

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA



FLUJO DE POTENCIA OPTIMO MULTIOBJETIVO

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

PRESENTADO POR:

ARAM MANRIQUE GAMBINI GONZALES

PROMOCIÓN

2003 – II

LIMA – PERÚ

2011

FLUJO DE POTENCIA OPTIMO MULTIOBJETIVO

A mis queridos padres.

SUMARIO

El Flujo de Potencia Optimo (FPO) consiste en resolver dos problemas simultáneamente: El problema de despacho económico y el problema de flujo de potencia.

En el presente trabajo se expone y se aplica el concepto de Flujo de Potencia Optimo Multiobjetivo. Se hace una breve exposición de la evolución histórica del problema de FPO, sus métodos de solución, sus aplicaciones y sus ventajas. Asimismo se hace simulaciones de flujo de potencia utilizando la plataforma computacional de MATLAB 2007, donde se ha incluido el software especializado MATPOWER para resolver el problema de Flujo de Potencia Optimo y la aplicación se hizo a dos sistemas de potencia de la IEEE. Los resultados obtenidos son satisfactorios desde el punto de vista académico y de investigación profesional.

ÍNDICE

SUMARIO	V
ÍNDICE	VI
CAPITULO I	2
1.1 Antecedentes	2
1.2 Planteamiento del Problema.....	3
1.3 Estado del Arte	4
CAPITULO II	8
FLUJO DE POTENCIA OPTIMO (FPO)	8
2.1 Conceptos previos	8
2.2 Fundamentos Matemáticos.....	9
2.3 Investigación de operaciones y la Optimización.....	9
2.4 La Optimización Estocástica.	10
2.5 Métodos de solución del Problema de FPO	11
2.6 Programación Lineal (PL).....	12
2.6.1 La formulación del problema para PL	12
CAPITULO III	15
APLICACIONES DEL FLUJO DE POTENCIA OPTIMO	15
3.1 Introducción.....	15
3.2 Aplicaciones del flujo de potencia óptimo en un ambiente de simulación de un sistema de potencia.....	15
3.2.1 Eliminación de sobrecargas en una línea	15
3.2.2 Utilización para fijación de precios en barras con potencia activa y reactiva	17
3.2.3 Aplicación para la fijación de precios en un área de potencia activa.....	18
3.2.4 Transformador con Tap de Control.....	19

3.3	Ejemplo de Aplicación de FPO en el sistema eléctrico Chileno.....	22
3.4	Ventajas de la aplicación del FPO.....	24
CAPITULO IV.....		26
APLICACIÓN DE FLUJO DE POTENCIA OPTIMO MULTIOBJETIVO.....		26
4.1	Introducción.....	26
4.2	Flujo de Potencia Optimo Multiobjetivo.....	26
4.3	Aplicación a un sistema de 6 barras	27
4.3.1	Resultados	28
4.4	Aplicación al sistema IEEE de 30 barras	29
4.4.1	Resultados.....	32
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		33
BIBLIOGRAFÍA.....		34

PROLOGO

El problema de Flujo de Potencia Optimo (FPO) fue introducido por Carpentier en 1962 como una extensión del problema de despacho económico de carga convencional cuyo primer método de solución propuesto fue el método de gradiente reducido. Posteriormente Dommel y Tinney abordaron el problema resolviendo las ecuaciones de Kuhn-Tucker usando una combinación del método del gradiente para un grupo conocido de variables independientes y funciones de penalización para violaciones en las restricciones dependientes. El FPO ha sido objeto de estudio durante décadas ya que es un problema de programación matemática bastante complejo, para el cual se han desarrollado sofisticados algoritmos de solución.

En el Capítulo I del presente trabajo, se hace un resumen de la evolución del FPO a través del tiempo.

En el Capítulo II se dan los conceptos básicos del tema en estudio y los métodos de solución que se conocen para resolver el problema del FPO, incidiendo en el método de Programación Lineal.

En el Capítulo III se exponen algunas aplicaciones de Flujo de Potencia Optimo que existen en la literatura internacional.

En el Capítulo IV, se implementa la aplicación de FPO, incluido multiobjetivo en la plataforma computacional MATLAB, para dos sistemas de prueba de la IEEE.

Finalmente se dan conclusiones y recomendaciones inherentes al desarrollo de este informe de suficiencia.

CAPITULO I

CONSIDERACIONES INICIALES

1.1 Antecedentes

El flujo óptimo de potencia nace con el problema del despacho económico. Este problema empezó a ser discutido a partir de 1920, o quizás antes, cuando se debió repartir la carga total de un sistema, entre las unidades generadoras disponibles. Hacia 1930 se tomaron básicamente dos criterios para resolver el problema:

- a. El método de la carga base, en el que la unidad más eficiente era la primera en tomar carga, y lo hacía a su máxima capacidad, luego la segunda unidad más eficiente tomaba carga a su máxima capacidad y así sucesivamente hasta satisfacer la demanda.
- b. El mejor punto de carga, en el que las unidades generadoras tomaban carga hasta alcanzar su punto mínimo de calentamiento, empezando con la unidad más eficiente, y cargando la menos eficiente al final.

Posteriormente se conoció que el método del costo incremental era el que daba los mejores resultados económicos, y a partir de 1931 se tomo como criterio que para realizar despacho económico, el costo incremental debe ser igual; criterio que se usa hasta hoy. Este modelo que hoy se conoce como despacho económico simplificado, era sencillo y práctico, pero no considera las pérdidas de transmisión.

En la década de los 40, se hicieron intentos por incluir las pérdidas de transmisión, con lo que se consiguió la construcción de diagramas aproximados para calcular dichas pérdidas. Sin embargo se requería de un método que combine los costos incrementales de combustible con las pérdidas incrementales y con refinamientos de una fórmula de pérdidas.

Los trabajos de Kron y paralelamente de Glavitch H., Bacher R[1], dieron como resultado lo que ahora se conoce como las ecuaciones de coordinación, primeramente sugeridas por Ward y que se usan actualmente:

$$d\text{fi}/d\text{PGi} + \lambda \text{ dPL}/d\text{PGi} = \lambda \quad ; i=1,2,\dots \quad (1.1)$$

con la restricción:

$$\varphi(P_i) = \sum P_{Gi} - \sum P_{Gj} - PL = 0 \quad (1.2)$$

en donde:

$$PL = \sum \sum P_{Gi} B_{ij} P_{Gj} \quad i, j = 1, 2, \dots \quad (1.3)$$

Al final de la década del 50 aparece el flujo de potencia en computadores digitales. Con estas bases, a principios de la década de los 60, Squires y Carpentier formulan métodos más poderosos que no requieren de suposiciones que se hacían con la matriz (B) de coeficientes, y que pueden incluir un modelo exacto de la red. Tales modelos recibieron el nombre de flujos óptimos de potencia.

Finalmente, en 1967, Dommel y Tinney formulan el Flujo óptimo de potencia partiendo de un flujo de potencia factible. El proceso de optimización conjuga la técnica de los multiplicadores de Lagrange y la técnica del gradiente reducido. Como restricciones de igualdad toman el flujo de potencia mismo. Toman como restricciones de desigualdad los límites máximos y mínimos de las variables de control. Incluyen restricciones funcionales de desigualdad, para tomar en cuenta los límites máximos y mínimos de las variables de estado y de las potencias reactivas de generación, y amplían las funciones objetivo con penalizaciones para incluir tales restricciones.

1.2 Planteamiento del Problema

El Flujo de Potencia Óptimo (FPO), es un problema que fue definido en los principios del año 1960 como una extensión del problema de despacho económico de carga convencional, que se utiliza para la determinación óptima de las variables de control en un SEP, considerando variadas restricciones. FPO, en su formulación general, es un problema de optimización con función objetivo y restricciones no lineales, que representa la operación en estado estacionario del sistema eléctrico. Existen dos grandes grupos de modelos para representar el FPO (Glavitch y Bacher, 1991):

- Modelos de tipo A: aquellos que utilizan como núcleo de cálculo un algoritmo de flujo de potencia clásico que es llamado por un proceso de optimización externo. Este grupo de algoritmos elabora sucesivamente puntos de entrada al programa de flujo de potencia, orientándolo hacia soluciones que minimizan la función objetivo especificado.
- Modelos de tipo B: aquellos que modelan el problema de FPO como un problema de optimización global. Las variables del sistema son optimizadas simultáneamente

y las ecuaciones de flujo corresponden a restricciones adicionales del problema de optimización.

La aplicación de técnicas de optimización a los problemas de planificación y operación de SEP, como lo es FPO, es una activa área de investigación. De esta forma, FPO puede ser visto como un término genérico que describe una amplia gama de clases de problemas en los cuales se busca optimizar una función objetivo específico, sujeto a restricciones que representan los balances de potencia activa y reactiva en los nodos de la red, en función de las tensiones y ángulos de las barras.

Existen variadas funciones objetivos que puede considerar un modelo FPO, entre las cuales se pueden mencionar (Ristanovic, 1996):

- Minimización de los costos por generación de potencia activa,
- Minimización de pérdidas de potencia activa,
- Minimización de los costos por generación de potencia reactiva,
- Minimización del cambio en las variables de control, etc.

1.3 Estado del Arte

La solución del problema de FPO avanzó paralelamente con el desarrollo de la matemática pura y aplicada. La solución de este problema de optimización fue propuesta inicialmente por el matemático francés Gaspar Monge por el año de 1776, sin embargo, solo al final Segunda Guerra Mundial se dio a conocer en una publicación científica como un problema matemático de optimización. En 1948, George B. Dantzig publicó un artículo en el cual propuso una formulación matemática general del problema de optimización lineal llamándolo Problema de Programación Lineal, sin lugar a dudas, constituyó una de las más importantes técnicas formulada en la historia de la humanidad. En la década del 60 fueron publicados dos trabajos importantes con la formulación matemática de FPO. La primera fue publicado en 1962 en Francia por J. Carpentier [2] donde enunció por primera vez el problema general de FPO sujeto a restricciones de igualdad y desigualdad identificándolo como un problema de programación no lineal utilizando para su solución la formulación de Kuhn-Tucker y el método de Gauss-Seidel, posteriormente en 1968 el segundo trabajo fue publicado en USA por Dommel y Tinney [3] donde utilizaron la formulación de Kuhn-Tucker, sus experiencias en la solución de flujo de potencia (FP) mediante el método de Newton y la técnica del gradiente reducido para ajustar óptimamente los parámetros de control. En la década de 70 se avanzó sobre las propuestas iniciales sin embargo no se produjo adelantos significativos en cuanto a la velocidad y

robustez de los algoritmos de solución. Una propuesta importante fue realizada por Alsac y Stott, donde introdujeron el concepto FPO con restricciones de seguridad, esto es, una solución óptima llevando en consideración un conjunto de contingencias probables en el sistema. Al final de la década del 70 y al inicio de los 80 surgieron nuevas formulaciones y métodos de solución del FPO que irían a formar la base de los métodos actualmente considerados como los más adecuados para su utilización práctica. Al inicio de los 90 M. Huneault y F. Galiana publicaron un artículo donde hacen un examen y un resumen de los métodos utilizados en la solución de FPO y sus aplicaciones en sistemas de potencia incluyendo el control de la tensión y potencia reactiva.

En el año de 1984 un matemático nacido en la India, Karmarkar, revolucionó el área de programación lineal con la publicación de un algoritmo de complejidad polinomial y de buen desempeño cuando es aplicado a problemas prácticos de gran escala tal como un sistema eléctrico de potencia.

Este artículo dio justificaciones teóricas muy rigurosas con un excelente comportamiento del método desarrollado reportando una velocidad de convergencia 50 veces más rápido que el método simplex, actualmente conocido como el método de Puntos Interiores y como consecuencia de este fundamento teórico en la comunidad matemática se incentivó el desarrollo de algoritmos computacionales tanto en la parte teórica así como en las aplicaciones prácticas de esta técnica. Contrariamente al método simplex, que utilizando una estructura combinatoria del problema, camina por los vértices de su región viable, los métodos de puntos interiores caminan por el interior de la región viable. Nuevas variantes del algoritmo original, han sido implementadas para resolver todo tipo de problemas, desde formulaciones lineales hasta no lineales y desde convexos a no convexos. Actualmente, el método de puntos interiores está siendo aplicado en las áreas de operación y planeamiento de sistemas de potencia con excelente comportamiento debido al tamaño y a las características especiales de los problemas. El método de puntos interiores ha probado que computacionalmente es una alternativa viable para la solución de los problemas que se presentan en estas áreas.

La primera formulación y las ideas iniciales de la técnica de puntos interiores es usualmente atribuido a Fletcher (1955), el cual es un método de barrera logarítmica. Más tarde por los 60 fue estudiado ampliamente por Fiacco y McCormic, para resolver problemas generales no lineales con restricciones de desigualdad. En 1979, Khachiyan presentó un método elipsoidal que podía resolver un problema de programación no lineal

en tiempo polinomial, desafortunadamente en la práctica resultó ser un método muy lento respecto al simplex.

Uno de los primeros trabajos más importante de FPO, donde fue utilizado el método de puntos interiores corresponde a K. A. Clements. En este trabajo se resuelve problemas de estimación de estado, utilizando el método de barrera logarítmica y el método de Newton para resolver las ecuaciones de Karush-Kuhn-Tucker (KKT). Los resultados fueron encontrados en una cantidad inferior de iteraciones comparado con o método simplex.

Actualmente existe una experiencia acumulada en la solución de flujo de potencia óptimo [5] que permite aceptar con convicción que el método de puntos interiores es superior al método simplex en una vasta cantidad de problemas prácticos de programación lineal y no lineal. Sin embargo aún falta algunos pasos por recorrer para alcanzar todo aquello que se logró con el método simplex. En el año 2000 Quintana, Torres y Medina, publicaron un artículo muy importante donde detallan los autores acerca de las investigaciones mas importantes del método de Puntos Interiores fundamentalmente su I) Origen y Evolución, II) Desarrollo, Implementación y Pruebas de Algoritmos, IV) Direcciones Electrónicas en Internet y V) Aplicaciones en sistemas de potencia, en donde destacan los trabajos mas importantes desarrollados a nivel mundial.

La solución del problema de FPO tiene como objetivo optimizar en estado estacionario la operación de una red eléctrica. Optimizar en el sentido de hallar un máximo o mínimo de un determinado criterio de operación representado matemáticamente mediante una ecuación denominada función objetivo y condicionada a otras ecuaciones matemáticas denominadas restricciones de igualdad o desigualdad.

El Flujo de Potencia (FP) es utilizado para análisis, tiene infinitas soluciones y depende de infinitas condiciones de operación (por ejemplo, para una determinada demanda en una red eléctrica se puede hallar infinitas soluciones de tensión en las barras tipo PQ asignando infinitas magnitudes a las barra PV). No se tendría como determinar cual es la mejor solución. La solución del problema FPO sintetiza o establece un tipo comportamiento de la red eléctrica mediante la función objetivo y sus restricciones.

El problema de FPO fue introducido a inicios de 1960 como un complemento al problema convencional de despacho económico (DE). Squires propone un método de solución al problema de DE en el que incluye un modelo completo de la red eléctrica. En 1962 Carpentier presenta la primera formulación matemática completa para el problema de

FPO, planteándolo como un problema de optimización no lineal, utilizando las condiciones de Kuhn-Tucker para establecer las condiciones de optimización necesarias. Desde entonces se han presentado diversos trabajos buscando alternativas para la solución a este problema.

CAPITULO II

FLUJO DE POTENCIA OPTIMO (FPO)

2.1 Conceptos previos

Históricamente, los primeros esfuerzos de optimización en los sistemas de potencia se hicieron respecto al control de la generación. Dada una demanda pronosticada y varias unidades de generación con diferentes características de costo, el operador de la red debía decidir cuanta generación asignar a cada unidad. Este procedimiento se conoce hoy en día como despacho económico clásico.

Posteriormente, la inclusión de criterios de seguridad dentro de los objetivos de explotación complicó en gran medida el problema de optimización, obligando al desarrollo de técnicas adecuadas a la complejidad del problema. El perfeccionamiento de las técnicas computacionales, fundamentalmente la introducción de técnicas para el tratamiento eficiente de matrices dispersas y el desarrollo de algoritmos matemáticos de optimización, junto a la mayor capacidad de procesamiento de los computadores ha permitido la resolución de problemas cada vez más complejos. Esta evolución ha conducido a lo que hoy se conoce con el nombre de Flujo de Potencia Óptimo (FPO).

Optimización.- Proceso de programación matemática donde se define un problema mediante una función objetivo, la cual puede presentar restricciones. La optimización como método de solución busca encontrar una decisión óptima para maximizar (ganancias, velocidad, eficiencia, etc.) o minimizar (costos, tiempo, error, etc.) un criterio determinado. Las restricciones enmarcan las particularidades del problema que se quiere resolver.

Flujo de Carga Optimo.- Es el procedimiento a través del cual se optimiza una función escalar (función objetivo) cumpliendo con las ecuaciones que definen el estado de un sistema eléctrico de potencia (flujo de carga), y tomando en cuenta las restricciones de las variables que intervienen en el sistema.

Investigación de Operaciones.- La principal característica de la Investigación Operativa es construir un modelo científico del sistema del cual se pueden predecir y

comparar los resultados de diversas estrategias y decisiones, incorporando medidas del azar y del riesgo.

2.2 Fundamentos Matemáticos

Los fundamentos matemáticos de los modelos lineales discretos se encuentran en la teoría de las desigualdades lineales desarrollada en el siglo pasado. Otros conceptos que son paralelos a los de la Programación Lineal fueron formulados por von Neumann en 1928, con la aplicación del teorema del minimax a los juegos de estrategia. Como un antecedente inmediato, se encuentra el planteamiento del problema de transporte, por F. L. Hitchcock, en 1941 en los Estados Unidos. En el contexto de la planificación óptima de la asignación de obligaciones productivas, el mismo modelo había sido estudiado y resuelto por Kantorovich en la Unión Soviética en 1939, empleando lo que puede interpretarse como variables duales. También, en un contexto concreto, Stigler planteó el problema lineal de obtener una dieta adecuada con coste mínimo a partir de setenta y siete alimentos y considerando nueve nutrientes, reconociéndose en él la estructura de optimizar una función lineal sujeta a restricciones lineales. Pero el proyecto de formulación y ataque al problema lineal de forma general, fue propuesto por el departamento del Ejército del Aire bajo el nombre de proyecto SCOOP en 1947. El resultado inmediato fue el algoritmo de resolución simplex, debido a George B. Dantzig, y su implementación en un ordenador UNIVAC para la resolución de modelos lineales de gran tamaño.

2.3 Investigación de operaciones y la Optimización

La investigación operativa tiene sus orígenes en la Segunda Guerra Mundial, debido a la necesidad urgente de asignación de recursos escasos en las operaciones militares, en problemas tácticos y estratégicos. Estas mismas técnicas se han extendido con posterioridad a las empresas.

Disciplinas típicas de la investigación operativa son la *optimización* con sus múltiples sabores (lineal, no lineal, entera, estocástica, multiobjetivo), teoría de la decisión y de juegos, teoría de colas y simulación, teoría de grafos o flujos de redes. Otras disciplinas como algoritmos meta heurística y lógica borrosa, redes neuronales artificiales, reconocimiento de patrones y otras técnicas de inteligencia artificial, aunque conceptualmente se encuadran dentro de la investigación operativa, habitualmente se estudian dentro de otras disciplinas ligadas a la ingeniería informática como la inteligencia artificial. Los contenidos de algunas de estas últimas también están muy ligadas a la estadística.

La optimización es una parte relevante dentro de la investigación operativa. Tuvo un progreso algorítmico inicial muy rápido. Muchas técnicas, como programación lineal LP y programación dinámica (DP), que son usados frecuentemente; son anteriores a 1960. Por ejemplo, el método Simplex de programación lineal desarrollado por Dantzig es de 1947, el principio de optimilidad de Bellman que es la base de la programación dinámica se formuló en 1957. En la última década se han producido avances significativos generados por el desarrollo en 1984 por parte de Karmarkar de un método de punto interior para programación lineal. Por ejemplo, en una nota técnica de ILOG se presenta el Cuadro mostrado en la Fig. 2.1.

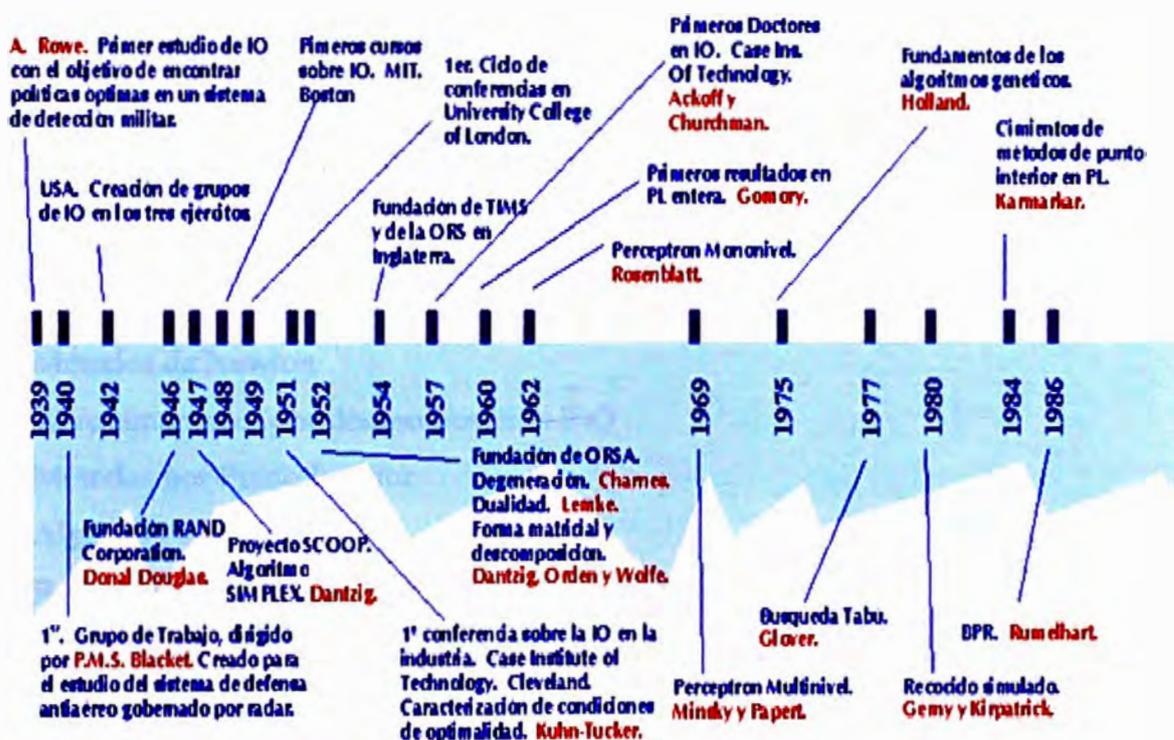


Fig. 2.1. Evolución histórica de la Optimización

Adicionalmente se debe recordar que desde el optimizador CPLEX 3.0 en el año 1994 al CPLEX 7.0 en el 2000, la reducción de tiempo de resolución ha sido de 28 veces en el método simplex dual para un problema lineal concreto.

2.4 La Optimización Estocástica.

La optimización estocástica apareció en 1955 como una extensión de la programación lineal con énfasis en el gran número de variables y parámetros con trabajos independientes de Dantzig y Beale. Por otra parte, como una extensión de la programación lineal para grandes sistemas con estructuras especiales en la matriz de coeficientes de las restricciones aparecieron las técnicas de descomposición Benders, Dantzig, VanSlyke

también denominadas de optimización matemática a gran escala. Los problemas de optimización de gran tamaño con estructura especial pueden tener subyacente una estructura espacial, temporal o debida a la aleatoriedad de los parámetros. Esta estructura es la que se rompe mediante el uso de las técnicas de descomposición para la resolución del problema.

Aunque las primeras investigaciones aparecen muy temprano, solo recientemente el avance en la tecnología de los ordenadores ha permitido la solución de problemas de muy gran tamaño y ha devuelto interés al tema de la optimización estocástica produciendo además un avance en la teoría matemática que lo sustenta.

2.5 Métodos de solución del Problema de FPO

En las últimas décadas muchas técnicas se han aplicado satisfactoriamente a la solución del problema de FPO, entre las más importantes se citan [6]:

- Método del Gradiente
- Programación lineal
- Programación cuadrática
- Métodos de Newton
- Aproximaciones por descomposición P-Q
- Métodos por Punto Interior
- Algoritmos genéticos
- Redes neuronales
- Programación Evolutiva
- Búsqueda Tabú
- Programación por enjambre de partículas

Los métodos de programación no lineal (NLP, Non-Linear Programming) tratan problemas que involucran restricciones y función objetivo no lineal. Las restricciones pueden ser de igualdad o desigualdad (Bazaraa, 1994).

Por su parte, la Programación Cuadrática (en adelante QP, Quadratic Programming) es un caso especial de programación no lineal, donde la función objetivo es cuadrática y las restricciones son lineales (Bazaraa, 1994).

Las soluciones basadas en condiciones de Newton, utilizan las condiciones de primer orden para puntos óptimos, que comúnmente se denominan condiciones de Kuhn Tucker (en adelante KKT, Karush Kuhn Tucker). En general, son ecuaciones no lineales que

requieren de métodos iterativos de solución. Los métodos de Newton se ven favorecidos por sus propiedades de convergencia cuadrática.

Los problemas abordados con programación lineal (LP, Linear Programming), utilizan problemas formulados con función objetivo y restricciones lineales. El método Simplex es un método conocido y eficiente para resolver problemas de programación lineal de gran dimensión.

La programación entera mixta (MIP, Mixed Integer Programming) es un caso particular de programación lineal, que incluye variables enteras en su formulación. Programación Entera, y MIP, al igual que NLP demandan demasiados recursos computacionales.

Los métodos de punto interior, introducidos por Karmarkar, se han comenzado a popularizar, debido a que se ha podido demostrar que (hasta el momento) es el único algoritmo polinomial para resolver problemas de LP. Cabe mencionar que se ha encontrado un ejemplo para el cual Simplex no es polinomial, es el conocido problema del cubo de Minty, para el cual Simplex recorre todos los vértices del polígono de restricciones antes de llegar al óptimo.

2.6 Programación Lineal (PL)

En el problema de FPO, la rapidez en los cálculos es una gran preocupación. Téngase en cuenta que un sistema práctico se compone de varios cientos a varios miles de barras o nodos. La red de Sistema Peruano, por ejemplo, se compone de no menos de 1200 barras, y para resolver el flujo de potencia de un sistema de transmisión con 1200 barras, se requerirá construir una matriz jacobiana de aproximadamente 2400 x 2400. Por eso es necesario hacer algunas aproximaciones en el proceso de formulación. La mayoría de los problemas de FPO, aproximan las soluciones usando flujo de potencia. En flujo de potencia DC, la velocidad de los cálculos aumentará, sin embargo, algunos parámetros importantes como el ángulo de tensión y la magnitud, y la línea resistencias son aproximados.

2.6.1 La formulación del problema para PL

La función objetivo ó función de gastos C , es una función no-lineal, que a veces, incluye la duración de tiempo de inactividad y puesta en marcha de grupos térmicos. El objetivo en este problema es reducir al mínimo el costo la función ó el costo de generación, mientras que la satisfacción de todas las limitaciones es acompañado. Sin embargo, dado

que el costo función no es lineal, se aproxima la función de los costos utilizando tramos o segmentos de aproximaciones lineales, como se muestra en la Fig. 2.2.

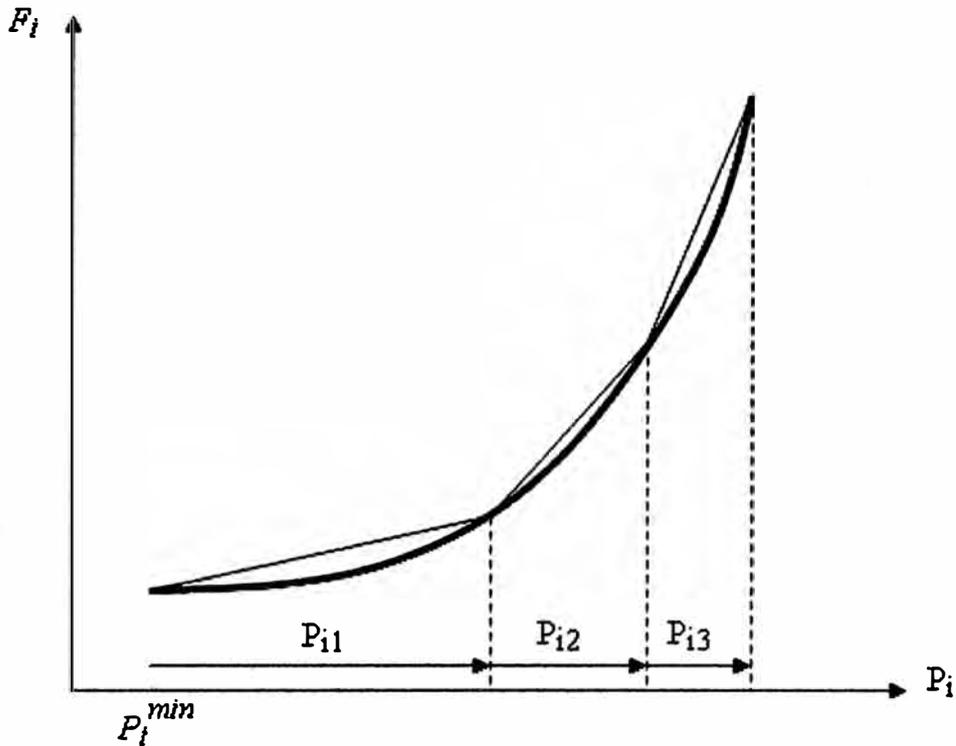


Fig. 2.2. Aproximación lineal de la función de los costos de generación

La formulación matemática del problema para resolver con programación lineal está dada por los siguientes conjuntos de ecuaciones:

Minimizar

$$C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m s_{ij} P_{ij}$$

Con sujeción a:

$$\sum_{i=1}^n P_{igen} = P_{loss} + \sum_{i=1}^n P_{yload}, \quad \text{El total de energía generada debe ser igual a la carga total, más pérdidas de energía en todo momento}$$

$$P_{imin} < P_i < P_{imax}, \quad \text{Límites de la Potencia activa de salida}$$

$$Q_{imin} < Q_i < Q_{imax}, \quad \text{Límites de la potencia reactiva de salida}$$

$$V_{kmin} < V_k < V_{kmax}$$

Limite superior e inferior de tensión

$$S_l < S_{lmax}$$

Limite de flujo en las lineas

Donde;

S_{ij} es el costo de la energía eléctrica generada por el generador i en la salida j en \$ / MWh

P_{ij} es la energía generada por el generador i en el nivel j en MWh

P_{imin} , P_{imax} la mínima y la máxima potencia de salida del generador i en el MW

P_i es una potencia de salida del generador i en el MW

Q_{imin} , Q_{imax} el mínimo y el máximo de potencia reactiva en generadores i en MVAR

Q_i es la producción de potencia reactiva en generadores i MVAR

V_{kmin} , V_{kmax} es el límite inferior y superior de tensión en cualquier barra k en kV

V_k es la tensión en la barra k en kV

S_{lmax} es el máximo flujo en la línea l en MW

S_L es el flujo en la línea l en MW

P_{loss} es la pérdida total en líneas de transmisión en MWh.

De esta forma se puede resolver el problema de FPO por aproximaciones lineales por tramos y por lo tanto utilizar el método de Programación Lineal.

CAPITULO III APLICACIONES DEL FLUJO DE POTENCIA OPTIMO

3.1 Introducción

Un estudio de flujos de potencia óptimo es utilizado ampliamente en la industria eléctrica para diferentes aplicaciones, que van desde estudios de planeación hasta operación de los sistemas. El principal objetivo de un FPO es optimizar las condiciones de operación en estado estacionario de un sistema eléctrico de potencia. Un FPO ajusta las cantidades controlables para optimizar una función objetivo mientras satisface un conjunto de restricciones operativas.

Una función objetivo puede incorporar aspectos económicos, de seguridad o medioambientales, que se resuelve utilizando técnicas de optimización adecuadas. Las restricciones son leyes físicas que gobiernan a los generadores, el sistema de transmisión, límites constructivos de los equipos eléctricos y estrategias operativas. Esta clase de problema es expresado como un problema de programación no lineal, con la función objetivo expresada como una función no lineal, y las restricciones expresadas como ecuaciones lineales y no lineales.

3.2 Aplicaciones del flujo de potencia óptimo en un ambiente de simulación de un sistema de potencia

Mientras que una solución única de FPO aporta información valiosa con respecto a un sistema de potencia, la implementación del FPO en un entorno de simulación de sistemas de potencia tiene aún mayor relevancia. De esta manera, una gran cantidad de datos económicos se puede extraer de la simulación. A continuación se expone varios ejemplos de la utilización del código FPO en el simulador de sistemas eléctricos PowerWorld, desarrollados por James Daniel Weber en su tesis de MSc. en la Universidad de Illinois at Urbana - Champaign, en el año 1997 [9].

3.2.1 Eliminación de sobrecargas en una línea

En este subcapítulo se expone las bondades del FPO, para lo cual se utiliza el sistema de potencia simple que no opera bajo FPO, mostrado en la figura 3.1.

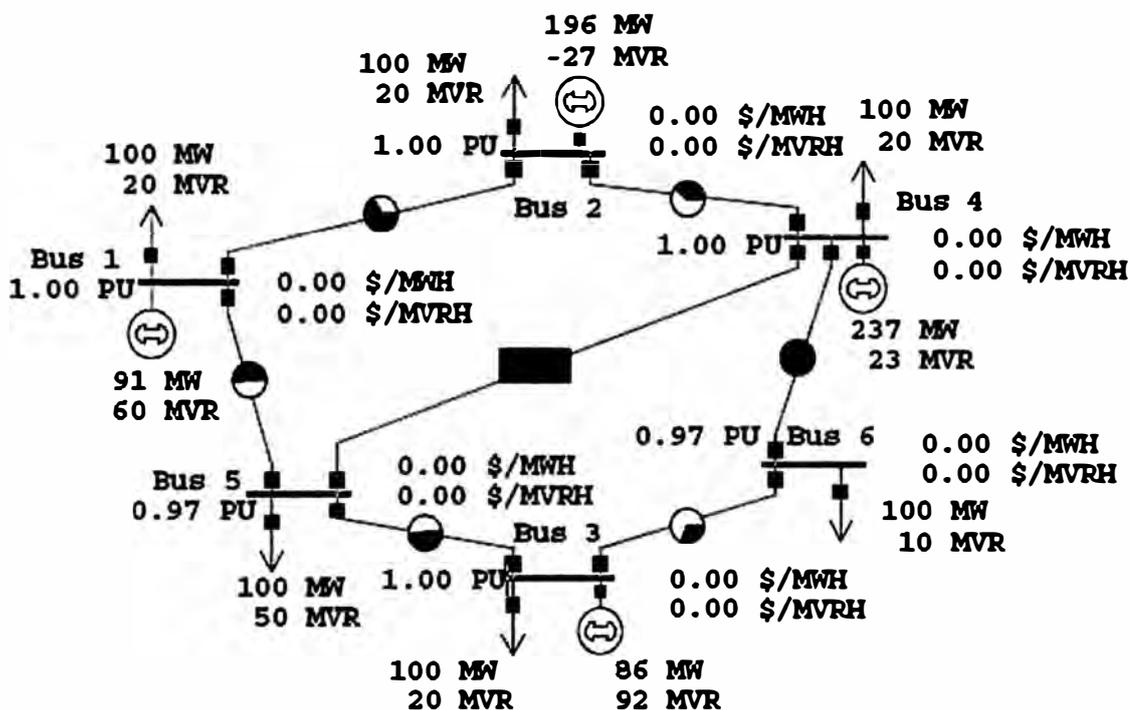


Fig. 3.1. Sistema Eléctrico de Potencia sin FPO

Con el fin de eliminar la sobrecarga en la línea que une las barras 4 y 5, el control FPO se activa, y la sobrecarga en la línea es eliminada, como se muestra en la Figura 3.2.

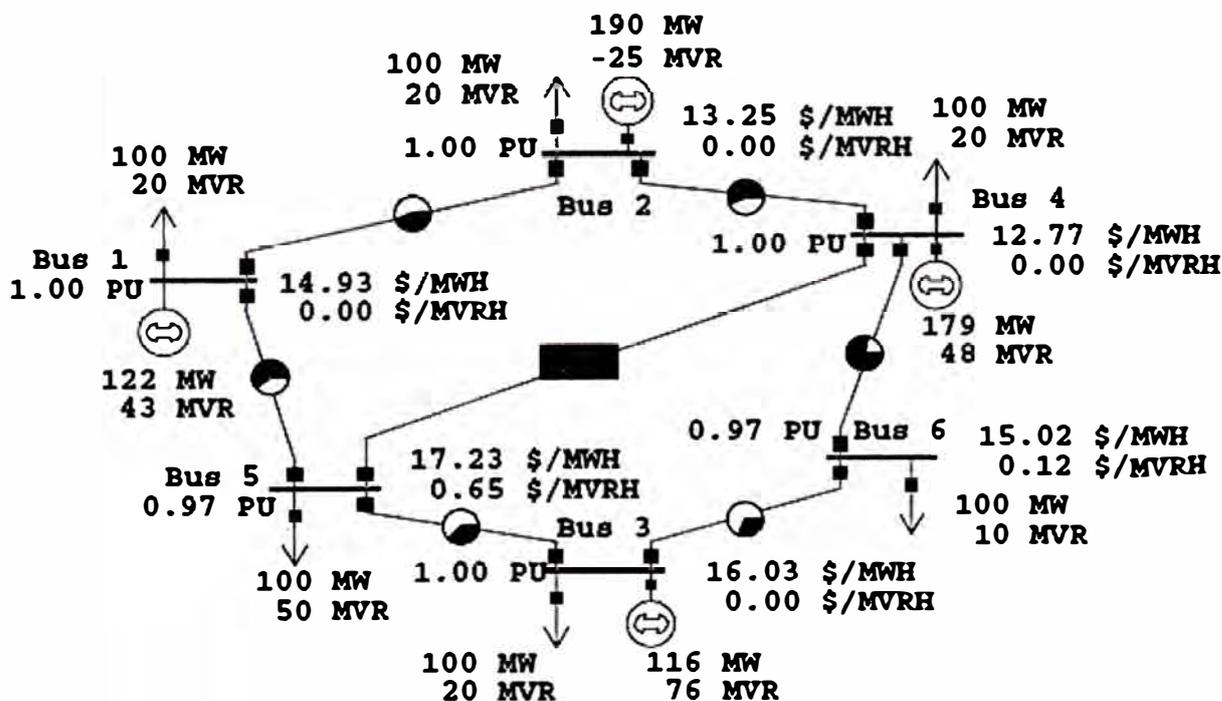


Fig. 3.2. Sistema Eléctrico de Potencia con FPO

Como puede verse, los generadores se han re-despachado a fin de eliminar la sobrecarga en la línea. Un análisis más detallado de este proceso desde un punto de vista económico será discutido en la siguiente sección.

3.2.2 Utilización para fijación de precios en barras con potencia activa y reactiva

Para ilustrar el potencial de fijación de precios de potencia activa y reactiva de la solución del FPO, el mismo sistema que se muestra en la Figura 3.1, se coloca sobre el control del FPO con su límite de línea aumentado. Téngase en cuenta que los resultados del FPO es el mismo despacho visto en la figura 3.1, ahora que el límite de la línea ha sido aumentado.

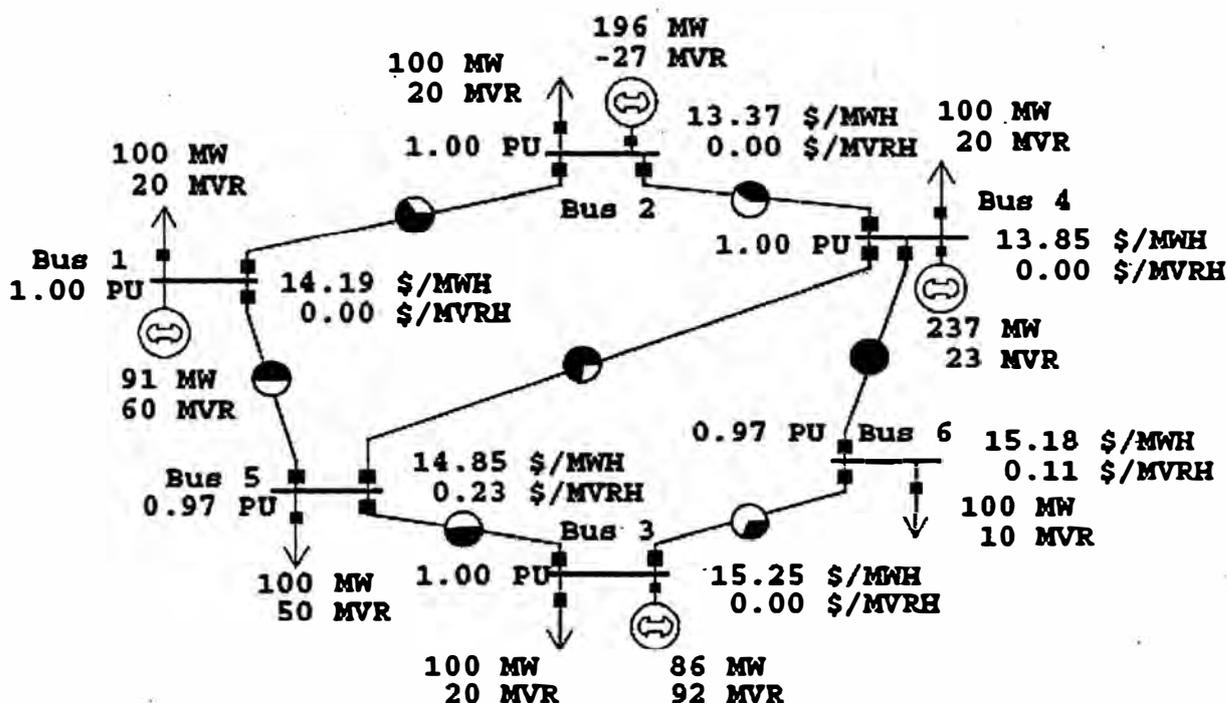


Fig. 3.3. Fijación de precios en barras

La comparación de las soluciones del FPO en la Figura 3.2 y Figura 3.1 ofrece una perspectiva valiosa. El costo total del sistema sin el límite en la línea mostrado en la Figura 3.1 es \$7824/hr. Con la línea limitada como en la figura 3.2, este costo se incrementa, como es de esperarse, a \$7895/hr. También debemos notar las diferencias entre los costos marginales de la barra MW en la Figura 3.2 y la Figura 3.1

Debido a que los generadores en las barras 2 y 4 fueron forzados a disminuir su salida para remover la sobrecarga, su costo marginal de barra MW decreció.

Por el contrario, los costos marginales en las barras 1, 3 y 5 se incrementaron. Como era esperado, los cambios más importantes ocurrieron al final de las líneas limitadas, barras 4 y 5.

3.2.3 Aplicación para la fijación de precios en un área de potencia activa

El método de solución del FPO puede ser usado también con sistemas de potencia de múltiple área. El FPO nos dará el intercambio programado para las áreas en estos sistemas. En la Figura 3.4, el sistema simple de 6 barras anterior está dividido en dos áreas como se muestra.

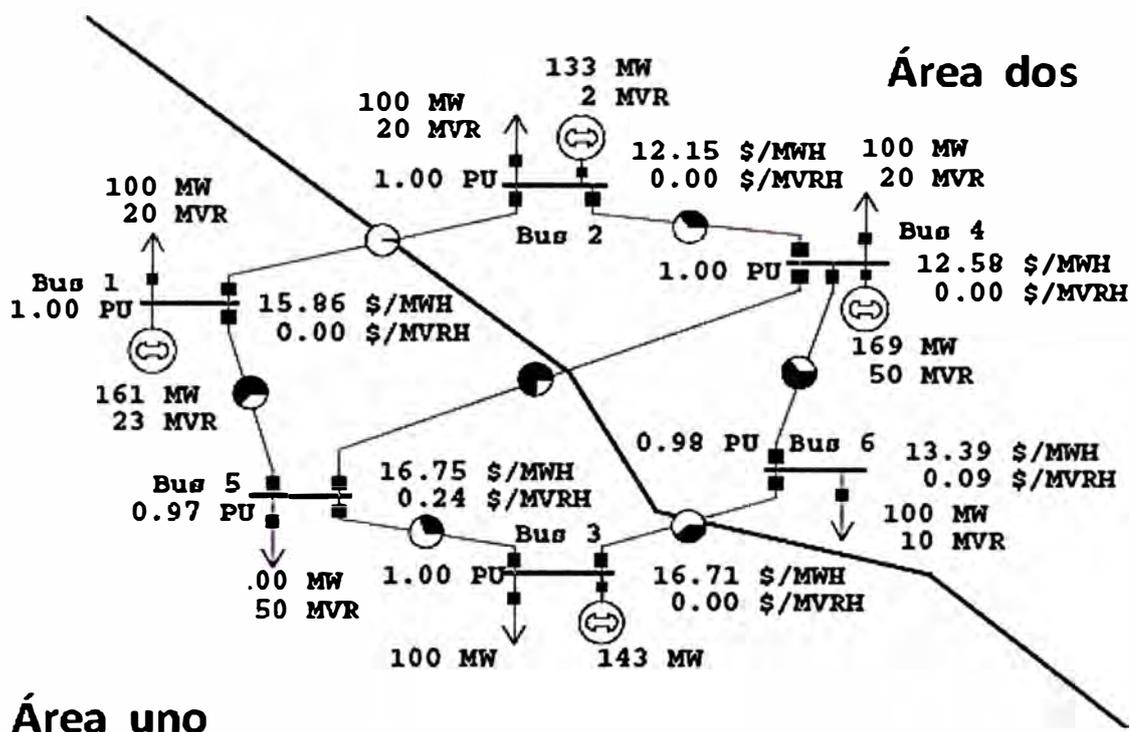


Fig. 3.4. Sistema de 6 barras, dos áreas de control

Como se observa, para este caso, la generación en el Área dos es menos costosa que en el Área uno; por lo tanto, podría ser ventajoso para ambas áreas si el Área uno obtuviera algo de potencia del Área dos. Usando el FPO, las transacciones programadas pueden ser fijadas entre las dos áreas para optimizar sus costos.

La Tabla 3.1 resume diferentes posibilidades de transacción de potencia entre áreas. Como se puede observar, el escenario menos costoso para la suma de las áreas se produce cuando se realiza un intercambio de 65.5 MW. Este escenario de transacción es mostrado en la Figura 3.5.

Tabla 3.1. Escenarios de transacción de potencia

Transacción (MW)	Costo -Área 1 (\$/h)	Costo -Área 2 (\$/h)	Costo Total (\$/h)
0.0	4564	3496	8060
50.0	4489	3423	7912
65.5	4482	3413	7895
70.0	4481	3415	7896
80.0	4481	3428	7909

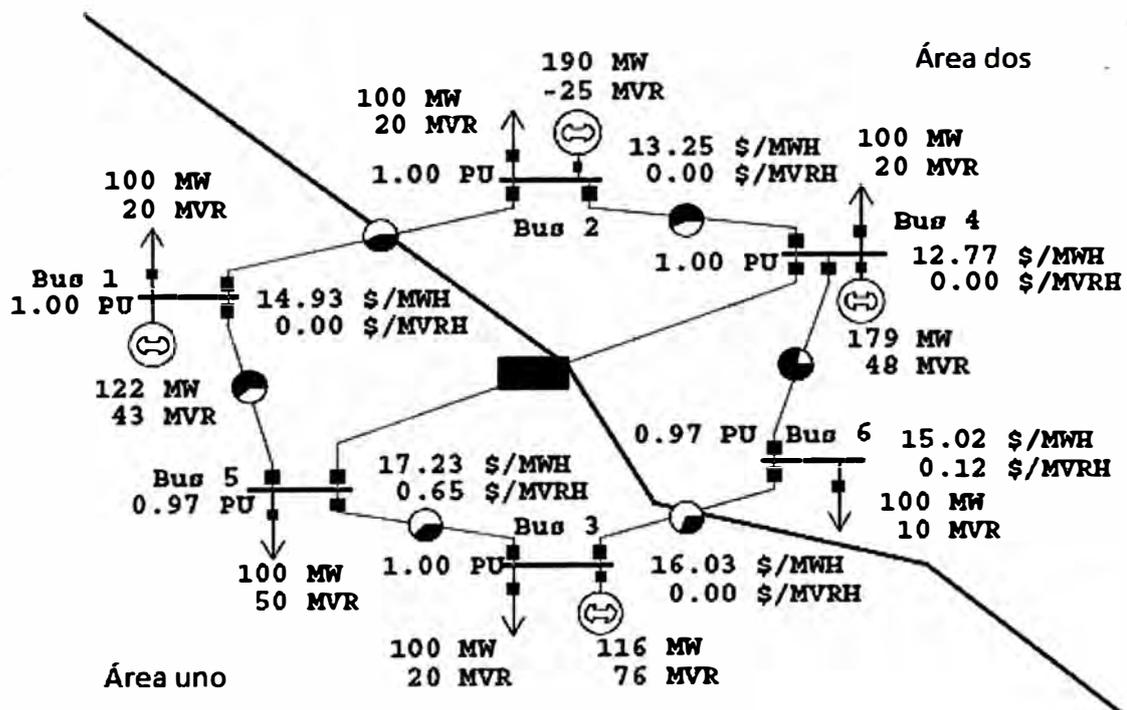


Fig. 3.5. Transacción de 65.5 MW

Comparando la solución del FPO en la Figura 3.2 inicial y la actual, se observa que presentan la misma solución. Esto es por supuesto nada inesperado, debido a que la negociación económica de dos áreas deberá proporcionar la misma solución que una solución de FPO sin tener en cuenta las áreas. Esto deberá pasar al estar las áreas en su solución óptima.

3.2.4 Transformador con Tap de Control

Con el fin de utilizar un transformador con Tap de control, un sistema de potencia más complejo fue usado en la Figura 3.6. Este sistema tiene 23 barras, 10 generadores, 23

224 y 102 a 122. El sistema como se muestra en la figura 3.6 está con control de FPO, pero la capacidad de controlar las relaciones de Tap está apagada y todas las relaciones de Tap están fijadas en 1 p.u.

El sistema de la Figura 3.7 ha activado las funciones de control del Tap del FPO, y las relaciones del Tap han sido manipuladas de manera que se minimice la función objetivo.

Entendiéndose por manipulación a los cambios de relación de transformación que el programa de FPO ha realizado, en su proceso de optimización.

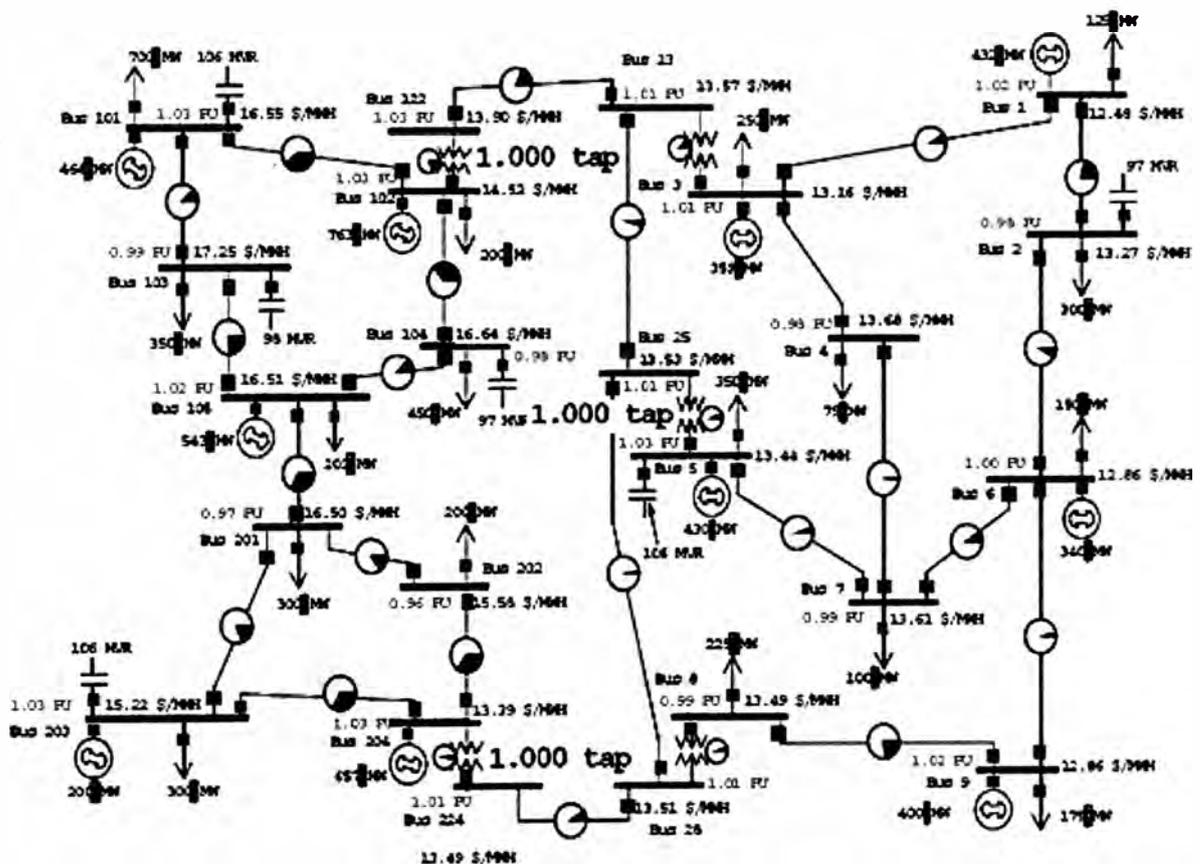


Fig. 3.6. Sistema de potencia de 23 barras sin control de Tap de FPO

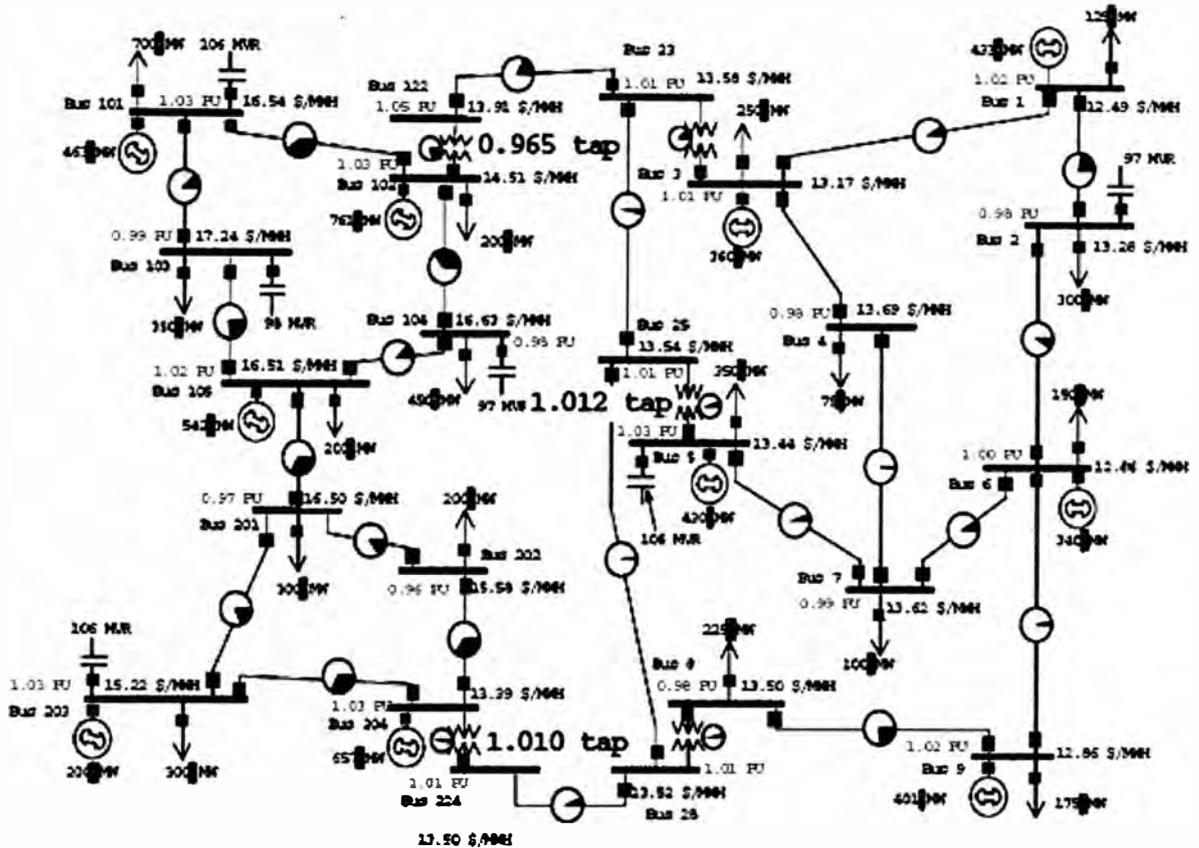


Fig. 3.7. Sistema de potencia de 23 barras con control de Tap de FPO

Un resumen de las relaciones de Tap y los costos totales resultantes del sistema son mostrados en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Resumen del control con Tap de FPO

Transformador con Tap entre barras	Con control de Tap OFF	Con control de Tap ON
5 y 25	1.0 pu	1.012 pu
102 y 122	1.0 pu	0.965 pu
204 y 224	1.0 pu	1.010 pu
COSTO TOTAL (\$/h)	50333.25	50330.55

Como era de esperarse, la capacidad de control de las relaciones de Tap ha reducido el costo total del sistema. Cabe señalar, sin embargo, que el control de las relaciones de Tap normalmente no reducirá drásticamente los costos del sistema. En realidad, el control de las relaciones de Tap permite el control del flujo de potencia reactiva y por lo tanto la reducción de pérdidas. Incluso teniendo en cuenta un

perfecto control de potencia reactiva, las pérdidas del sistema sólo se reducirán en una cantidad pequeña, por lo tanto, el control de Tap no tendrá un gran efecto.

3.3 Ejemplo de Aplicación de FPO en el sistema eléctrico Chileno

A continuación describiremos, la aplicación del flujo de potencia óptimo al caso real de un sistema eléctrico de un determinado país, implicaría en este caso una mejora en la obtención del costo marginal de la energía eléctrica al obtener menores costos por el uso de ésta, los detalles de esta aplicación se encuentra en la tesis para optar el grado de MSc. Del Sr. Juan Pérez Retamales [7].

Objetivo

Aplicación de este método al Sistema Interconectado Central Chileno (SIC) proveyendo en éste posibles variaciones, las cuales son comunes en cualquier sistema eléctrico de potencia (ya que éstos son dinámicos)

Procedimiento

El desarrollo, trata principalmente de la aplicación del método de programación cuadrática secuencial en los problemas de flujo de potencia óptimo; la cual aunque no se sugiere como prioridad en la elección para los problemas de FPO, si se resalta la buena convergencia que posee ésta, en la resolución de problemas no lineales.

El estudio empieza con una descripción de lo que es un sistema eléctrico de potencia (SEP) describiendo por tanto sus elementos principales y sus representaciones equivalentes, luego se continua con la descripción del modelo de un problema de FPO al usar la programación cuadrática secuencial (SQP) donde también se mencionan los métodos de Zoutendijk y Rosen.

Posteriormente se presenta una mejora en los métodos de optimización en la búsqueda de puntos factibles iniciales para el método Zoutendijk y Rosen. Se mencionan también a las **matrices esparcidas**, las cuales como sabemos, son muy comunes en todo sistema eléctrico de potencia y el uso de librerías que hace el autor para su mejor manejo.

Al final nos muestra de manera didáctica un pequeño ejemplo de un simple sistema de 6 barras al cual se le aplica el método y se muestra como la introducción de un SVC en una de sus barras provoca una disminución en el costo de operación.

Seguidamente se hace el objetivo del trabajo, la aplicación del método al Sistema Interconectado Central (SIC) para lo cual se modela esta en dos redes equivalentes:

- a) **SIC de 70 barras:** el cual representa un escenario de demanda baja e hidróloga húmeda. Se aplica OPF-SQP a esta red y se obtienen los resultados que se muestran en la siguiente Tabla.

Tabla 3.3: Resultados para Caso SIC de 70 Barras

Costos [US\$]	17.384,36
Potencia Activa [MW]	2329,686
Potencia Reactiva [MVar]	112,256
Pérdidas [MW]	67,388
Demanda P.A. [MW]	2245,188
Demanda P.R. [MVar]	841,428

La generación negativa de potencia reactiva, por parte de los generadores en la red, se debe al siguiente fenómeno físico: las líneas de transmisión en el SIC son de gran longitud, esto lleva a que el efecto capacitivo de las líneas sea elevado incluso superando a la demanda de potencia reactiva en los consumos (escenario de demanda baja), de esta manera, y para compensar este efecto, la generación total de potencia reactiva resulta ser negativa. La convergencia, según los indicadores utilizados, es encontrada en la octava iteración.

- b) **SIC de 182 barras:** el cual representa un escenario de demanda alta e hidrología seca.

La convergencia se encuentra en la quinta iteración. Esta es menos exigente que para la red SIC de 70 barras, porque su dimensión es mucho mayor y si se considerase una tolerancia menor no se encuentra convergencia.

Se obtienen los resultados que se muestran en la siguiente Tabla 3.4. Se puede notar ahora, a diferencia del caso anterior, que la generación de potencia reactiva es mayor que cero, esto se debe a que en este nuevo escenario de demanda alta, la inyección de potencia reactiva en las líneas de transmisión no alcanza a cubrir los requerimientos de los consumos, luego se debe generar potencia reactiva.

Tabla 3.4: Resumen de resultado de SIC de 182 Barras

Costos [US\$]	48.503,26
Gen Activa [MW]	3986,94
Gen Reactiva [MVAR]	379,39
Pérdidas [MW]	252,42

Conclusiones

En el estudio realizado por el MSc. Juan Pérez Retamales se ha formulado el problema del Flujo de Potencia Óptimo (OPF), incluyendo la modelación explícita de equipos FACTS (SVC) y utilizando Programación Cuadrática Secuencial SQP para solucionarlo. Los sub-problemas cuadráticos que se generan con SQP fueron resueltos con el software de optimización MINOS y alternativamente fueron desarrollados dos métodos, el de Zoutendijk de búsqueda de direcciones factibles y de Rosen de proyección del Gradiente.

3.4 Ventajas de la aplicación del FPO

A nivel mundial los sistemas eléctricos de potencia están sufriendo cambios estructurales en cuanto a su control y operación, debido al proceso de desregularización. Muchos sistemas eléctricos de potencia han presentado fragilidad a la estabilidad angular, estabilidad de frecuencia y estabilidad de tensión como consecuencia de un acentuado crecimiento de la demanda, limitaciones financieras impuestas por el nuevo modelo económico competitivo y restricciones ambientales, que dificultan la aplicación de inversiones necesarias para mejorar el comportamiento del sistema atendiendo a las necesidades impuestas por las cargas.

Así, los componentes del sistema son solicitados para operar en condiciones muy próximas a sus límites, y el sistema como un todo presenta un comportamiento crítico, de esta forma el sistema es conducido con facilidad hacia zonas de operación próximas a la inestabilidad.

En cuanto al control de potencia reactiva en los sistemas de potencia, la distribución de los recursos de potencia reactiva debe ser calculado dentro de periodos de tiempo sujeto a una política de control del sistema eléctrico mediante un modelo matemático de optimización con la finalidad de distribuir óptimamente los recursos de potencia reactiva y establecer el perfil de tensiones que garantice plenamente la seguridad del sistema satisfaciendo una función objetivo y sin infringir las restricciones de funcionamiento de los componentes del sistema.

Por estas razones, se crea la necesidad primordial de reformular el modelo matemático convencional de flujo de potencia óptimo, tanto sobre las funciones objetivo, así como sobre el punto de vista de las restricciones.

Existen muchas razones e innumerables trabajos publicados, sobre la necesidad de controlar los recursos de potencia reactiva y el perfil de tensiones. Los objetivos mas

importantes sobre la necesidad de controlar estos recursos y el perfil de tensiones pueden ser resumidas de la siguiente forma:

Aumentar la seguridad del sistema de potencia optimizando los recursos de potencia reactiva. En el proceso de optimización debe ser establecido en un margen de reserva de la potencia reactiva en las fuentes de generación para hacer frente a posibles condiciones de emergencia.

Mejorar la calidad de servicio disminuyendo las variaciones de tensión dentro de límites aceptables.

Reducir las pérdidas activas, reduciendo el flujo de potencia reactiva en las líneas de transmisión mediante una distribución óptima de los recursos de potencia reactiva.

Controlar las magnitudes de las tensiones o la calidad de servicio preservando la estabilidad del sistema de potencia como primera prioridad (estabilidad de tensión y estabilidad angular del rotor). O sea la seguridad del sistema es el primer objetivo.

Controlar el flujo de potencia reactiva en las líneas de transmisión distribuyendo óptimamente los recursos de potencia reactiva existentes como segunda prioridad, para reducir las pérdidas activas y reactivas. La reducción de los costos de operación es menos importante que la seguridad.

Las funciones objetivo mas comunes utilizadas a nivel mundial para resolver este tipo de problema son:

- Minimizar las pérdidas activas en las líneas de transmisión.
- Minimizar la potencia reactiva generada en las centrales eléctricas.
- Minimizar la suma ponderada de las pérdidas activas en las líneas de transmisión y potencia reactiva generadas en las centrales eléctricas dada.

CAPITULO IV

APLICACIÓN DE FLUJO DE POTENCIA OPTIMO MULTI OBJETIVO

4.1 Introducción

El Flujo de Potencia Optimo (FPO) consiste en despachar una serie de generadores con el fin de minimizar o maximizar una función objetivo sujeta a un conjunto de restricciones de igualdad y/o desigualdad. La función objetivo puede ser la minimización de las pérdidas, la maximización del beneficio social neto, la minimización del costo de generación, etcétera. El flujo de potencia optimo fue definido a comienzos de la década de los 60's por Carpentier. El primer método de solución propuesto fue el método de gradiente reducido propuesto por Carpentier. Posteriormente Dommel y Tinney abordaron el problema resolviendo las ecuaciones de Kuhn-Tucker usando una combinación del método del gradiente para un grupo conocido de variables independientes y funciones de penalización para violaciones en las restricciones dependientes. De los dos métodos del gradiente, el propuesto por Dommel y Tinney es uno de los más reconocidos en la literatura existente sobre este tema.

En este informe se introduce el concepto de Flujo de Potencia Óptimo multiobjetivo y se hace dos aplicaciones utilizando conocidos sistemas de prueba de la IEEE.

4.2 Flujo de Potencia Optimo Multiobjetivo

Un problema de optimización multiobjetivo se caracteriza por la optimización simultánea de varias funciones objetivo con diferentes soluciones óptimas. Generalmente las funciones objetivo de un problema de optimización multiobjetivo son conflictuantes entre si y por esa razón no existe una única solución que sea optima simultáneamente para todos los objetivos y si existe un conjunto de soluciones de compromiso denominado conjunto eficiente o Pareto optimo.

Para un problema de optimización multiobjetivo, la función objetivo de varias funciones serán minimizadas simultáneamente pero donde una de ellas domina a las demás [8]. Por ejemplo para una función objetivo con dos funciones de optimización, se puede escribir de la siguiente forma: $\text{Min } [f(x_1), f(x_2)]$

Se dice que la solución x_1 domina a la solución x_2 si se cumplen en la i -ésima iteración la siguiente condición: $f_i(x_1) < f_i(x_2)$.

En nuestro caso se va utilizar como función objetivo la suma del costo de generación de la potencia activa y el costo de las pérdidas de la potencia activa en las líneas de transmisión, es decir; la función objetivo es: *minimizar* ($f_1 + f_2$)

Donde: $f_1 = \sum [a_{1i} + b_{1i}(P_i) + c_{1i}(P_i^2)]$, es la función de costo total de generación y $f_2 = \sum d_{2i}(P_{i,loss})$, son las pérdidas en las líneas del sistema eléctrico.

4.3 Aplicación a un sistema de 6 barras

El sistema de 6 barras conocido como sistema "Ward & Hale System" cuya topología se muestra en la Fig. 5.1, y los datos de los nodos y las líneas en las Tablas 5.1 y 5.2 respectivamente

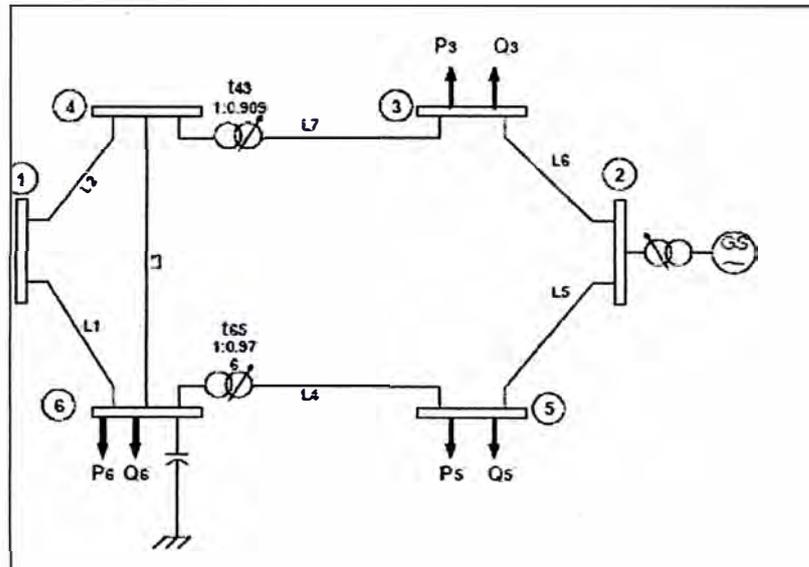


Fig. 4.1. Sistema de 6 barras "Ward & Hale System"

Tabla 4.1. Datos de las líneas

Línea	De	Para	r (pu)	x (pu)	Tap
1	1	6	0.123	0.518	
2	1	4	0.080	0.037	
3	4	6	0.097	0.407	
4	6	5	0.000	0.300	0.976
5	5	2	0.282	0.640	
6	2	3	0.723	1.050	
7	4	3	0.000	0.133	0.909

Tabla 4.2. Datos de las barras y cargas

Barra No.	Barra Tipo	Tension pu.	Genera. pu.	Carga pu.
1	Swing	1.05		
2	PV	1.10	0.501	
3	PQ			0.55+j0.13
4	PQ			
5	PQ			0.30+j0.18
6	PQ			0.50+j0.05

4.3.1 Resultados

Para las simulaciones del FPO se ha utilizado la plataforma computacional de MATLAB versión 2007, donde se ha instalado el software especializado para Flujo de carga y FPO llamado MATPOWER V.3, obteniéndose los siguientes resultados mostrados en la Tablas 4.3 y 4.4, donde se observa la disminución de las perdidas activas en el FPO en comparación con el flujo de potencia (FP). En este ejemplo la función objetivo consiste en minimizar las perdidas activas en las líneas, como se puede observar en los resultados siempre existe la tendencia de elevar la tensión en las barras, este resultado es totalmente razonable, por que como se tiene conocimiento, una forma de reducir las perdidas es utilizando líneas de transmisión con mayor nivel de tensión.

Tabla 4.3. Limites de las Variables de Control y resultados de FP y FPO

Variable de Control	Taps		Tensión		Q6 MVAR
	t65	t43	Nodo V1	Piloto V2	
Limetes					
Minimo	0.900	0.900	1.000	1.100	-5.000
Maximo	1.100	1.100	1.100	1.150	5.500
Carga Nominal					
FP	0.976	0.909	1.050	1.100	5.230
FPO	1.043	1.021	1.100	1.150	5.32
Carga Nominal					
FP	0.976	0.909	1.050	1.100	5.480
FPO	1.000	1.006	1.026	1.100	5.540
Carga Nominal					
FP	0.976	0.909	1.050	1.100	4.710
FPO	1.087	1.065	1.100	1.150	4.870

Tabla 4.4. Límites de las Variables de Estado
y resultados de FP y FPO

Variable de Estado	Corriente		Tensión		Perd. MW
	Ia1	Ia2	Nodo V3	Piloto V6	
Límites					
Mínimo	0.120	0.120	0.900	0.900	
Máximo	1.150	1.150	1.100	1.100	
Carga Nominal					
FP	0.988	0.554	0.855	0.933	11.620
FPO	0.934	0.468	1.000	0.984	9.030
Carga Nominal					
FP	0.436	0.301	0.935	1.170	3.070
FPO	0.439	0.262	1.001	1.030	2.430
Carga Nominal					
FP	1.195	0.463	0.824	0.900	16.140
FPO	1.143	0.529	0.999	0.941	12.500

4.4 Aplicación al sistema IEEE de 30 barras

Los datos del sistema de 30 barras IEEE, se muestran en las Tablas 4.5 hasta Tabla 4.8

Tabla. 4.5. Datos de las Barras del Sistema de 30 Barras IEEE

Nro. Barra	Tipo	Pd	Qd	Bs	área	Vm	Va	baseKV	Vmáx	Vmín
1	3	0	0	0	1	1.06	0	132	1.06	0.94;
2	2	21.7	12.7	0	1	1.043	-5.48	132	1.06	0.94;
3	1	2.4	1.2	0	1	1.021	-7.96	132	1.06	0.94;
4	1	7.6	1.6	0	1	1.012	-9.62	132	1.06	0.94;
5	2	94.2	19	0	1	1.01	-14.37	132	1.06	0.94;
6	1	0	0	0	1	1.01	-11.34	132	1.06	0.94;
7	1	22.8	10.9	0	1	1.002	-13.12	132	1.06	0.94;
8	2	30	30	0	1	1.01	-12.1	132	1.06	0.94;
9	1	0	0	0	1	1.051	-14.38	1	1.06	0.94;
10	1	5.8	2	19	1	1.045	-15.97	33	1.06	0.94;
11	2	0	0	0	1	1.082	-14.39	11	1.06	0.94;
12	1	11.2	7.5	0	1	1.057	-15.24	33	1.06	0.94;
13	2	0	0	0	1	1.071	-15.24	11	1.06	0.94;
14	1	6.2	1.6	0	1	1.042	-16.13	33	1.06	0.94;

15	1	8.2	2.5	0	1	1.038	-16.22	33	1.06	0.94;
16	1	3.5	1.8	0	1	1.045	-15.83	33	1.06	0.94;
17	1	9	5.8	0	1	1.04	-16.14	33	1.06	0.94;
18	1	3.2	0.9	0	1	1.028	-16.82	33	1.06	0.94;
19	1	9.5	3.4	0	1	1.026	-17	33	1.06	0.94;
20	1	2.2	0.7	0	1	1.03	-16.8	33	1.06	0.94;
21	1	17.5	11.2	0	1	1.033	-16.42	33	1.06	0.94;
22	1	0	0	0	1	1.033	-16.41	33	1.06	0.94;
23	1	3.2	1.6	0	1	1.027	-16.61	33	1.06	0.94;
24	1	8.7	6.7	4.3	1	1.021	-16.78	33	1.06	0.94;
25	1	0	0	0	1	1.017	-16.35	33	1.06	0.94;
26	1	3.5	2.3	0	1	1	-16.77	33	1.06	0.94;
27	1	0	0	0	1	1.023	-15.82	33	1.06	0.94;
28	1	0	0	0	1	1.007	-11.97	132	1.06	0.94;
29	1	2.4	0.9	0	1	1.003	-17.06	33	1.06	0.94;
30	1	10.6	1.9	0	1	0.992	-17.94	33	1.06	0.94;

Tabla. 4.6. Datos de las Líneas del Sistema de 30 Barras IEEE

Línea Nro.	Barra Salida	Barra Llegad	r	x	b	rateA	Tap	ángulo	estado
1	1	2	0.0192	0.0575	0.0528	9900	0	0	1;
2	1	3	0.0452	0.1652	0.0408	9900	0	0	1;
3	2	4	0.057	0.1737	0.0368	9900	0	0	1;
4	3	4	0.0132	0.0379	0.0084	9900	0	0	1;
5	2	5	0.0472	0.1983	0.0418	9900	0	0	1;
6	2	6	0.0581	0.1763	0.0374	9900	0	0	1;
7	4	6	0.0119	0.0414	0.009	9900	0	0	1;
8	5	7	0.046	0.116	0.0204	9900	0	0	1;
9	6	7	0.0267	0.082	0.017	9900	0	0	1;
10	6	8	0.012	0.042	0.009	9900	0	0	1;
11	6	9	0	0.208	0	9900	0.978	0	1;
12	6	10	0	0.556	0	9900	0.969	0	1;
13	9	11	0	0.208	0	9900	0	0	1;
14	9	10	0	0.11	0	9900	0	0	1;
15	4	12	0	0.256	0	9900	0.932	0	1;
16	12	13	0	0.14	0	9900	0	0	1;
17	12	14	0.1231	0.2559	0	9900	0	0	1;
18	12	15	0.0662	0.1304	0	9900	0	0	1;
19	12	16	0.0945	0.1987	0	9900	0	0	1;
20	14	15	0.221	0.1997	0	9900	0	0	1;
21	16	17	0.0524	0.1923	0	9900	0	0	1;
22	15	18	0.1073	0.2185	0	9900	0	0	1;
23	18	19	0.0639	0.1292	0	9900	0	0	1;

24	19	20	0.034	0.068	0	9900	0	0	1;
25	10	20	0.0936	0.209	0	9900	0	0	1;
26	10	17	0.0324	0.0845	0	9900	0	0	1;
27	10	21	0.0348	0.0749	0	9900	0	0	1;
28	10	22	0.0727	0.1499	0	9900	0	0	1;
29	21	22	0.0116	0.0236	0	9900	0	0	1;
30	15	23	0.1	0.202	0	9900	0	0	1;
31	22	24	0.115	0.179	0	9900	0	0	1;
32	23	24	0.132	0.27	0	9900	0	0	1;
33	24	25	0.1885	0.3292	0	9900	0	0	1;
34	25	26	0.2544	0.38	0	9900	0	0	1;
35	25	27	0.1093	0.2087	0	9900	0	0	1;
36	28	27	0	0.396	0	9900	0.968	0	1;
37	27	29	0.2198	0.4153	0	9900	0	0	1;
38	27	30	0.3202	0.6027	0	9900	0	0	1;
39	29	30	0.2399	0.4533	0	9900	0	0	1;
40	8	28	0.0636	0.2	0.0428	9900	0	0	1;
41	6	28	0.0169	0.0599	0.013	9900	0	0	1;

Tabla. 4.7. Datos de los generadores del Sistema de 30 Barras IEEE

Barra	Pg	Qg	Qmax	Qmin	Vg	mBase	Pmax	Pmin
1	260.2	-16.1	10	0	1.06	100	360.2	0;
2	40	50	50	-40	1.045	100	140	0;
5	0	37	40	-40	1.01	100	100	0;
8	0	37.3	40	-10	1.01	100	100	0;
11	0	16.2	24	-6	1.082	100	100	0;
13	0	10.6	24	-6	1.071	100	100	0;

Tabla. 4.8. Datos del costo de Generación del Sistema de 30 Barras IEEE

Gen. Nro.	costo Arran	costo Parada	segmentos	c2	c1	c0
2	0	0	3	0.038432	20	0;
2	0	0	3	0.25	20	0;
2	0	0	3	0.01	40	0;
2	0	0	3	0.01	40	0;
2	0	0	3	0.01	40	0;
2	0	0	3	0.01	40	0;

4.4.1 Resultados

Los resultados obtenidos en las simulaciones con el software especializado fueron los que se muestran en la Tabla 4.9. El proceso de convergencia demoró 5.63 segundos y el costo de la función objetivo resultó \$ 8906.14.

Tabla. 4.9. Resultados de FPO multiobjetivo para sistema de 30 Barras IEEE

Costos [US\$]	8906.14
Potencia Activa [MW]	295.14
Potencia Reactiva [MVar]	113.94
Pérdidas [MW]	11.742
Demanda P.A. [MW]	283.40
Demanda P.R. [MVar]	126.20

Se puede concluir que para el caso analizado con dos funciones a optimizar, la función dominante es el costo total de la generación porque las pérdidas son función de la generación.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El primer objetivo, de la aplicación de la teoría de Flujo de Potencia Óptimo a sistemas eléctricos que se exponen en este trabajo es el control óptimo de los recursos de la potencia activa y reactiva y por lo tanto el perfil de tensiones. El segundo objetivo consiste en minimizar las pérdidas activas de transmisión y se observa que los resultados son satisfactorios.

En el presente trabajo se ha demostrado, con los resultados obtenidos en la aplicación a sistemas de prueba de la IEEE, que los resultados de la solución del sistema mediante los programas de flujo de potencia no dan ninguna garantía de la operación óptima del sistema, razón por la cual se aplica la formulación del FPO, observándose resultados más económicos.

En un sistema de potencia donde no se utiliza un programa de FPO para definir su política de operación según las exigencias de seguridad, calidad y economía impuestas por el nuevo mercado competitivo no se tiene como demostrar el aprovechamiento óptimo de sus recursos de potencia activa y reactiva y mal se haría al intentar establecer una política de tarifas verdadera.

En esta época la tendencia mundial camina hacia la automatización total de los sistemas de potencia con el objetivo de alcanzar seguridad y eficiencia que es necesaria para reducir los costos de producción de la energía eléctrica y que repercute sobre los costos de producción de otros productos manufacturados de consumo local y de exportación.

Una vez que el sistema se encuentre operando óptimamente y con un adecuado grado de seguridad, es viable y razonable implementar las políticas de evaluación de los costos de energía en tiempo real.

Finalmente, se puede afirmar que este trabajo es un aporte inicial de la teoría del FPO, y que servirá de base teórica e información bibliográfica para estudiantes y profesionales de la Ingeniería Eléctrica en nuestro país.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Glavitch H., Bacher R., 1991, "Optimal Power Flow Algorithms, Analysis and Control System Techniques for Electric Power Systems", Vol. 41, Academic Press.
- [2] Carpentier, J. L., (1962). "Contribution a l'étude du dispatching économique. Bull Soc. Fr Elec., Ser. B3, 431-447.
- [3] Dommel, H. W. and Tinney, W. F., (1968). "Optimal power flow solutions;" IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, no. 87, pp. 1866-1876.
- [4] Fletcher R., 1987, "Practical Methods of Optimization", 2. Auflage, John Wiley & Sons, New York.
- [5] Momoh J., El-Hawary E., Adapa R., 1999, "A Review of Selected Optimal Power Flow Literature to 1992", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, N° 1.
- [6] El-Hawary E., 1996, "Optimal Power Flow: Solution Techniques, Requirements, and Challenges", University of Nova Scotia, IEEE Tutorial Course N° 96 111-0, pp. v.
- [7] Flujo de Potencia Óptimo con programación cuadrática secuencial: juan eduardo perez retamales/ universidad de chile. 2001.
- [8] Veldhuizen, D. A. V. and Lamont, G. B. (2000). "Multiobjective evolutionary algorithm: Analyzing the state-of-the-art;" Evol. Comput., vol. 8, no. 2, pp. 125-147.
- [9] James Daniel Weber, "Implementation of a Newton-Based Optimal Power Flow into a Power System simulation environment" Tesis de MSc. En Ingeniería Eléctrica. University of Illinois at Urbana – Champaign. 1997