

Asignación de Unidades con Restricciones de Abastecimiento de Combustibles

G. Nina

Corporación Centro Nacional de Control de Energía - CENACE

Resumen-- Este trabajo presenta una metodología para resolver el problema de asignación de unidades tomando en cuenta el abastecimiento de combustibles.

El abastecimiento de combustible en el caso de la cadena de abastecimiento del Sistema Eléctrico Ecuatoriano comienza en los tanques de almacenamiento de Petrocomercial los cuales proveen de combustible a las unidades de generación termoeléctrica en sus tanques de abastecimiento. Los tiempos de entrega del combustible a los tanques de abastecimiento de las unidades termoeléctricas son diferentes.

La asignación de unidades para el sistema entonces depende de las unidades disponibles, sus características técnicas, la disponibilidad de combustibles en los tanques de almacenamiento y la demanda de energía.

Este problema es resuelto aplicando Relajación Lagrangeana, para lo cual se considera el problema clásico de asignación de unidades con la función objetivo en la cual se añade la restricción relacionada al abastecimiento de combustibles mediante multiplicadores de Lagrange.

El análisis del problema para la cadena de abastecimiento del sistema eléctrico y la modelación son nuevos. Se presentan resultados para ilustrar la metodología.

La metodología empleada se muestra adecuada para la solución del problema en el caso ecuatoriano.

Palabras Claves-- Asignación de unidades, relajación lagrangeana, abastecimiento de combustibles, programación mixta.

1. INTRODUCCIÓN

La pregunta que se trata de dar respuesta en este trabajo es: dada la proyección de carga eléctrica y el inventario de los combustibles, ¿cómo debe ser

utilizado el combustible? Esto de manera que: no se violen las disponibilidades existentes de combustible a nivel nacional y la capacidad de almacenamiento de combustible y las restricciones operativas de las centrales térmicas considerando que los costos controlables que se incurren en el proceso se mantienen en niveles mínimos. Así como cuál debe ser el despacho de las unidades de generación.

El CENACE realiza la planificación de la operación del S.N.I. utilizando horizontes de planificación de largo, mediano y corto plazo. En los horizontes de largo y mediano plazo los resultados de la planificación arrojan la cantidad de combustible que debe ser utilizado por las centrales térmicas, la generación de las centrales disponibles, así como la evolución de los embalses de las centrales hidroeléctricas tanto a nivel mensual como semanal. En el corto plazo por otro lado se determina la programación de las unidades para el siguiente día.

Los resultados de la cantidad de combustible necesario tanto a nivel mensual como semanal son utilizados por Petrocomercial para realizar la programación de asignaciones de compra de combustibles para las centrales térmicas. Esta programación utiliza también como datos para la programación: las disponibilidades de combustibles en terminales y las importaciones previstas de combustible a nivel nacional así como el nivel de los tanques de almacenamiento de cada una de las centrales térmicas. De esta manera se establece las entregas día a día de los combustibles a las centrales que están previstas a operar en la programación del CENACE.

La programación de combustibles así planificada es aprobada por el CENACE y enviada a las centrales para que realicen la compra del combustible requerida. Esta compra puede ser realizada por las centrales térmicas al contado y en casos de emergencia energética mediante crédito.

Dependiendo de la cantidad de combustible en los terminales estos son entregados a las centrales térmicas mediante varios medios de transporte,

así se emplean poliductos, buques cisterna y auto tanques, el medio de transporte que debe utilizarse es programado también por Petrocomercial.

De acuerdo al transporte utilizado existe un tiempo que transcurre entre el despacho del combustible en las terminales y la llegada a la central.

Las unidades de generación en este esquema de funcionamiento supervisan el nivel de combustible y lo reportan diariamente al CENACE y de acuerdo a la programación aprobada reciben el combustible.

Bajo estas consideraciones cuando la provisión de combustible es considerada sin limitaciones, el esquema establecido es suficiente para garantizar un abastecimiento adecuado; sin embargo pueden darse dos condiciones que deben ser analizadas en detalle. La primera sucede cuando no hay suficiente capacidad en un terminal de Petrocomercial y se debe optar por un transporte de combustible alternativo de otra terminal. La segunda condición es aquella que no haya disponibilidad de un tipo de combustible para la operación de alguna central térmica y se tenga que optar por otro tipo de combustible de mayor precio, esto afecta al despacho de las unidades.

De esta manera la coordinación de las condiciones de la existencia de combustible de los terminales, el transporte y las unidades que deben operar configuran un problema en el cual se deben tomar varias decisiones que están interrelacionadas unas con otras.

Este problema puede ser tratado bajo dos puntos de vista, una visión sería considerarlo desde el punto de vista de Petrocomercial. Si bien Petrocomercial no solamente abastece al Sector Eléctrico de combustible, este sin embargo tiene un consumo representativo. Se considera que en época de estiaje la demanda para cierta clase de combustibles para el sector Eléctrico constituye un 50% de la demanda total. En el caso citado entonces se debería establecer el problema de abastecimiento de combustible global para el Sector Eléctrico tomando en consideración la programación a largo plazo que establece las cuotas energéticas de forma probabilística de acuerdo a la estocacidad de la hidrología. El resultado de esta programación debería establecer las políticas para el manejo de los inventarios en terminales de forma de abastecer la demanda del Sector Eléctrico, así como en forma general también las políticas para el manejo de los inventarios en los tanques de almacenamiento de las centrales térmicas.

La otra visión sería más de corto plazo y tendría características determinísticas, es decir dado el

abastecimiento de combustibles determinado por Petrocomercial y el CENACE como se debería despachar las unidades de generación en caso de existir alguna restricción de inventario de combustible en los tanques de almacenamiento de las centrales térmicas. Este último problema configura la denominada asignación de unidades con restricción de abastecimiento de combustibles.

El problema a resolver es un problema de planificación jerárquico con dos niveles como se muestra en la Fig. 1.

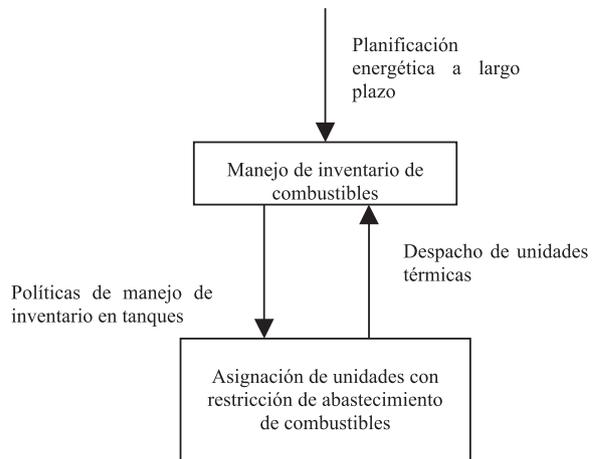


Figura 1: Planificación Jerárquica para Manejo de Combustibles y Asignación de Unidades

El primer problema es un problema estocástico pues recibe la distribución probabilística de energía producto de la planificación energética de largo plazo. Este problema ha sido estudiado en teoría de inventarios y estaría bajo el concepto de inventario de múltiples productos con múltiples niveles con demanda probabilística. En este trabajo no se abordara el problema y será tema de próximos trabajos. El problema a tratar será el de asignación de unidades con restricción de abastecimiento, este problema recibe del nivel superior las políticas de manejo de inventario de los tanques de combustible o sea en las cantidades de combustible que se puede emplear en un horizonte de una semana, los periodos que se consideran en este problema son los usuales de asignación de unidades es decir horas.

Este problema a su vez retroalimenta al nivel superior con el despacho de unidades que sirven de condiciones iniciales para el problema a tratarse.

Por facilidad de notación y tratamiento teórico del problema a tratarse se tomara en cuenta solamente las unidades térmicas, sin considerar las unidades

hidroeléctricas ni la red del sistema. Este tratamiento es fácilmente expandible para considerar tanto las unidades hidroeléctricas como la red y es establecido en la coordinación hidroeléctrica como se cita en Wood y Wollenberg [10].

El problema de asignación de unidades con restricciones de combustible ha recibido un tratamiento extensivo. Las metodologías empleadas se pueden clasificar en tres tipos:

- 1) Flujo en redes, Kumar et al [5] y Seymore [8].
- 2) Relajación Lagrangeana, Vemuri y Lemonidis [9]; Cohen y Wan [2]; y Aoki et al [1].
- 3) Ajuste multiplicativo, Lee [7].

El método utilizado en este trabajo es Relajación Lagrangeana que descompone el problema en uno de asignación de unidades sin restricciones de abastecimiento de combustibles estas restricciones son añadidas a la función objetivo utilizando multiplicadores de Lagrange, luego estos multiplicadores son buscados iterativamente hasta que no se encuentra una solución mejor dentro de determinado rango, Fisher [3].

La contribución del trabajo consiste en la modelación que se hace para el Sistema Eléctrico ecuatoriano y en la definición de los niveles de la planificación jerárquica necesarios para la solución de este problema.

2. METODOS

2.1. Formulación del Problema

Se emplea la siguiente notación para el modelo empleado

Índices

- j Unidad de generación.
- t Periodo de tiempo. $j = 1 \dots T$

Variables

P_{jt} Proporción de la máxima potencia disponible sin tomar en cuenta la potencia mínima de la unidad j en el periodo t .

w_{jt} Variable 0 – 1, $w_{jt} = 1$ si la unidad está operando durante el periodo t , 0 si no.

u_{jt} Variable 0 – 1, $u_{jt} = 1$ si la unidad es prendida durante el periodo t , 0 si no.

v_{jt} Variable 0 – 1, $v_{jt} = 1$ si la unidad es apagada durante el periodo t , 0 si no.

Parámetros

D_t Demanda de potencia en el periodo t (Mw).

x_{jt} Inventario de combustible en tanque de la central j en el periodo t . (Btu)

t_j Periodo de tiempo en que se entrega el combustible en el horizonte considerado en el tanque de la central j .

c_j Costo de prendido de la unidad j . (R).

s_j Costo de apagado de la unidad j . (R).

$\underline{P}_j, \bar{P}_j$ Límites de potencia de la unidad j . (Mw)

Funciones

$F_j(P_{jt}) = a_j + b_j P_{jt}$ Función de costo de la unidad j . (R).

$q_j(P_{jt}) = \bar{b}_j P_{jt}$ Consumo de combustible de la unidad j . (Btu)

Función Objetivo

$$\min \sum_t \sum_j (c_j u_{jt} + s_j v_{jt} + b_j P_{jt} \bar{P}_j) \quad (1)$$

Sujeto a:

Satisfacción de la demanda eléctrica.

$$\sum_j (\underline{P}_j w_{jt} + \bar{P}_j P_{jt}) = D_t, \forall t \quad (2)$$

La unidad es prendida en el periodo t .

$$w_{jt} - w_{j,t-1} \leq u_{jt}, \forall j, \forall t \quad (3)$$

La unidad es apagada en el periodo t .

$$w_{j,t-1} - w_{jt} \leq v_{jt}, \forall j, \forall t \quad (4)$$

Restricción de concordancia.

$$0 \leq P_{jt} \leq w_{jt} \quad (5)$$

Límites en consumo de combustible en los días de la semana.

$$\sum_{t=1}^{t_j} (\bar{b}_j P_{jt} w_{jt} + \bar{b}_j \bar{P}_j P_{jt}) \leq x_{j1}, \forall j$$

$$\sum_{t=t_j}^T (\bar{b}_j P_{jt} w_{jt} + \bar{b}_j \bar{P}_j P_{jt}) \leq x_{jt}, \forall j \quad (6)$$

La función objetivo del modelo considera los costos de encendido y apagado de las unidades así

como el costo de operación el cual incluye el costo de combustible. En la función objetivo de la ecuación $F_j(P_{jt}) = a_j + b_j P_{jt}$, no se considera el término a_j por ser constante.

La restricción (2) establece el equilibrio entre la demanda y la generación de energía. Las restricciones (3) y (4) garantizan que la consistencia entre el apagado y prendido de las unidades de generación se mantenga; sin embargo dado las características de estas restricciones y que w_{jt} es 0 o 1 podemos considerar que siempre v_{jt} y u_{jt} serán siempre cero o uno y por lo tanto en el modelo podrán ser consideradas $v_{jt} \geq 0$ y $u_{jt} \geq 0$. Así mismo en la restricción (5) se establece que $P_{jt} \geq 0$ solamente si w_{jt} es 1 Muckstadt y Koenig [6].

Las ecuaciones (6) toman en cuenta, de acuerdo a lo que se establece en la introducción, que el combustible determinado por el nivel de manejo de inventario de combustibles de la Planificación Jerárquica establecida llega a los tanques de combustible en un determinado periodo t_j , una sola vez dentro del horizonte establecido, es decir dentro de una semana. Esta cantidad de combustible x_{jt} debe ser suficiente para la generación en los periodos de t_j a T . Por supuesto en los periodos comprendidos entre 1 y t_j se debe generar de acuerdo a la cantidad almacenada de combustible en el periodo inicial x_{j1} .

Como se manifestó en la introducción no se toma en cuenta las unidades hidroeléctricas ni la red para enfocarse en la solución del problema tratado de asignación de unidades con restricciones de abastecimiento de combustible. Sin embargo el tratamiento de estas restricciones puede ser complementado sin ningún inconveniente en la modelación matemática. Ver Wood y Wollenberg [10].

2.2. Relajación Lagrangeana

El problema definido por la función objetivo (1) sujeta a las restricciones (2) a (6) es un problema de optimización combinatoria formulado como programación mixta. Llamemos a este problema Z.

Asumimos que las restricciones del problema considerado pueden ser particionadas en dos conjuntos: un conjunto formado por las restricciones (2), (3), (4) y (5) y el otro formado por las restricciones (6).

Adjuntemos las restricciones (6) a la función objetivo:

$$\begin{aligned} \min \sum_t \sum_j (c_j u_{jt} + s_j v_{jt} + \bar{b}_j \bar{P}_j P_{jt}) \\ + \sum_j \{ \pi_j^1 [x_{j1} - \sum_{t=1}^{t_j} (\bar{b}_j \underline{P}_j w_{jt} + \bar{b}_j \bar{P}_j P_{jt})] \\ + \pi_j^2 [x_{jt} - \sum_{t=1}^T (\bar{b}_j \underline{P}_j w_{jt} + \bar{b}_j \bar{P}_j P_{jt})] \} \end{aligned} \quad (7)$$

El problema definido por la función objetivo (7) sujeta a las restricciones (2) a (5) es un problema de asignación de unidades y es más fácil de resolver que el problema original. Llamemos a este problema Z_π

Se tiene que resolver entonces como encontrar los multiplicadores π_j^1 y π_j^2 . Para esto se emplea optimización no diferenciable usando subgradientes. El algoritmo empleado es el sugerido en Kalvelagen [4].

Paso Inicial

Resolver el problema Z relajando las variables enteras, sea el valor optimo Z^*

Definir los multiplicadores π_j^1 y π_j^2

Sea $\theta_0 = 2$

Paso Principal

for k = 0, 1, ... do

Resolver el problema Z_π

$$\gamma_j^k = [x_{j1} - \sum_{t=1}^{t_j} (\bar{b}_j \underline{P}_j w_{jt} + \bar{b}_j \bar{P}_j P_{jt})]$$

$$t_k = \frac{\theta_k (Z^* - Z_\pi)}{\|\gamma_j^k\|}$$

$$\pi^{k+1} = \pi^k + t_k \gamma^k$$

if $\|\pi^{k+1} - \pi^k\| < \epsilon$ then

stop
end if

if no hay mas progreso en mas de K iteraciones then

$$\theta^{k+1} = \frac{\theta^k}{2}$$

else
 $\theta^{k+1} = \theta^k$

end if
 $k = k + 1$
end for

3. RESULTADOS

Con el propósito de probar el modelo se utilizó el ejemplo de Wood y Wollenberg [10], los datos de este ejemplo se presentan en la Tabla 1. El periodo de estudio consiste de cuatro periodos. Se considera que el combustible llega en todos los casos en el primer periodo y que cada unidad tiene un tanque de almacenamiento. Esta última consideración no hace perder la generalidad al modelo pues este puede incluir casos en que un tanque sea compartido por varias unidades de generación, esto se puede incluir fácilmente en las restricciones (6).

4. CONCLUSIONES

Se presentó una modelación del problema de asignación de unidades aplicable a la cadena de abastecimiento de combustible ecuatoriano en el cual se considera restricciones en abastecimiento de combustible. La metodología utilizada se aplicó a un ejemplo y los resultados fueron adecuados.

El despacho de las unidades es altamente sensible a las restricciones de abastecimiento. El costo del despacho sin embargo se mantienen en valores similares con pequeñas desviaciones, así mismo

Tabla 1: Características de las Unidades de Generación.

UNIDAD	MAX (Mw)	MIN (Mw)	COSTO PRENDIDO (R)	COSTO APAGADO (R)	COSTO OPERACIÓN (R/Mwh)	COSTO COMBUSTIBLE (R/Mbtu)	RAZON INCREMENTAL CALOR (MBtu/MWh)	PERIODO LLEGADA COMBUSTIBLE
1	55	25	350	0	17,46	2	10,44	1
2	190	60	400	0	18	2	9	1
3	225	75	1100	0	20,88	2	8,73	1
4	60	0	0,02	0	23,8	2	11,9	1

Los resultados de los Casos considerados en las pruebas constan en la Tabla 2. El Caso 1 considera que no hay limitación de combustible en ninguna de las unidades de generación. En el Caso 2 se disminuye el combustible en la unidad 1 con mayor despacho a la mitad de lo considerado en el Caso 1, el Caso 3 en cambio disminuye el inventario de combustible en la unidad con mayor capacidad a la mitad de lo considerado en el caso 1.

sucede con el consumo calórico, lo que nos permite inferir que estos dos valores dependen de la característica de la demanda eléctrica que en los tres casos no cambio.

Tabla 2: Resumen de los resultados

CASO	Mw TOTAL	Mbtu TOTAL	R TOTAL	NO ITERACIONES
1	2120	19324	42141	3
2	2120	18306	40716	10
3	2120	19559	42197	14

Estos resultados deberán ser tomados en cuenta para que la asignación de unidades en el sistema eléctrico ecuatoriano en el futuro considere las restricciones de abastecimiento de combustible. Esta condición es facilitada con el monitoriamiento que en tiempo real se hará de los inventarios de los tanques de almacenamiento de las unidades termoeléctricas por el sistema de tiempo real del CENACE.

En la Tabla 3 se presenta el desempeño del algoritmo para el Caso 3

La metodología de Relajación Lagrangeana no garantiza una solución óptima en todos los casos sino un valor que es un límite inferior de la solución optima, en todo caso las soluciones obtenidas garantizan casi siempre una solución factible.

Tabla 3: Convergencia del Algoritmo

ITERACION	OBJETIVO DUAL	THETA	NORMA	CONVERGENCIA
1	1279,023	2	2884940,89	0,021
2	-95663,193	2	29530800	0,009
3	-2035,454	1	4070645,44	0,021
5	25365,283	1	4821120,64	0,001
10	31380,122	1	2445341,64	3,1002E-08
14	31380,198	1	2445341,64	4,89454E-12

Como se manifestó en la Introducción se debe investigar el primer nivel de la Planificación Jerárquica sugerida, este problema tendría como objetivo definir políticas óptimas para manejo de niveles de inventario y transferencia de combustible en Petrocomercial que dependan de la aleatoriedad de la hidrología del país reflejada en la planificación energética del CENACE.

Así mismo se debería investigar la obtención de soluciones óptimas para el problema planteado, utilizando metodologías de corte y acotación.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] K. Aoki, T. Satoh, M. Itoh; Unit Commitment in a Large Scale Power System Including Fuel Constrained Thermal and Pump Storage Hydro; IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems; Vol. PWRS-2; 1987.
- [2] A. I. Cohen, S. H. Wan; A Method for solving the Fuel Constrained Unit Commitment Problem, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems; Vol. PWRS-2, No. 3; 1987.
- [3] M. Fisher; The Lagrangian Relaxation Method for Solving Integer Programming Problems; Management Science; Vol. 27, No. 1; 1981.
- [4] E. Kalvelagen; Lagrangian Relaxation with GAMS; 2002.
- [5] A. B. Kumar et al; Fuel Resource Scheduling, Part III, The Short Term Problem; IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems; Vol. PAS-103, No. 7; 1984.
- [6] J. Muckstadt, S. Koenig; Application of Lagrangian Relaxation to Scheduling in Power-Generation Systems; Operations Research, Vol. 25, No. 3; 1977.
- [7] F. N. Lee; A Fuel Constrained Unit Commitment . A New Method; IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems; Vol. PWRS-4; 1989.
- [8] G. E. Seymore; Long Term, Mid Term and Short Term Fuel Scheduling; EPRI Report #EL1319;1980.
- [9] S. Vemuri, L. Lemodis; Fuel Constrained Unit Commitment; IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems; Vol. 7, No. 1; 1992.
- [10] A. J. Wood, B. F. Wollenberg; Power Generation Operation & Control; John Wiley, New York; 1984



Galo Nina Suquilanda.-

Ingeniero Eléctrico por la ESPOL, M. Sc. en Ingeniería de Sistemas (Optimización) por la COPPE/UFRJ Brasil; y, D. Ing. en Ingeniería Económica por FHTE Esslingen Alemania.

Desde 1981 hasta 1988

y desde 1994 hasta 1995, trabajó en INECEL en Planificación de la Operación y Control de Gestión, en la Dirección de Operaciones del SNI.

Desde 1999 se desempeña como Jefe de Análisis y Control en la Corporación Centro Nacional de Control de Energía - CENACE.