



ESTRATEGIAS PARA LA MODELACION Y CONTROL DE LA CONTAMINACION AMBIENTAL PRODUCIDA POR LA GENERACION DEL SEN.

Miriam López Pérez
Manuel Barroso Baeza

RESUMEN

En este trabajo se analiza el comportamiento de la generación, el uso de combustibles y la magnitud anual de los contaminantes debido a la generación térmica en Cuba.

Son valoradas diferentes estrategias de Despacho Económico, con criterios ambientales de reducción y control de las emisiones de Dióxido de azufre al medio ambiente; dado el empleo actual e incremento esperado del consumo de combustibles con altos contenidos de azufre. Entre las estrategias consideradas, resulta atractiva aquella que conlleva a la menor desviación del costo mínimo total de generación; posibilitando asimismo un cierto beneficio ambiental; lo cual es válido para economías tercermundistas como la nuestra.

Se analizan y recomiendan medidas preliminares que permitan el cumplimiento de la Norma Cubana de Calidad del Aire. La mayor contribución de este trabajo radica en la proposición de tales estrategias nacionales.

Palabras claves: Despacho de Emisiones, Despacho Económico.

SUMMARY

This paper analyzes the generation behavior, fuel uses and pollution year cap due to thermal generation in Cuba. It considers several Economic Dispatch Strategies taking into account some grades the SO₂ emissions reduction and control due to expected increases of the amount of sulfur present in the fuel. It attractive some one that involves the minimum generation cost least deviation considering besides certain clean or benefices environmental. The improvement present in this paper results adequate for third world economies such as our.

It analyzes and recommended preliminaries actions in order to will be possible the compliment of the Air Clean Cuban Standard.

The national strategies proposition is the best improvements of this paper.

Key words: Emissions Dispatch, Economic Dispatch.

INTRODUCCION

Tradicionalmente los sistemas eléctricos de potencia eran operados siguiendo estrategias de Despacho Económico y de Asignación de Unidades, de manera tal que el costo total de operación fuera minimizado, atendiendo a las restricciones impuestas por las plantas generadoras, y la red, garantizando la seguridad del sistema.

A partir de los años 90, los países industrializados han tomado serias medidas con el propósito de detener el deterioro del medio ambiente producido por la generación de energía eléctrica, a partir de combustibles fósiles. Los países tercermundistas en este sentido, han de contribuir también a dicho propósito; cumpliendo así con las concepciones del denominado desarrollo sostenible, sólo que el precio a dicha contribución lógicamente ha de ser menor. La literatura recoge múltiples trabajos acerca de la temática que aportan diversas alternativas de solución a tal problemática; las cuales aunque propias para economías desarrolladas han servido de base para evaluar estrategias ajustadas a nuestras condiciones, posibilidades reales y economías.

Las alternativas para la disminución de las emisiones mediante el empleo de dispositivos de limpieza post-combustión (Talaq, 1994), resultan aún inalcanzables para nuestras condiciones económicas. Aquellas que tratan el problema mediante estrategias operacionales resultan más convenientes en nuestro caso.

Es propósito de este trabajo el análisis y valoración de diversas estrategias de Despacho Económico, que posibiliten el control de las emisiones producidas por la generación térmica del Sistema Eléctrico Cubano; atendiendo a nuestras particularidades propias, siendo la más notable el empleo de combustibles fósiles con un elevado contenido de azufre.

SITUACION ACTUAL NACIONAL REFERIDA A LA TEMÁTICA

El Sistema Eléctrico Nacional presenta una estructura longitudinal. La demanda de energía eléctrica diaria oscila alrededor de 1900 MW, la cual es suplida en más de un 95 % por la generación térmica a partir de combustibles fósiles. Los combustibles que actualmente se emplean en la generación térmica en Cuba presentan un alto de contenido de azufre. Dado por la utilización del crudo nacional, como solución alternativa para satisfacer la demanda ante los altos precios del combustible en el mercado internacional

Actualmente se emplea cerca de un millón de toneladas al año de crudo nacional en esta industria. A pesar de que la generación en el año 1998 decreció con respecto al año anterior, por la adopción de medidas nacionales tendientes a la reducción del consumo, el incremento en el uso de este combustible crudo, de alta disponibilidad nacional, con elevado porcentaje de azufre, a partir de ese mismo año 1998, según se ilustra en la figura 1, ha devenido en un aumento de las emisiones contaminantes de SO₂ al medio, figura 2.

Puede notarse que las figuras 1 y 2 son correlativas. Es de destacar que en los próximos 3-4 años se espera generar más del 60% de la energía demandada a partir del consumo de combustible crudo nacional. Aunque el volumen total de emisiones es aún relativamente bajo comparado con otros países, la relación toneladas de emisión por MW generado es alta; precisamente debido a la utilización de combustibles con altos contenidos de azufre. Es por ello que la reducción y el control de estas emisiones de SO₂ al medio ambiente ha sido el propósito de este trabajo, para lo cual serán consideradas diversas estrategias

MODELACION DE EMISIONES DE SO₂

Dado que en esta etapa inicial de análisis no se dispone de dispositivos de medición del flujo de emisiones contaminantes en las chimeneas de las Centrales Termoeléctricas existentes; es preciso modelar las emisiones de SO₂, sobre la base del consumo de combustible; como una función de la potencia de salida de la unidad ; afectada por un coeficiente que depende del porcentaje de azufre del combustible; el porcentaje de azufre que se convierte en SO₂, con relación al devenido en cenizas; la razón del peso molecular del SO₂ y el azufre. (Lamont, 1995). Tal modelación, aunque no es lo suficientemente exacta como para sustituir el valor de mediciones cada ciertos intervalos de tiempo; resulta de gran utilidad ; para el caso del contaminante en cuestión, SO₂, y la naturaleza del problema que se trata. Ello es equivalente a plantear, para cada unidad del sistema:

$$ESO_{2i} = K SO_{2i} * F(P_i) \quad (1)$$

La Nomenclatura general a emplear aparece al final del Trabajo.

Dado que las características de consumo entrega de las unidades del sistema han sido linealizadas en uno o varios segmentos, la emisión resultante de un grupo térmico puede ser determinada, mediante la superposición de los aportes o efectos individuales de cada unidad del grupo y se expresa:

$$GESO_{2j} = \sum_{i=1}^{NT} EO_{2i} \quad (2)$$

Quedando así cuantificada la emisión de SO₂ por grupos térmicos.

ESTRATEGIAS DE DESPACHO.

Con el propósito de la reducción y control de las emisiones contaminantes de SO₂; serán consideradas a partir de un caso Base, de Mínimo Costo Total de generación , las Estrategias de Despacho Económico con criterios ambientales siguientes:

1. Mínimo Costo Total de Generación ; con restricciones de SO₂ por grupos térmicos.

Establecer límites de emisión de SO₂ a cada unidad o grupo con el propósito de la reducción local de este contaminante es el objetivo fundamental de esta estrategia, lográndose con ello una utilización racional de las

disponibilidades de generación y combustible en el sistema. El problema planteado resulta:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \sum F(P_i) P_i \\ \text{sa:} \quad & P_i^{\text{MIN}} \leq P_i \leq P_i^{\text{MAX}} \\ & T_i(P_i) \leq T_i^{\text{MAX}} \\ & GESO_{2j} \leq GESO_{2j}^{\text{MAX}} \\ & \sum P_i = P_D + P_E \end{aligned} \quad (3)$$

La Norma cubana de Calidad del Aire establece las concentraciones máximas permisibles por contaminantes ; especificándose para el SO₂ una concentración máxima instantánea de 0,5 mg/ m³ . Atendiendo a esta regulación fueron determinados los flujos máximos de emisiones contaminantes permisibles a la salida de las chimeneas de grupos térmicos del sistema, pues las citadas emisiones máximas admisibles están en dependencia de las dimensiones de sus chimeneas, las velocidades y temperaturas de los gases, entre otros, que consideran las condiciones climatológicas más adversas, en tanto se trata del establecimiento de magnitudes límites.

Dada la diversidad tecnológica de las centrales termoeléctricas existentes, estos límites difieren considerablemente para cada grupo térmico .Existen grupos para los cuales resulta imposible su cumplimiento; aún empleando fuel oil bajo en azufre (2.34%); y operando a su potencia mínima, tal como se muestra en la Tabla 1; lo cual se debe a deficiencias constructivas , como es el caso de las unidades de 50 MW de la planta Máximo Gómez, MG, cuya chimenea tiene una altura de 47 metros , con diámetro de 5.07 metros. Es notable señalar que en el entorno de esta CTE, la población aledaña posee elevados índices de asmáticos y con padecimientos respiratorios.

El modelo planteado garantizaría el cumplimiento de los límites establecidos por la Norma cubana de Calidad del Aire, solucionando los problemas locales referidos, siempre y cuando exista disponibilidad de generación suficiente en el sistema, que permita prescindir de las unidades que violan los límites. En tal sentido, se recomienda en primera instancia la elevación de las chimeneas de los grupos en cuestión ; tal que se cumplan los límites determinados para las emisiones contaminantes de SO₂, según la norma cubana.

2. Mínimo Costo, con cambio de combustible .

Esta Estrategia se propone minimizar el costo total, cambiando el combustible de los grupos térmicos que violan los límites determinados por la norma establecida. .Esta

alternativa no resolverá totalmente el problema de su cumplimiento, a menos que se empleen para cada caso los combustibles con las cantidades en por ciento de azufre requeridos .

3. Reducir el nivel de emisiones, con la menor desviación del mínimo costo de generación.

Se propone obtener un esquema de generación con un valor de costo asociado con la mínima desviación posible del caso base y tienda a disminuir en cierta magnitud , no prefijada las emisiones de SO_2 . El incremento del costo al cual se incurre, representa el mínimo posible, y constituye de hecho una contribución al mejoramiento del medio ambiente, válida para economías tercermundistas como la nuestra. El problema así considerado es resuelto mediante el siguiente modelo incremental :

$$\begin{aligned} \text{Mín} \quad & \dot{a} F(P_i) DP_i + \dot{a} a_i ESO_2(DP_i) \\ \text{sa:} \quad & DP_i^{\text{MIN}} \leq DP_i \leq DP_i^{\text{MAX}} \\ & DT(DP_i) \leq DT_i^{\text{MAX}} \\ & \dot{a} DP_i = 0^* \end{aligned} \quad (4)$$

* La variación de las pérdidas puede ser considerada incluyendo en esta restricción los factores incrementales de pérdidas y el correspondiente factor de penalización en la función objetivo.

La menor desviación posible del punto de operación para el cual ha sido obtenido el mínimo costo; garantizará la menor desviación del costo total de generación ; a_i representa el costo incremental de emisión por unidad generadora , y es obtenido, tal que su influencia en el costo total sea mínima ,en relación con el incremento del costo que ocasionaría limitar la emisión de la unidad. Ello se logra como resultado de igualar a cero la derivada parcial del incremento del costo total con respecto a la variación correspondiente de la potencia neta generada, para cada unidad del sistema. En tanto se establece una relación lineal entre el consumo y la potencia de salida por unidad, como también lo es la correspondiente entre la emisión de SO_2 de cada unidad y su consumo de combustible ; el valor de a_i para cada unidad, resulta una constante que depende del precio del combustible empleado y el contenido de azufre del propio combustible .

Los resultados de este modelo permiten desviaciones de la generación por unidad en dependencia del nivel de

reserva; existiendo un compromiso entre la eficiencia de las mismas, el precio y el % de azufre del combustible empleado en cada una de ellas, así como el cumplimiento de las restricciones de operación impuestas; alcanzándose con ello un punto de operación cuya ubicación relativa en cuanto a la reducción global de emisiones, se encuentra entre el obtenido para el caso de mínimo costo y el que correspondería al caso de mínimas emisiones; más próximo al primer extremo , garantizándose con ello la disminución de las emisiones obtenidas en el caso base.

ANALISIS DE RESULTADOS

La evaluación de las Estrategias de Despacho analizadas en el cubrimiento de la demanda en un período de 24 horas, para un día típico laborable, en las condiciones actuales del Sistema Eléctrico Nacional, ofrece los resultados que aparecen sintetizados en la Tabla 2.

Es de destacar al respecto, que la Estrategia 1, la cual garantiza el cumplimiento de los límites determinados según la Norma Cubana de calidad del aire , y de esta manera la reducción local de las emisiones de SO_2 ; en las condiciones actuales , conllevaría a prescindir de las unidades generadoras para las cuales no es posible cumplir con tales regulaciones; ver Tabla 1, siendo incluidas entonces unidades menos eficientes; lo cual implica un aumento desmedido del Costo total; aún superior al correspondiente a Mínimas emisiones : Estrategia 4, como resultado del cambio efectuado en el cuadro de generación. Puede notarse además que a pesar de que el incremento en el costo de la Estrategia 1 es el más elevado, no posibilita la mayor reducción del contaminante analizado.

Para la Estrategia 2, fue empleado un combustible con 2,34 % de Azufre, en lugar de crudo; para los grupos referidos. Esta variante, aunque más económica que la anterior no ofrece mayores ventajas que la 3; la cual presenta el menor incremento del costo. La Estrategia 4, para la cual se obtiene la mayor reducción posible de las emisiones de SO_2 , atendiendo a las condiciones de operación impuestas por las plantas y la red; tal como era de esperarse , resulta prohibitiva pues su implantación diaria en la planificación de la generación, conduciría a un incremento del costo anual estimado , por concepto de reducción del SO_2 emitido, de 22 millones USD/año.

CONCLUSIONES

- Es de destacar que a pesar de que el nivel de demanda del sistema es relativamente bajo, comparado con otros países, el consumo de combustible con altos contenidos de azufre, es equivalente a una demanda varias veces superior desde el punto de vista de las emisiones de SO₂ al ambiente.
- De las Estrategias con criterios ambientales consideradas, la No. 3 resulta más conveniente para las condiciones actuales de nuestro Sistema Eléctrico y economía; en tanto permite un cierto nivel de reducción de las emisiones contaminantes de SO₂, con el menor incremento del costo total de generación. Aunque no asegura el control local de las emisiones, el empeoramiento de las condiciones ambientales en zonas cercanas a centrales termoeléctricas, se debe esencialmente a deficiencias constructivas de diseño, las cuales pueden ser resueltas, tal que se cumpla la Norma cubana de Calidad del Aire.
- Con vistas a los próximos 3-5 años para los cuales se espera un incremento en el consumo de combustible crudo nacional se recomienda la aplicación de Estrategias de Mínimo Costo, con restricción del límite global igual al promedio de emisiones por hora correspondiente a períodos anteriores. Garantizaría que las emisiones no se incrementen debido al crecimiento de la carga en el sistema y/o el empleo de mayor cantidad de crudo nacional en la generación.

NOMENCLATURA

ESO_{2 i} : Emisión de SO₂, correspondiente a la unidad i; en Ton.

KSO_{2 i} : Constante cuya dependencia fue ya definida.

F(P_i) : Consumo de combustible en función de la potencia de salida de la unidad i; dado en Ton.

GESO_{2 j} : Emisión de SO₂, correspondiente al grupo térmico j, expresada en Ton.

N_{NT} : Número total de unidades generadoras i, pertenecen al grupo j.

D: Representa desviación con respecto al caso base.

MIN, MAX: Denotan los valores mínimos y máximos.

P_i : Potencia activa neta generada por la unidad i, en MW.

P_D: Demanda de potencia activa, dada en MW.

P_E : Pérdidas de potencia activa totales en líneas del sistema, MW.

T_i : Transferencias de potencia activa en líneas controladas del sistema, expresada en MW.

a_i : Factor que determina el incremento del costo con respecto al caso base.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Andrews C. J. A Simple Model for Assessing Emissions Reductions Options. IEEE Trans on P. S., Vol 8, No 4, November 1993.
- 2.. El Keib A. A., Ma H., Hart J. L. Environmentally Constrained Economic Dispatch using the Lagrangian Relaxation Method. IEEE Trans. on P. S. No. 4, November 1994.
3. Hobbs Benjamin F. Emission Dispatch under utilization provision of the 1990 U. S. Clean Air Act Amendments: Models and Analysis. IEEE Trans on P. S., Vol 8, No1, Feb 1992.
4. Lamont J. W., Obessis E. V. Emission Dispatch and Algorithms for the 1990's. IEEE Trans. on P. S., Vol 10, No. 2, May 1995.
- 5.. Ramanathan R. Emission Constrained Economic Dispatch. IEEE Trans on P. S., Vol 9, No 4, Nov 1994.
6. Rudnick Hugh, Varela Ruy, Hogan William. Evaluation of Alternatives for Power System Coordination and pooling in a Competitive Environment. IEEE Trans on P. S., Vol 12, No 2, May 1997.
7. Spens William Y., Lee Fred N. Interactive Search Approach to Emission Constrained Dispatch. IEEE Trans on P. S., Vol 12, No.2, May 1997.
8. Talaq J. H. A Summary of Environmental / Economic Dispatch Algorithms. IEEE Trans. on P.S., Vol 9, No 3, August 1994.
9. Talaq J.H. Minimum Emission Power Flow. IEEE Trans on P. S., Vol 9, No1, 1994.
10. Vickers Victoria L., Hobbs Walter J., Vemuri S. E, Todd D. Fuel Resource Scheduling with Emission Constraints. IEEE Trans on P. S., Vol 9, No. 3, August 1994.

ANEXOS

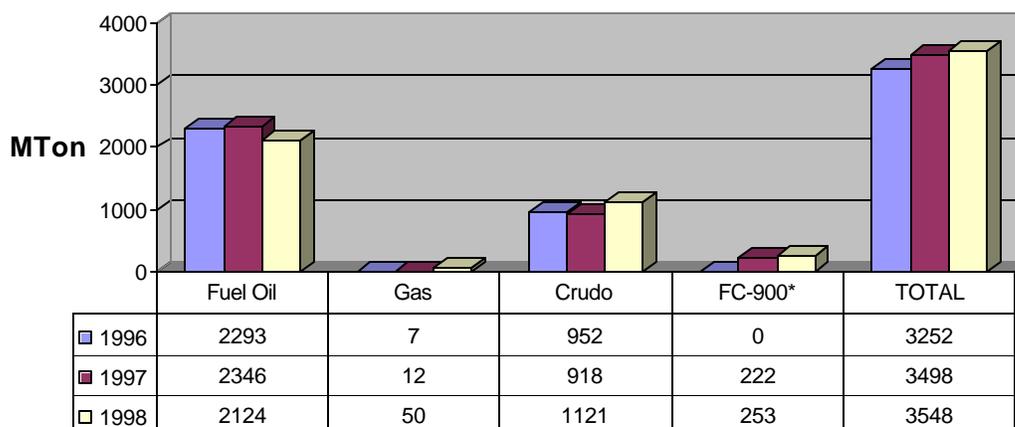


Figura 1. Consumo de combustibles en la generación térmica durante el período 1996-1998.
*FC-900 : Corresponde a una mezcla 50% crudo, 50% fuel .

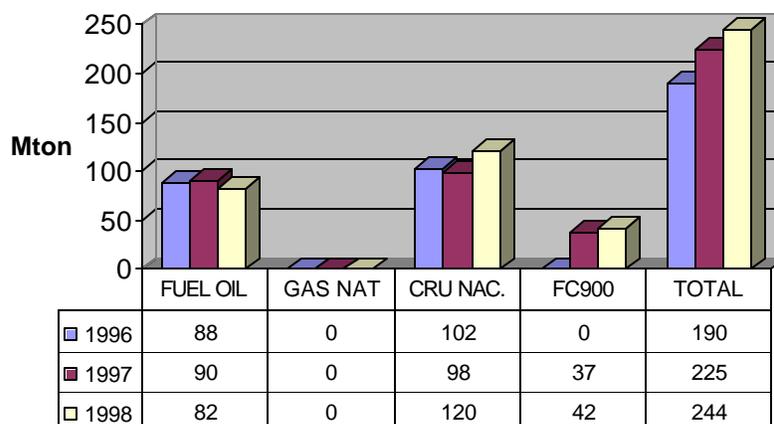


Fig.2 Emisiones estimadas por tipo de combustible durante el período 1996-1998.

Tabla 1. Grupos Térmicos con problemas de diseño , que impiden el cumplimiento de límites de emisión, según N.C. de Calidad del Aire .

Unidades del Grupo Térmico	Pmin (MW)	Pmax (MW)	Emisión Lím. (Ton/h)	Máx. Azufre (%)	GESO2 con 2.34%* (Ton/h)	GESO2 con 6.68%** (Ton/h)
4x 50 MW de MG	4x 25	4 x 50	0.82	1.59	1,20	3,44
4x100 MW de MG	4x 40	4x 100	2.59	3.79	1,60	4,53
3x 50 MW de AM	3x 25	3x 50	1.99	5,43	0,85	2,44

*Emisión estimada para unidades operando a su capacidad mínima y con fuel oil ligero ; contenido de azufre de 2.34 %.

**Idem para cuando operen con crudo nacional; contenido de azufre de 6.68 %.

Máx. Azufre (%) Contenido máximo de azufre del combustible en % , tal que se cumpla el límite determinado, operando a Pmin.

Tabla 2. Resumen de los resultados obtenidos con la aplicación de las Estrategias planteadas.

	Estrategia	Costo TOTAL (\$)	Costo TOTAL (%)	SO2 (ton)	SO2 (%)
Caso Base	Min COSTO	976 318 , 2	100,0	685,8	100,0
1	Min COSTO R SO2	1 089 999, 1	111,6	578,2	84,3
2	Min COSTO Cambio fuel	1 008 891, 0	103,3	624,0	91,1
3	Min Desviación Min. Costo	1 001 447, 5	102,5	648,5	94,5
4	Min SO2	1 068 914 ,8	109,4	554,8	80,9

Autores:

Ing . Miriam López Pérez, Investigadora Agregada
 CIPEL.ISPJAE.
 E-mail: mlopez@cipel.ispjae.edu.cu

Dr. Ing. Manuel Barroso Baeza, Investigador Auxiliar.
 CIPEL.ISPJAE.
 E-mail: mbarroso@cipel.ispjae.edu.cu