada variable independiente ΔP_i es cero. Es decir la derivada parcial

$\partial \Delta Ct / \partial \Delta P_i$ debe ser igual a cero para toda i excepto $i \neq x$. Lo anterior da como resultado

un arreglo de ecuaciones simultáneas:

$$\frac{\partial \Delta C_t}{\partial \Delta P_1} = 0 = \left(\frac{dC_1}{dP_1} - \frac{dC_x}{dP_x} \right) + \frac{d^2 C_1}{dP_1^2} \Delta P_1 + \frac{d^2 C_x}{dP_x^2} \sum_{i \neq x} \Delta P_i \quad (3-29)$$

$$\frac{\partial \Delta C_t}{\partial \Delta P_2} = 0 = \left(\frac{dC_2}{dP_2} - \frac{dC_x}{dP_x} \right) + \frac{d^2 C_2}{dP_2^2} \Delta P_2 + \frac{d^2 C_x}{dP_x^2} \sum_{i \neq x} \Delta P_i \quad (3-30)$$

Una buena aproximación de estas últimas ecuaciones (3-29) y (3-30) son las siguientes:

$$C'_i = \frac{dC_i}{dP_i} \quad (3-31)$$

$$C''_i = \frac{d^2 C_i}{dP_i^2} \quad (3-32)$$

Ambas ecuaciones deben ser evaluadas para un punto inicial de operación. Entonces las

N-1 ecuaciones simultáneas son puestas en forma matricial para obtener el incremento de potencia:

$$\begin{vmatrix} C_1'' + C_x' & C_x'' & C_x'' & \dots \\ C_x'' & C_2'' + C_x'' & C_x'' & \dots \\ C_x'' & C_x'' & C_3'' + C_x'' & \dots \\ \circ & \circ & \circ & \\ \circ & \circ & \circ & \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \circ \\ \circ \end{vmatrix} = - \begin{vmatrix} C_1' - C_x' \\ C_2' - C_x' \\ C_3' - C_x' \\ \circ \\ \circ \end{vmatrix}$$

El método por alcance de gradiente de segundo grado produce componentes multidimensionales del gradiente de la función de costos de la manera siguiente:

1. Empieza con una solución factible y obtiene la matriz inicial.
2. Se soluciona el sistema de ecuaciones para obtener el nuevo incremento de cada generador.
3. Se verifica si la solución si cumple con las restricciones y no viola los límites de generación.
4. Checa los valores de el vector $(C'_1, -C'_x)$ en el nuevo punto de operación para observar si todos los costos incrementales son iguales. Si los costos incrementales no son iguales el procedimiento se repite.

El método del segundo gradiente parece más complicado que el del primer gradiente, pero tiene una gran ventaja, el resultado siempre converge en un solo paso.^[7] Con esto se elimina todos los problemas de iteraciones que tiene el método del primer gradiente.

3.1.4 DESPACHO ECONÓMICO DE POTENCIA REACTIVA.

No es común hablar de despacho económico en el ámbito de la potencia reactiva, la razón de esto lo explica el hecho de que la potencia reactiva se obtiene o se controla por medio de los siguientes métodos: El uso de capacitores en paralelo en los buses de

carga para corregir localmente el factor de potencia, el uso de capacitores en subestaciones, líneas de transmisión y distribución para corregir el factor de potencia de potencia de un circuito, el uso de condensadores síncronos y otros dispositivos para soportar el nivel de voltaje en líneas de transmisión y distribución en la industria. Y la generación de potencia reactiva en las centrales para mantener un nivel de voltaje. Por estas razones el despacho económico de potencia reactiva llega a ser un aspecto secundario, pero a su vez importante por la importancia en la operación de un sistema de potencia. Sin embargo en algunos casos el flujo óptimo de potencia reactiva tiene también importancia económica.

Todos los procedimientos anteriores dan como resultado un bajo intercambio de potencia reactiva, más sin embargo como son relativamente simples aplicarlas, queda en duda la alternativa de crear un despacho económico de potencia reactiva. Pero la excepción

siempre está presente en los sistemas eléctricos de potencia, tan es así que existen métodos creados especialmente para la solución de despacho económico de potencia reactiva, claro en sistemas que lo requieran, uno de los métodos más usados es la solución por el gradiente de Dommel-Tinney. (*)^[8]

Al nivel de generación y transmisión el método Dommel-Tinney es el adecuado para calcular el despacho económico de potencia reactiva. La potencia reactiva es producida desde las centrales por medio de los generadores síncronos, dependiendo del costo de producción se decide que central utilizar. La ecuación de costos en el análisis de

potencia reactiva no se puede modelar matemáticamente.

Los límites de potencia reactiva pueden aparecer también en restricciones de desigualdad en despacho económico; sin embargo hay una consideración que impide que el despacho económico de potencia reactiva sea aplicado cien por ciento, los capacitores pueden ser modelados en el Lagrangeano de la ecuación de costo de las centrales. Esta situación es seria por que el uso de capacitores realmente afecta al sistema pero no se le puede incluir en ecuaciones simples de costo de generación.

A pesar de esto existen alternativas que se aproximan a una solución, todas estas se basan en la producción que tengan de reactivos por medio de bancos de capacitores en una central, calculando el posible ahorro comparándolo con el gasto que arrojaría producir esa cantidad de reactivos con el generador síncrono de esa central.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN, ®

3.1.5 MÉTODO ALTERNATIVO USANDO PROGRAMACIÓN LINEAL.

Este método de solución busca crear un despacho económico a partir de incrementos de voltaje, hay que recordar que cada cambio de voltaje en un punto, le corresponde un cambio de potencia reactiva (Q) en ese punto. La necesidad de potencia reactiva en un nodo o bus de carga denota el aumento de cargas que requieren corrientes de magnetización como los motores y transformadores. En este método se asume que el incremento de voltaje en un nodo es linealmente proporcional a la inserción de potencia

reactiva al mismo.

1020119053

$$\Delta|V| \delta \Delta Q \quad (3-33)$$

El valor que iguala la proporcionalidad es nada menos que el inverso de la parcial de Q con respecto a V $\partial Q/\partial|V|$ que es una porción del jacobiano del flujo desacoplado para ese sistema eléctrico. Lo anterior es reconocido como B , entonces la ecuación

(3-33) queda:

$$\Delta|V| = B\Delta Q \quad (3-34)$$

En todo despacho económico se procura utilizar el mínimo de recursos para satisfacer una demanda, en este caso se busca un mínimo valor de voltaje que genere la potencia

reactiva que estamos necesitando, considerando además que los cambios de voltaje no reduzcan el voltaje por fuera de sus límite:

$$|V| + \Delta|V| \geq |V \text{ mín}| \quad (3-35)$$

$|V \text{ mín}|$ es el valor mínimo de voltaje aceptado y $|V|$ es el voltaje base, el término

$|\Delta V|$ proviene de una compensación capacitiva, por lo tanto:

$$|\Delta V| = B\Delta Q \geq |V_{\min}| - |V| \quad (3-36)$$

Esta ecuación de desigualdad se combina con una función de costos asumiendo que el costo de potencia reactiva dependerá del incremento de esta función y de un valor preestablecido de C^* :

$$Cq = C^*\Delta Q \quad (3-37)$$

Donde C^* , es un vector renglón de primer grado, de igual dimensión que el vector ΔQ .

La minimización de Cq sujeta a la restricción, y se resuelve por programación lineal.

3.1.6 MÉTODOS NO TRADICIONALES.

Existen gran cantidad de métodos de despacho económico llamados no tradicionales que tienen aplicaciones muy específicas, algunos de estos procedimientos son comentados mas adelante, este tipo de técnicas no tienen una base económica, pero se consideran parte de un despacho óptimo.

3.1.7 MÉTODOS DE DESPACHO DE MÍNIMA CONTAMINACIÓN.

Las diferentes alteraciones que se han provocado al medio ambiente en ciertas zonas, hacen que sea necesario tomar medidas en el aspecto de regular la emisión de agentes contaminantes en las centrales eléctricas. El aspecto ecológico pasa a ser parte del costo

de generación en una central, mediante una función que relaciona la potencia de salida de una maquina con la emisión de contaminantes en la atmósfera. Se sabe que el factor costo es difícil asociarlo con la ecología, mucho más a corto plazo, pero ciertas compañías han hecho esfuerzos para anexar a la función de costos de despacho económico el gasto ecológico que provoca la generación o la inversión que se hace para contrarrestar los efectos de la contaminación. De esta manera el nuevo costo de generación de una central está dado por:

$$C'(P_i) = C(P_i) + \psi(P_i) \quad (3-38)$$

Donde ψ representa el costo de contaminación asociado con la generación total de una central. En cierta manera se penaliza la generación de electricidad, que es tan necesaria, por políticas ecológicas, pero sabemos que en México como en el resto del mundo más

del 70% de la generación de electricidad proviene de las centrales termoeléctricas, que en el mejor de los casos queman gas natural, llegando incluso a consumir carbón con alto contenido de azufre o petróleo crudo, este último es un combustible muy usado por las termoeléctricas de México. Por tal razón que varias compañías en su mayoría de Estados Unidos y de Europa subsidiadas por sus gobiernos emplean estos métodos en épocas y áreas de mayor contaminación ambiental.

Los requerimientos ecológicos pueden ser modelados como una restricción de desigualdad, de esta forma la contaminación creada por la generación de una planta de

carbón o petróleo crudo en una región dada debe ser menor a un límite especificado por la autoridad de protección ambiental.

La experiencia afirma que los índices de contaminación tienen un carácter temporal más que instantáneo. Esta observación da como conclusión que el costo ecológico de generación se puede obtener como la integral definida de P_i para un tiempo específico por la constante de contaminación ψ :

$$C_i = C(P_i) + \psi \left(\int_{t=0} P_i dt \right) \quad (3-39)$$

Sin embargo la manera más sencilla de incluir los valores temporales del costo de contaminación es considerar la función ψ como un escala $\psi(P_i)$, el cual representa

la emisión total en una cierta región para un determinado tiempo. Usando ψ_0 como la emisión al iniciar un período y ψ_i al finalizar el mismo, la emisión total en cierto período queda determinada por:

$$\sum_{i=0}^n \psi_i(P_i) \quad (3-40)$$

De esta manera se pueden obtener los cambios en la contaminación de una central

termoeléctrica y revisarse bajo un patrón de restricción que indique si se esta sobrepasando el nivel permitido de contaminación:

$$\sum_{i=0}^n \psi_i(P_i) - \psi_0(P_0) \leq \bar{\psi} \quad (3-41)$$

Donde $\bar{\psi}$ es el tope máximo de emisión de contaminantes para un período de tiempo, de esta manera se obtiene una nueva función de costo de generación propia para cada generador.

$$\mathcal{L}C_i = C_i(P_i) + \lambda(\sum P_i - Pd) + \sum_k \mu_k [\sum_{i=0}^n \psi_i^k(P_i) + \psi^k(P_i) - \bar{\psi}^k] \quad (3-42)$$

μ_k es un nuevo valor escalar propio de un área específica k. Este es el enfoque del despacho económico considerando la contaminación, existen otros procedimientos más sencillos y otros más complejos, pero todos debido a la dificultad que presenta cuantificar la contaminación, en realidad no son muy comunes. Pero se espera que a futuro se empiece a hacer más investigación sobre este tópico.

3.1.8. DESPACHO DE ALERTA Y EMERGENCIA.

En ocasiones es necesario efectuar modificaciones en la estructura de un despacho económico las cuales carecen de esencia económica. Existen emergencias y estados de

alerta los cuales requieren un despacho que restablezca la condición normal. En todos los métodos anteriores hemos considerado como prioridad una base económica, pero aquí lo principal es evitar un estado de inestabilidad o si ocurre buscar las condiciones para volver al estado estable.

Para comprender mejor como funciona este método es necesario saber que es una condición normal de operación de un sistema de potencia. La condición normal de operación ocurre cuando todos los voltajes en todos los nodos están en un rango especificado de operación, además todas las líneas transmiten por debajo de su límite de carga, y la potencia de generación es igual a la potencia de demanda mas las pérdidas. La operación de alerta empieza cuando se detecta que algún límite de voltaje o de carga es violado, o se empieza a utilizar la reserva de un generador. El estado de operación de emergencia surge cuando ya se pierde completamente la estabilidad,

cuando hay pérdidas de carga, pérdidas de frecuencia de operación, o generación que no pueda abastecer a la demanda.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Dentro del estado de emergencia se encuentra el restablecimiento, que se puede considerar como un cuarto estado de operación, aquí es donde se aplican las medidas de corrección para retomar otra vez la estabilidad en el sistema, los estados de alerta y de emergencia vuelven a la normalidad al establecer las siguientes medidas:

1. Redistribuir el flujo de potencia a través de circuitos los cuales no están usados a su máxima capacidad.

2. Minimizar la diferencia angular entre los voltajes de los nodos.
3. Introducir amortiguamiento al sistema el cual está en oscilación.
4. Intercambiar la potencia entre generadores con el fin de restablecer el balance carga generación.
5. Disparo de carga de ser necesario.

Todos estos procedimientos se pueden clasificar también dentro del control en vez del despacho económico, dependiendo del tiempo que tome restablecer el sistema, hay ocasiones que esta condición puede durar media hora o menos, llegando incluso a durar días. Es común confundir los conceptos de control y despacho de emergencia, pero la principal diferencia es que los métodos de despacho son menos drásticos y menos efectivos en corto plazo. Las estrategias que más se usan en el despacho son redistribuir las cargas, disminuir la diferencia de ángulos entre nodos, intercambiar carga entre generadores; todo lo anterior se efectúa únicamente por medio de coordinación entre generadores o a través de un estudio de flujo de potencia y despacho alternativo.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

3.1.9 ASIGNACIÓN DE UNIDADES.

Este procedimiento no es precisamente un despacho económico, la programación de unidades es un itinerario de asignación de generadores en un período de tiempo. Mientras que el problema de despacho económico trata de encontrar la distribución de potencia a partir de N generadores para cierta demanda. Por otro lado la programación

o asignación de unidades tiene una filosofía mucho más compleja, busca conociendo la disposición de N generadores y un pronóstico de la demanda para cierto tiempo, un menor costo esperado de generación.

El estatuto de la asignación de unidades es el siguiente: Dado un sistema interconectado con N generadores y que existe varias combinaciones de arreglos de generación que podrían satisfacer la demanda esperada, se estudia cuál de esos arreglos debería ser usado en orden de importancia para satisfacer esa demanda con mínimo costo de operación.

El problema de asignación de unidades puede establecerse para un día, una semana o más tiempo, mientras mayor sea el tiempo se dificulta más el pronóstico. En cada combinación de unidades se puede decir que se envuelve al problema de despacho

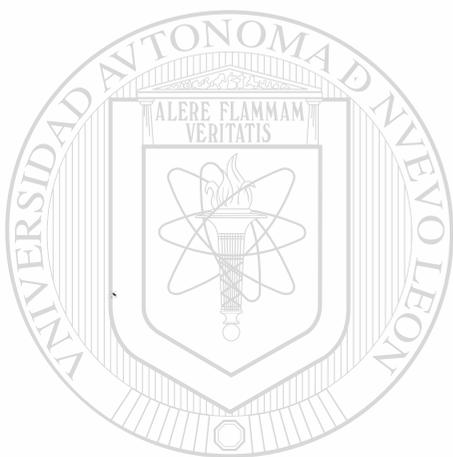
económico. También abarca cuestiones como el cambio en la demanda por cambio de temporada y las salidas de máquinas por fallas o por mantenimiento.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

La programación de unidades es matemáticamente más difícil de resolver debido a que necesita utilizar variables enteras y programación dinámica. También se necesita conocer para cada uno de los arreglos del número total de unidades que pueden ser utilizadas en cada período de tiempo, en el que el arreglo proporciona un mínimo costo de operación. Pero la realidad es que esto no afirma que el mínimo costo sea el resultado ya en la práctica, diferentes imprevistos pueden ocurrir como pérdida de

alguna unidad generadora, fallas en líneas, drástica reducción en la demanda, etc.

A pesar de que la programación dinámica y demás métodos de optimización se han desarrollado en los últimos diez años, todavía se siguen estudiando más a profundidad estas técnicas.^[9]



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CAPITULO IV



DESPACHO ECONÓMICO CON RESTRICCIONES

UANL

INTRODUCCIÓN.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

En los sistemas eléctricos modernos, la operación económica juega un papel importante junto con los energéticos empleados en la generación de energía eléctrica^[10]. En la operación de las plantas eléctricas es importante tomar en cuenta las restricciones operativas, para llevar a cabo un estudio sobre despacho económico.

Dentro del estudio de despacho económico las restricciones consideraras son: límites de generación, límites de voltaje, reserva rodante y flujos de potencia etc. El

comportamiento del sistema de potencia es no- lineal, debido al continuo cambio de sus variables. en este trabajo se presentan técnicas de optimización no- lineales y lineales, con el objeto de demostrar que los resultados obtenidos con programación lineal son convincentes con respecto a los obtenidos en programación no- lineal. Por lo tanto se usan técnicas de optimización lineal, ayudando a que la programación y la obtención de una solución sea más amigable. Para la solución del problema se consideran las características del sistema de potencia, la técnica de solución y la calidad del algoritmo computacional. Es importante recordar que el estudio de despacho económico, es un punto clave dentro de la operación de cualquier sistema de potencia.

4.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.^[10]

La problemática de despacho económico empieza cuando dos o más unidades térmicas satisfacen los requerimientos del sistema, estando esto sujetos a la capacidad del sistema y a las restricciones de operación. La problemática principal de despacho económico se presenta en como dividir la demanda entre los N generadores. En este tipo de análisis no se consideran costos de arranque de las unidades, por que el estudio, es aplicado a unidades que están sintonizadas al sistema^[11].

Para el planteamiento de despacho económico, se consideran las características de entrada-salida y los costos incrementales de cada unidad de generación. En la literatura sobre despacho económico, se propone la solución como la sintonización de los generadores operando a un mismo costo incremental. Existen trabajos sobre este

tema y varios son con este enfoque.

Cuando desea analizar los sistemas de potencia desde el punto de vista económico, se consideran las diferentes maneras de cumplir con la demanda de los usuarios en su forma mas óptima. Al analizar se examinan decisiones donde algunas condiciones son más costosas que otras, para llegar a determinar cual es la mejor decisión dentro de los límites de seguridad, esto conlleva a investigar dentro del análisis planteando el óptimo para el sistema considerando todas las restricciones.

Al analizar este tipo de planteamiento, es necesario definir el problema en términos de optimización, seleccionado una función objetivo adecuada a las restricciones involucradas en el sistema. Las técnicas de optimización, se pueden adecuar a este tipos de problemas permitiendo que la búsqueda del óptimo sea encontrado rápido y con la mayor precisión.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

4.2 RESTRICCIONES.^[11]

Dentro de la operación económica de los sistemas de potencia, las restricciones son importantes, ya que definen el comportamiento del sistema. De las restricciones más utilizadas dentro del análisis de despacho son: flujos de potencia, reserva rodante, voltajes y potencia reactiva.

4.2.1 FIUJOS DE POTENCIA.

En este trabajo los flujos de potencia activa, son determinados mediante una ecuación de flujos convencionales, donde se pueden determinar el flujo de potencia activa de nodo a nodo.

La ecuación de flujos convencionales mediante una linealización es la siguiente.

$$P_{km} = \frac{\theta_k - \theta_m}{X_{km}} \quad (4-1)$$

θ_{km} = Diferencia angular nodal

X_{km} = Reactancia de la línea

En este procedimiento lineal no se consideran pérdidas, ya que la diferencia angular es la misma en ambos sentidos y el flujo de potencia será el mismo en ambos sentidos.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

4.2.2 RESERVA RODANTE^[12].

Por reserva rodante se entiende como la capacidad energética disponibles por el sistema para responder en la pérdida de una de las unidades generadoras., fluctuaciones en las cargas, y desconexiones no previstas de algunos de los elementos del sistema. La reserva es compartida por las unidades generadoras incorporadas al sistema. Esta es una de las principales restricciones que deben de cumplir los sistemas de potencia.

Cuando alguna de las unidades llega a participar en la reserva se especifica la cantidad con la que va participar. Debido a esto los límites de operación son afectados.

$$\Sigma PG_i \geq Demanda + Reserva \quad (4-2)$$

$$PG_{max_i} = PG_{max_i} - PG_{Reserva_i} \quad (4-3)$$

Esta última ecuación muestra el límite de operación, el cual se restringe debido a la potencia que debe aportar ante algún imprevisto. La ecuación anterior también puede formarse con el criterio de que la suma de las potencias rodantes de los generadores de un sistema debe cubrir la salida del generador de mayor capacidad. Los diferentes criterios que existen para asignar las reserva : tamaño de la unidad mas grande, contingencia mayor (perdida de un enlace importante), y probabilidad de perdida de carga.

4.2.3. RESTRICCIONES DE VOLTAJE Y POTENCIA REACTIVA^[13].

Con respecto a las restricciones de voltaje y potencia reactiva, son dos variables que están ligadas. Dentro del análisis de los sistemas de potencia, es importante cuidar la demanda de reactivos, teniendo controlado el problema de reactivos, los voltajes no presentan ninguna dificultad respecto a los límites cada variable tiene sus mínimos y máximos.

En el capítulo III se establecen las diferentes técnicas que existen para tratar de resolver despacho económico. Para el planteamiento de las técnicas de solución con restricciones se analizan en este punto, se estudian por medio de programación lineal y no-lineal. Dentro del método de programación lineal se plantea la función linealizada por segmentos y la formulación de despacho económico es analizado por el método simplex, en donde no todas las restricciones del sistema son empleadas. Esto no quiere decir que no se puede llevar a cabo el análisis con todas las restricciones del sistema. Específicamente en estas técnicas de linealización se manejaron dos restricciones, la de límites de generación y la de la demanda.

4.3 PROGRAMACIÓN LINEAL^[14]

Dentro de la programación lineal, se estudio un caso donde la función se linealiza por segmentos. En la primera parte de este método se proporcionan las rectas de los segmentos del sistema a solucionar, respetando sus límites. En la segunda parte los coeficientes de estas rectas son utilizados para formar una tabla inicial del simplex, ya con la tabla formada se procede a llevar a cabo el desarrollo por el método del simplex, hasta buscar la factibilidad de las variables, que dan la solución del problema, es bueno recordar que el simplex es un método que resuelve sistemas lineales. Los segmentos anteriores son obtenidos de la característica entrada- salida de cada generador buscando la aproximación lineal del polinomio.

$$C_{gen 1} = a + bp_1 + cp_1^2 = a_1 + b_1p_{11} + a_2 + b_2p_{12} + a_n + b_np_{nm} \quad (4-4)$$

Cada segmento de recta se puede decir que es una aproximación de la función de costos características en intervalos dados, claro está que entre más pequeños sean los intervalos se está cerca de una mayor precisión. La siguiente figura muestra como se lleva efectúa la linealización por segmentos.

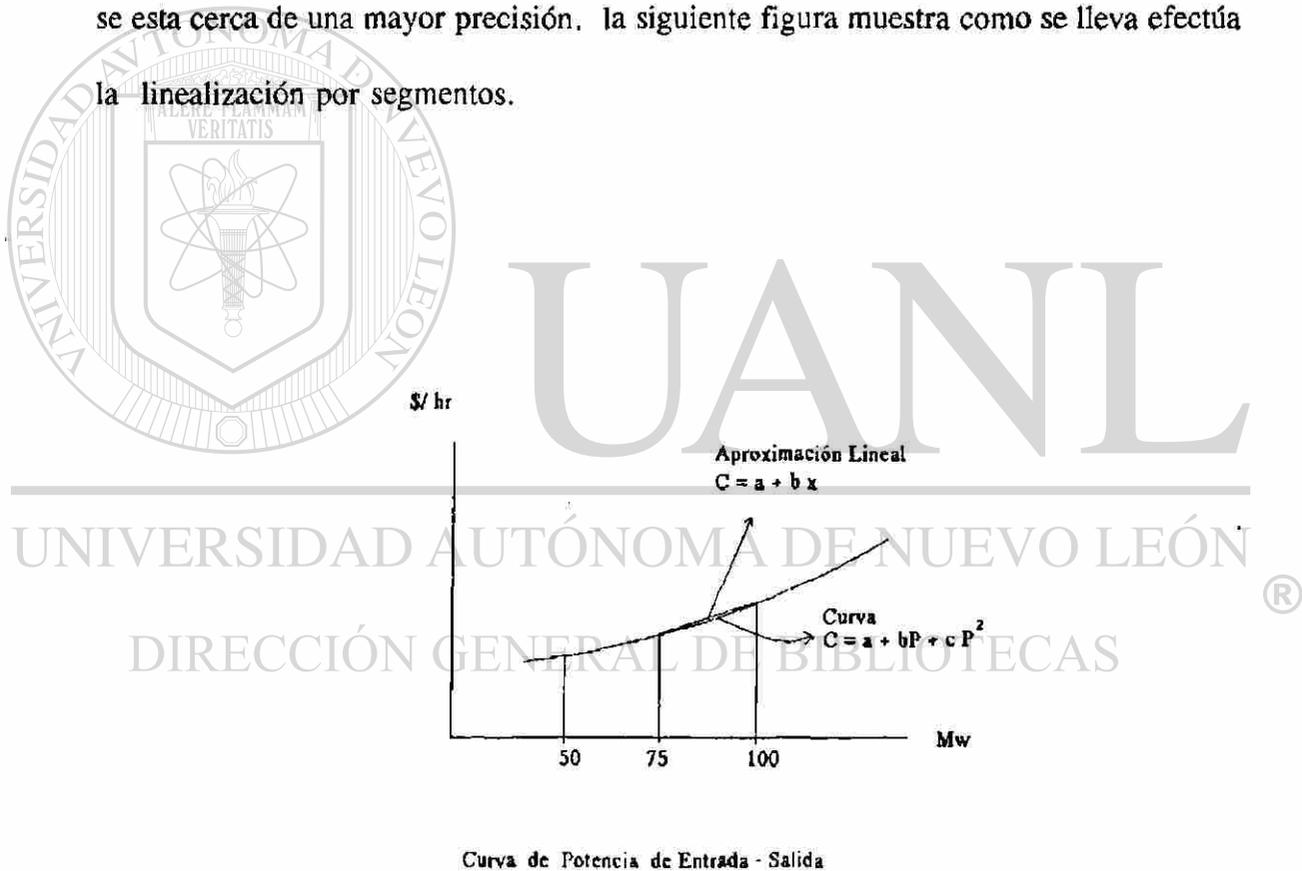


Figura 4.1 Aproximación lineal

Una vez obtenidos todos los segmentos de la recta, se forma una misma función de

costo, cada segmento de recta posee su variable independiente diferente de los demás, por decir un ejemplo, el segmento 1 de la aproximación de costos del generador 1 tiene la variable P11, el siguiente tendrá la variable P12, los segmentos del generador 2 tendrán las variables P21, P22 etc.

La cantidad de variables analizadas depende de los generadores y de la cantidad de segmentos en que se lleve a cabo la linealización. Con los datos obtenidos de los segmentos de recta de cada generador, se procede a realizar el despacho económico sin pérdidas utilizando el método simplex. La función objetivo se forma como la suma de todas sus variables con su respectiva pendiente, o costo incremental del segmento.

Función Objetivo $C_t = m_{11} + P_{11} + m_{12}P_{12} + m_{22}P_{12} + m_{1n}P_{1n} + \dots + m_{21}P_{21} + m_{mn}F$

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

$$C_t = \sum_{m_p} \quad (4-5)$$

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Una vez planteada la función de costo y con las restricciones del problema, se procede a minimizar la función objetivo. Las restricciones se formulan de la siguiente manera, la restricción de demanda es la del balance energético y los límites de generación sujeta a cada variable este entre sus límites físicos.

Existen técnicas lineales para la aplicación dentro de despacho económico pero básicamente la linealización por segmento y el método de igual costo incremental fueron las que se utilizaron en este trabajo.

Al hacer el planteamiento del problema de despacho económico, para analizarlo por el método simplex, se consume mucho tiempo en obtener los resultados en forma analítica, sin embargo se llevaron a cabo todos los pasos que marca el método obteniendo resultados satisfactorios con respecto a otros métodos. En este tipo de análisis es recomendable hacer la simulación en un programa de computadora que resuelva sistemas lineales, en este trabajo se utilizó un paquete de computadora llamado (*micromanager*) donde se observó que se obtienen resultados favorables.

4.4 PROGRAMACIÓN NO LINEAL.

La técnica de programación no-lineal aplicada en este trabajo es la conocida multiplicadores de Lagrange. Para utilizar esta técnica, primero se define la función objetivo definiendo las restricciones que va manejar el sistema, incluyendo un multiplicador por cada restricción. Al empezar analizar la problemática de despacho económico se ha estudiado que los multiplicadores de Lagrange es una herramienta útil dentro de este análisis, al emplear este método depende de las necesidades y restricciones del problema. Al generar la función objetivo del problema esta puede ser maximizada o minimizada. Los resultados obtenidos para el estudio de despacho

económico por medio de multiplicadores de Lagrange fueron satisfactorios.

Función objetivo.

$$\text{Min } C = \sum_{i=1}^n C_i(P_{Gi}) \quad (4-6)$$

sujeta a

$$(P_D + P_L - \sum_{i=1}^n P_{Gi}) = 0 \quad (4-7)$$

La forma del problema de minimización con base en el Lagrangeano queda como.

$$\text{Min } L(P_G, \lambda) = \sum_{i=1}^n C_i(P_{Gi}) + \lambda (P_D + P_L - \sum_{i=1}^n P_{Gi}) \quad (4-8)$$

En los ejercicios que se plantean en el próximo capítulo solo se toman en cuenta las restricciones de límites de generación y la potencia de demanda.

4.5 PROBLEMA DE POTENCIA ACTIVA ^[16].

En la operación de los sistemas eléctricos de potencia, una de las mayores preocupaciones es de tener suficiente generación eléctrica disponible y una coordinación de las distintas plantas de generación para satisfacer una demanda, para esto se requiere

que exista mayor generación de energía eléctrica que demanda. Para lograr lo anterior, con una buena coordinación de las distintas plantas de generación, se puede cumplir con esta importante restricción de (balance de energía).

Cuando se tiene suficiente generación, se puede llevar a cabo un buen despacho económico, para así hacer una distribución de la energía en su forma mas óptima. Para poder predecir la demanda creciente anual, se requiere de estudios detallados de investigación donde se tendrán que predecir varias restricciones, y así poder tener una opinión que nos ayude hacer una buena planeación del sistema.

No es necesario un pronostico de carga ya que el despacho económico trabaja con la demanda instantánea del sistema y no es utilizada para estudios futuros. Lo que en este trabajo se presentan son diferentes metodologías, para encontrar la aportación de cada uno de los generadores en la forma mas óptima cumpliendo con las restricciones planteadas en cada caso.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

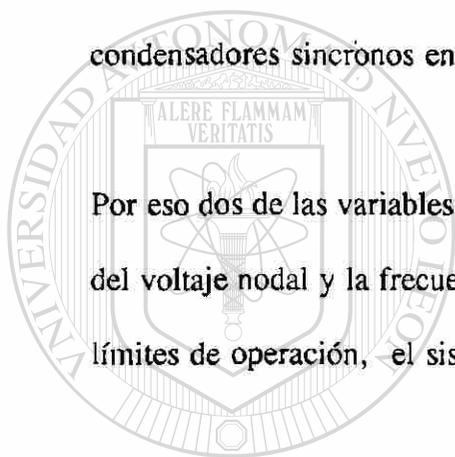
4.6 PROBLEMA DE POTENCIA REACTIVA^[17].

El problema de Potencia reactiva, es importante dentro de la operación de los sistemas de potencia, esta es una energía no deseable por el sistema pero debido a su creación, se analizan los elementos que controlan dicha potencia, ya que puede perturbar la operación del sincronismo del sistema y magnitudes de voltaje en algunos nodos.

El despacho de potencia reactiva, no es usual pero es importante al ser tomado en cuenta, porque un mal control de la potencia reactiva puede ocasionar problemas de voltajes nodales y es un efecto no deseado en la operación de cualquier sistema.

Existen técnicas dentro de la operación del sistema de potencia para controlar el problema de potencia reactiva. Instalando controladores estáticos de VARS, o condensadores síncronos en los nodos donde exista problemática de voltaje.

Por eso dos de las variables más importantes para el sistema de potencia, son el control del voltaje nodal y la frecuencia del sistema, manteniendo estas variables dentro de los límites de operación, el sistema opera en una forma estable.



UANL

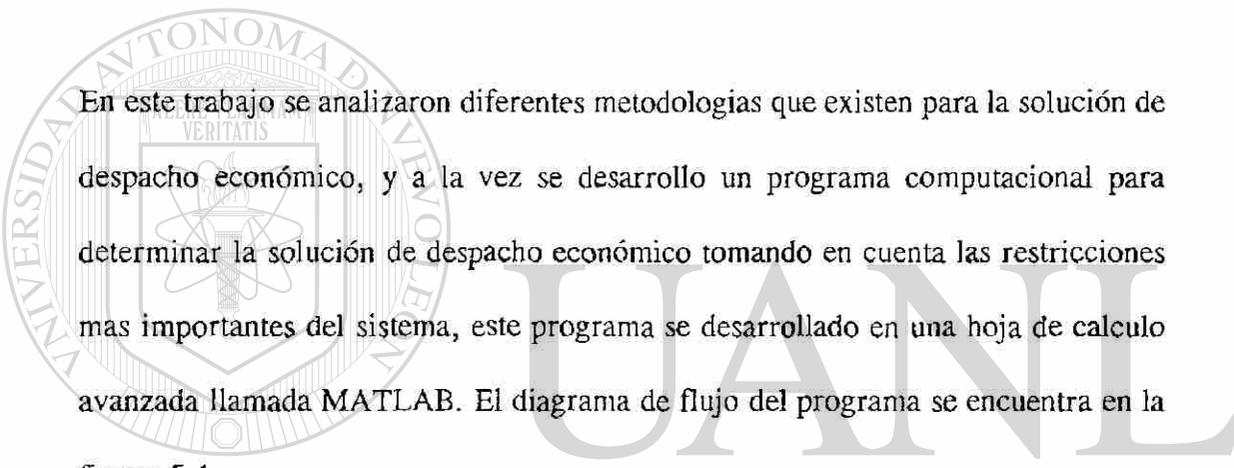
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CAPITULO V

CASOS DE ESTUDIO



En este trabajo se analizaron diferentes metodologías que existen para la solución de despacho económico, y a la vez se desarrolló un programa computacional para determinar la solución de despacho económico tomando en cuenta las restricciones más importantes del sistema, este programa se desarrolló en una hoja de cálculo avanzada llamada MATLAB. El diagrama de flujo del programa se encuentra en la figura 5.1.

En este capítulo se van a analizar algunos resultados encontrados por diferentes metodologías. Por el lado de programación no-lineal se analiza por el método de multiplicadores de Lagrange, y por programación lineal se utilizará el método de igual costo incremental y el método de linealización por segmentos, estos métodos se simularán en un paquete de computadora llamado *micromanager*, para obtener su solución.

En estos estudios solo se están considerando las restricciones de límites de generación y de demanda. Excepto en el programa que se elaboró se están considerando las restricciones más importantes del sistema.

Durante el desarrollo de este trabajo, al analizar las diferentes metodologías se llega a la conclusión que la formulación lineal es una metodología más amigable para la solución de este tipo de problemas, por lo tanto se exhorta a seguir investigando en estas formulaciones.

5.1 CASOS DE ESTUDIO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS ENTRE LAS DIFERENTES FORMULACIONES.

Las formulaciones utilizadas son: primeramente se analiza por medio de formulación lineal, posteriormente se hará por lineal por segmentos y por último se hará el uso de la formulación no-lineal, manejando multiplicadores de Lagrange.

A continuación se describe el ejemplo de caso de estudio. Se encuentran por medio del despacho económico, la aportación de cada unidad generadora, para una demanda de 400Mw, respetando sus límites de generación. Las funciones de costos de cada unidad generadora son las siguientes.

$$F_1 = 12 + 1.6 P_1 + 0.004 P_1^2 \text{ \$/h}_x \quad (5-1)$$

$$F_2 = 11 + 1.4 P_2 + 0.008 P_2^2 \text{ \$/h}_x \quad (5-2)$$

$$F_3 = 10 + 1.2 P_3 + 0.003 P_3^2 \text{ \$/h}_x \quad (5-3)$$

Los límites de generación son:

$$30 \leq PG_1 \leq 250 \quad (5-4)$$

$$30 \leq PG_2 \leq 250 \quad (5-5)$$

$$30 \leq PG_3 \leq 250 \quad (5-6)$$

5.1.1 PROGRAMACIÓN LINEAL POR SEGMENTOS.

Usando la técnica de linealización de segmentos, para la solución de despacho económico. Con la curva característica entrada- salida de cada generador, se lleva a cabo una linealización con segmentos de 20Mw, desde su límite inferior hasta su límite superior. La finalidad es encontrar la pendiente de cada segmento para luego formular la función objetivo de cada unidad, tomando en cuenta su restricción de límites, la solución se encuentra, simulando la función objetivo junto con su restricción en un paquete de computadora que resuelve sistemas lineales llamado *Micromanager*.

Determinación de la función objetivo del generador 1.

En la tabla # III se encuentran los costos de operación para una cierta potencia especificada en la unidad 1, y en la tabla IV la relación de pendientes de la unidad I.

Potencia Mw	Costo \$/hr
P1= 30	C1 = 63.6
P2=50	C2 = 102.0
P3=70	C3 = 143.6
P4=90	C4= 188.4
P5=110	C5 = 236.4
P6=130	C6= 287.6
P7=150	C7=34

TABLA # III. Relación de costos de la unidad I

Num	m(pendiente) del segmento.	Segmento
1	$m = (102 - 63.6) / 20$	1.92 P11
2	$m = (143.6 - 102) / 20$	2.08 P12
3	$m = (188 - 143.6) / 20$	2.24 P13
4	$m = (236 - 188.4) / 20$	2.4 P14
5	$m = (287.6 - 236) / 20$	2.56 P15
6	$m = (342 - 287.6) / 20$	2.72 P16

TABLA # IV. Relación de pendientes de los segmentos de la unidad

Estas dos tablas obtenidas en la unidad 1, se tienen que obtener para la unidad 2 y 3, con sus respectivas características cada una.

Con los datos obtenidos en las tablas anteriores, se procede a formar la función objetivo con las características de las pendientes de los segmentos de cada unidad generadora. Para llevar acabo la simulación en un paquete de computadora, y encontrar la solución.

Función Objetivo.

PROGRAM: Linear Programming I

***** INPUT DATA ENTERED *****

Min Z = 1.92 x1 + 2.08 x2 + 2.24 x3 + 2.4 x4 + 2.56 x5 + 2.72 x6 + 2.04
x7 + 2.36 x8 + 2.68 x9 + 3 x10 + 3.32 x11 + 3.64 x12 + 1.44 x13 + 1.56
x14 + 1.68 x15 + 1.8 x16 + 1.92 x17 + 2.04 x18 + 2.16 x19 + 2.28 x20 +
2.4 x21 + 2.56 x22 + 2.64 x23

subject to:

C 1	1 x1	<=	20	C13	1 x13	<=	20
C 2	1 x2	<=	20	C14	1 x14	<=	20
C 3	1 x3	<=	20	C15	1 x15	<=	20
C 4	1 x4	<=	20	C16	1 x16	<=	20
				C17	1 x17	<=	20
C 5	1 x5	<=	20	C18	1 x18	<=	20
C 6	1 x6	<=	20	C19	1 x19	<=	20
C 7	1 x7	<=	20	C20	1 x20	<=	20
C 8	1 x8	<=	20	C21	1 x21	<=	20
C 9	1 x9	<=	20	C22	1 x22	<=	20
C10	1 x10	<=	20	C23	1 x23	<=	20
C11	1 x11	<=	20				
C12	1 x12	<=	20				

C24 1 x1 + 1 x2 + 1 x3 + 1 x4 + 1 x5 + 1 x6 + 1 x7 + 1 x8 + 1 x9 + 1 x10
+ 1 x11 + 1 x12 + 1 x13 + 1 x14 + 1 x15 + 1 x16 + 1 x17 + 1 x18 +
1 x19 + 1 x20 + 1 x21 + 1 x22 + 1 x23 = 400

Posteriormente se hace una sumatoria de la aportación de cada segmento en cada unidad, para determinar cuanto esta entregando cada unidad a la demanda que se esta presentando.

Potencia de aportación del generador 1

$$P_1 = P_{1_1} + \dots + P_{1_6} = X_1 + \dots + X_6 = P_1 = 120M_w \quad (5-7)$$

Potencia de aportación del generador 2

$$P_2 = P_{2_1} + \dots + P_{2_6} = X_7 + \dots + X_{1_2} = P_2 = 60M_w \quad (5-8)$$

Potencia de aportación del generador 3

$$P_3 = P_{3_1} + \dots + P_{3_{11}} = X_{1_3} + \dots + X_{2_3} = P_3 = 220M_w \quad (5-9)$$

La sumatoria de las tres potencias cumplen con la demanda establecida en la función objetivo.

5.1.2 PROGRAMACIÓN LINEAL POR EL MÉTODO DE IGUAL COSTO INCREMENTAL.

Este método se basa en la derivada de la curva de costos de los generadores, se parte

de que los costos incrementales son iguales (λ).

$$\lambda_1 = .008P_1 + 1.6 \quad (5-10)$$

$$\lambda_2 = .016P_2 + 1.4 \quad (5-11)$$

$$\lambda_3 = .006P_3 + 1.2 \quad (5-12)$$

Con los datos obtenidos de cada uno de los costos incrementales de cada unidad, y las restricciones del sistema se procede a formar la función objetivo que va a ser simulada en el paquete de programación lineal *micromanager*.

PROGRAM: Linear Programming I

***** PROGRAM OUTPUT *****

***** INPUT DATA ENTERED *****

Final optimal solution

Min Z = .008 x1 + .016 x2 + .006 x3

Variable Value

Subject to:

C 1 - .008 x1 + 1 x4 = 1.6
 C 2 - .016 x2 + 1 x4 = 1.4
 C 2 - .006 x3 + 1 x4 = 1.2
 C 4 1 x1 >= 30
 C 5 1 x1 <= 250
 C 6 1 x2 >= 30
 C 7 1 x2 <= 250
 C 8 1 x3 >= 30
 C 9 1 x3 <= 250
 C10 1 x1 + 1 x2 + 1 x3 = 400

s 5 187.65
 s 1 83.24
 x 4 2.51
 x 1 113.24
 s 2 136.76
 x 2 69.12
 s 4 180.88
 x 3 217.65
 s 6 32.35
 s 3 39.12
 z 3.32

$$Pg_1 = X_1 = 113.24M_w \quad Pg_2 = X_2 = 69.12M_w \quad Pg_3 = X_3 = 217.65M_w$$

5.1.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LOS DIFERENTES MÉTODOS.

	PG1	PG2	PG3	λ	Costo Total
Multiplicador de Lagrange	113.2411Mw	69.1205Mw	217.65Mw	2.505\$/Mwh	803.75\$/hr
Linealización por segmentos	120 Mw	60 Mw	220 Mw	2.48\$/Mwh	804.6\$/hr
Costo incremental	113.24 Mw	69.12 Mw	217.65 Mw	2.5 \$/Mwh	803.7\$/hr

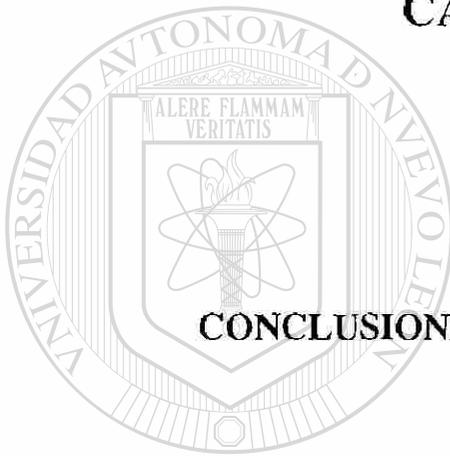
TABLA V.- Comparación de los resultados de los diferentes métodos.

Cabe mencionar que el ejemplo que se llevo a cabo, fue un sistema donde únicamente se esta considerando la restricción de demanda y de los limites de generación. Esto no quiere decir que no se puedan considerar las otras restricciones del sistema

El algoritmo desarrollado en este trabajo, calcula el despacho económico considerando las restricciones mas importantes del sistema y se puede describir con el siguiente diagrama de flujo. Los programas que se realizaron para elaborar este algoritmo, se llevaron a cabo en una hoja de calculo avanzada llamada MATLAB.

Donde dichos programas se encuentran en el apéndice.

CAPITULO VI



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

6.1 CONCLUSIONES.



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Con los resultados obtenidos en este trabajo, se puede concluir que la formulación lineal representa una buena alternativa para la solución de orden cuadrático. Referente al despacho económico se observó una ventaja en el manejo de variables, y al mismo tiempo la calidad de los resultados fue aceptable, comparados con los que se obtienen con los métodos convencionales.

Debido a la calidad de los resultados que entrega la programación lineal dentro del estudio de despacho económico, se recomienda ha seguir investigando nuevas

técnicas de programación lineal.

Las soluciones propuestas en este trabajo, ayudaran ha investigar nuevas formulaciones en el área de programación lineal para la solución de problemas de despacho económico con restricciones.

Este trabajo plantea un esfuerzo para buscar nuevas alternativas a la solución de uno de los aspectos mas importantes del sistema de potencia. Se pone a consideración de los lectores, aceptando criticas y sugerencias. Debido a que en este tipo de trabajo, todo esto enriquece las investigaciones.

6.2 RECOMENDACIONES.

Es importante para toda persona que estudia los sistemas de potencia, conocer el área de interés dentro del sistema, ya que esto motiva a investigar nuevas técnicas dentro del área que se esta estudiando.

Se recuerda que el análisis de sistemas de potencia es algo complejo, pero esto no es un obstáculo para seguir investigando nuevas técnicas de solución para las diferentes aéreas de los sistemas de potencia.

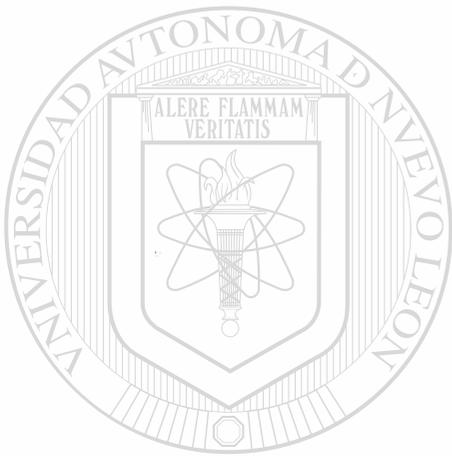
Es importante mencionar, que cuando se estudia un área de los sistemas de potencia, se busca diseñar algoritmos lo mas óptimos posibles. Esto da la pauta en las investigaciones para seguir enriqueciendo cada una de las áreas.

REFERENCIAS

- [1] [2] Optimal Power Dispatch. A Comprehensive Survey IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems Vol. Pas-96 No. 3 may/june 1977.
- [3] [11] Guerrero Garza Juan José, Curso de Operación Económica de Sistemas de Potencia. Programa de Doctorado en Ingeniería Eléctrica, U.A.N.L.
- [4] [8] Behic R. Gungor. "Power Systems". 1988, Har Court Brace Jovanosich, Publishers.
- [5] [6] A. J. Wood y B. F. Wollenberg. "Power Generation, Operation, and Control". 1983, John Willey & Sons.
- [7] [9]
- [10] [16] William D. Stevenson. Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia. Segunda Edición. Editorial McGraw Hill, México, 1992.
- [13] [17] G. T. Heydt. "Computer Analysis Methods for Power Systems" 1986. MacMillan Publishing Company.
- [14] Arreola R. Jesús. "Programación Lineal" 1984.
- [15] Debs S. Atit "Modern Power Systems Control and Operation". 1988. Kluwer Academic Publishers.
- [18] Vincent del Foro. Electric Power Systems 1992. Prentice Hall.
-
- [19] B. W. Weedy. "Electric Power Systems" 1992. Willey & Sons.
- [20] Stephen J. Chapman. Máquinas Eléctricas 1993. McGraw Hill.
- [21] "Large Scate Optimal Power Flow" IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. Pas 101, No. 10 October 1982.
- [22] Developments in Optimal Power Flow. IEEE Transactions on Power Apparatus and System, Vol. PAS-101, No. 2 february 1982.
- [23] Guerrero Garza J. J. y S. Acha D. "Prototipo de un Programa de Despacho Económico con Restricciones para un Sistema en Tiempo Real" Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Programa Doctoral.
- [24] "A Tutorial Description of an Interior Point Method and its Applications to Security-Constrained Economic Dispatch" Department of Electrical and Computer. Engineering of University Waterloo, Ontario.

[25]

"Decoupled Optimal Load Flow Using Linear or Quadratic Programming" IEEE Transactions on Power Systems. Vol. PWR-1 No. 2; May 1986.

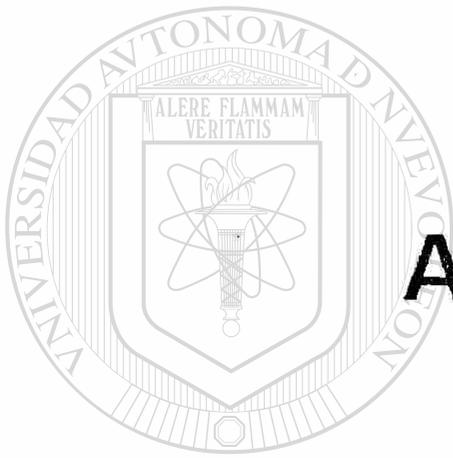


UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



APENDICE

UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Se ve claramente que la solución óptima con restricción queda encerrada en ese lugar, más aun, la solución óptima está asociada con un punto extremo del espacio de soluciones.

El método simplex se basa en este principio pero careciendo de representación gráfica emplea un proceso iterativo, colocándose en cada uno de los extremos de la región factible de solución, a la vez que verifica si ese punto es el óptimo antes de pasar a otro, todo esto se efectua hasta llegar a la solución.

La relativa desventaja de carecer de visualización se convierte en ventaja al analizarse un sistema con un gran número de restricciones, casos en los cuales el método gráfico pierde resolución y rapidez, sobre todo si la graficación se efectua en forma manual.

Para desarrollar el método simplex o cualquier método lineal de solución general, el problema de programación lineal debe ponerse en formato común o estándar, este formato

tiene las siguiente propiedades:

- 1) Todas las restricciones son ecuaciones con segundo miembro no negativo.
- 2) Todas las variables son no negativas.
- 3) La función objetivo puede ser de maximización o de minimización.

La ecuación que estamos analizando queda en forma estándar:

$$\text{Maximizar } Z = 2x + 3y$$

S.A.:

$$7x + 4y + s_1 = 28$$

$$y + s_2 = 4$$

$$2x + 2y + s_3 = 10$$

Las variables s_1 , s_2 y s_3 , son llamadas variables de holgura, sirven para cambiar la condición de desigualdad a ecuaciones de igualdad propias del formato estándar. Ahora el modelo consta de cinco incógnitas y tres ecuaciones, el modelo o formato estándar cumple siempre que son más las incógnitas que las ecuaciones ($n > m$) y los puntos óptimos del espacio de solución se determinan haciendo $(n - m)$ variables igual a cero, después resolviendo para determinar las variables restantes. Nos dará una idea de esto situarnos en el ejemplo que estamos llevando y en su gráfica, donde $(n - m) = (5 - 3) = 2$ variables a hacer cero, tomando el punto inicial a, las variables que son cero son x, y , a estas variables se les denomina variables no básicas las cuales producen $s_1 = 28, s_2 = 4$ y $s_3 = 10$, a

estas otras se les llama variables básicas de este punto de solución factible (punto A). Aquí se tiene la solución inicial, como no es la solución óptima se analiza cual de las variables básicas debe convertirse en no básica y cual de las no básica deberá entrar a la base, con esto se logra avanzar hasta otro punto extremo óptimo factible de solución por ejemplo al punto b. Este es el criterio base de solución por el simplex, partiendo de una solución inicial factible o punto extremo pasar a otro hasta que la solución mejore la función.

El método simplex garantiza dos condiciones fundamentales:

1) La condición de optimidad. Asegura que en la próxima iteración no se encontrará una solución inferior.

2) La condición de factibilidad. Garantiza que partiendo de una solución básica factible, únicamente se encontrarán soluciones básicas factibles.

Un formato muy conveniente para iniciar con la solución del simplex es el siguiente:

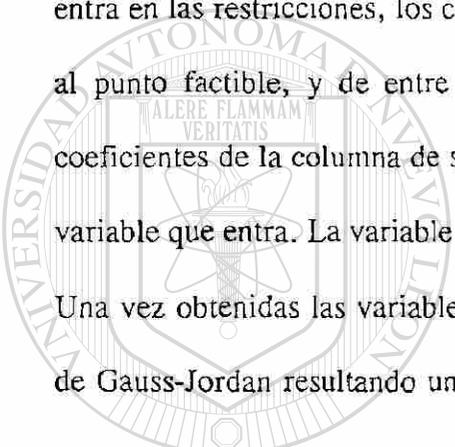
Básica	Xo	X1	X2	S1	S2	S3	Sol
X	1	-2	-3	0	0	0	0
S1	0	7	4	1	0	0	28
S2	0	0	1	0	1	0	4
S3	0	2	2	0	0	1	10

TABLA No. 1

Esta tabulación corresponde al punto a de gráfica 1, en esta tabla se muestra en la primera fila la función objetivo en forma de ecuación y su solución para ese punto, en la columna que dice básica muestra las variables que están en la base en ese punto, y sus valores correspondientes se localizan en la columna que dice solución. La forma tabular muestra en forma clara las características de las ecuaciones e información para su solución.

Claramente se ve que el punto a no es la solución óptima, lo siguiente es determinar que punto extremo de solución mejorará la función objetivo, esto se logra eligiendo una variable actual no básica que al incluirla en la función objetivo logre mejorarla,

naturalmente esta se convierte en básica y la que sustituye en no básica. La experiencia dice que la variable no básica que debe entrar a la base debe ser la más negativa de la función objetivo de la tabulación. Al entrar una nueva variable a la base para mejorar el valor de Z, otra debe de salir, esto se determina geoméricamente conociendo todas las restricciones asociadas a la variable que entra, entonces la restricción con la intercepción más pequeña no negativa se define como la variable que sale. En la tabla simplex puede obtenerse el mismo resultado simplemente conociendo los coeficientes de la variable que entra en las restricciones, los coeficientes negativos y ceros se descartan por no interceptar al punto factible, y de entre los coeficientes positivos se hace una relación entre los coeficientes de la columna de solución y estos coeficientes positivos bajo la columna de la variable que entra. La variable básica asociada a la relación mínima es la variable que sale. Una vez obtenidas las variables de entrada y salida se hace un reacomodo por el método de Gauss-Jordan resultando una nueva solución factible:



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

↓ Variable que entra

Básica	Xo	X1	X2	S1	S2	S3	Sol
Xo	1	-2	-3	0	0	0	0
S1	0	7	4	1	0	0	28
← S2	0	0	<u>1</u>	0	1	0	4
S3	0	2	2	0	0	1	10

TABLA No. 2

$$28/4 = 7$$

$4/1 = 4 \rightarrow$ relación mínima variable que sale

El elemento en negritas (1) es la intercepción de la variable que entra con la variable que sale, comúnmente se le llama pivote y la ecuación asociada a él ecuación pivote. Iniciando con el método Gauss-Jordan se debe dividir la ecuación pivote entre el elemento pivote.

Básica	Xo	X1	X2	S1	S2	S3	Sol
Xo	1						
S1	0						
X2	0	0	1	0	1	0	4
S3	0						

TABLA No. 3

Enseguida se procede a hacer cero los elementos restantes de la columna X2, que es la variable que entra, esto se hace sumándole a cada una de las ecuaciones la ecuación pivote, la cual ha sido previamente multiplicada por un número que de un valor que haga cero el valor de X2 en esa ecuación:

Ec. Anterior	X ₀	1	-2	-3	0	0	0	0
3 X Ec.pivote	X ₂	0	0	3	0	3	0	12
Nueva Ec.	X ₀	1	-2	0	0	3	0	12

Haciendo lo mismo para la ecuación S_1 :

Ec. Anterior	S_1	0	7	4	1	0	0	28
$(-4) \times$ Ec. Piv.	X_2	0	0	-4	0	-4	0	-16
Nueva Ec.	S_1	0	7	0	1	-4	0	12

Por último para la ecuación S_3 :

Ec. Anterior	S_3	0	2	2	0	0	1	10
$(-2) \times$ Ec. Piv.	X_2	0	0	-2	0	-2	0	-8
Nueva Ec.	S_3	0	2	0	0	-2	1	2

El resultado de esta primera iteración nos da:

↓ Entra

Básica	X_0	X_1	X_2	S_1	S_2	S_4	Sol
X_0	1	-2	0	0	3	0	12
S_1	0	7	0	1	-4	0	12
X_2	0	0	1	0	1	0	4
S_3	0	2	0	0	-2	1	2→

TABLA No. 4

Como se ve el resultado de introducir a X_2 en las variables básicas fue un aumento de 12 en la función objetivo, gráficamente estamos en el punto e de la figura No. 1, sin embargo

esta no es la solución final debido a que el renglón de la función objetivo muestra un valor negativo en X_1 , otra variable no básica X_1 puede mejorar la solución. Siguiendo el criterio de relación mínima se obtiene que la variable que sale es S_3 :

$$S_1 \quad 7 \quad 12 \quad = \quad = 12/7$$

$$S_3 \quad 2 \quad 2 \quad = \quad 2/2 = 1 \rightarrow \text{Variable que sale}$$

En esta segunda iteración el elemento pivote es 2 que es la intersección entre la columna de x_1 que entra y la ecuación S_3 que sale. Resolviendo por Gauss-Jordan de la misma manera que en la iteración uno resulta:

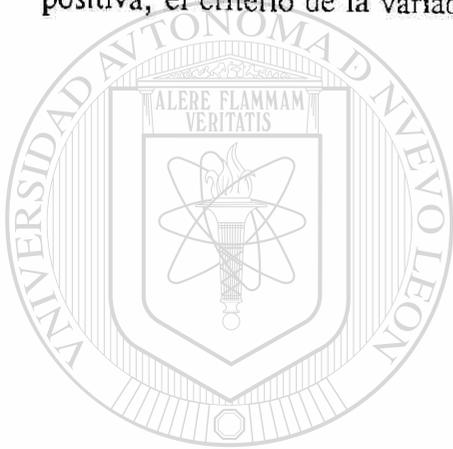
Básica	Xo	X1	X2	S1	S2	S3	Sol
Xo	1	0	0	0	1	1	14
S1	0	0	0	1	-11	-7/12	5
X2	0	0	1	0	1	0	4
X1	0	1	0	0	-1	1/2	1

TABLA No. 5

Esta es la tabla final por no tener ningún elemento negativo en la ecuación de la función objetivo, la solución es 14 y los valores de la variables básicas son $S_1 = 5$, $X_2 = 4$ y X_1

= 1 . El proceso de solución abarcó solo dos iteraciones y no fue necesario pasearse por todos los puntos óptimos factibles de la solución, sino solo por los puntos a,e y d (vease figura No.1).

La formulación del método simplex también puede aplicarse a la minimización, lo único que cambia es la condición de optimidad, para este caso la variable que entra será la más positiva, el criterio de la variable que sale es el mismo que para maximización.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

