



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE

ESCUELA DE INGENIERÍA

Departamento de Ingeniería Eléctrica

DESPACHO ECONÓMICO AMBIENTAL EN SISTEMAS ELÉCTRICOS

LESLIE BÁRBARA SEPÚLVEDA VERGARA

Memoria para optar al título de
Ingeniería Civil de Industrias
Mención Electricidad

Profesor Supervisor
Hugh Rudnick V. D. W.

Santiago de Chile, 1998



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE

ESCUELA DE INGENIERÍA

Departamento de Ingeniería Eléctrica

DESPACHO ECONÓMICO AMBIENTAL EN SISTEMAS ELÉCTRICOS

LESLIE BÁRBARA SEPÚLVEDA VERGARA

Memoria preparada bajo la supervisión
De la comisión integrada por los profesores

Hugh Rudnick V. D. W.

Luis Cifuentes L.

Juan Dixon

Santiago de Chile, 1998

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi gratitud a todas las personas que hicieron posible el desarrollo de este trabajo, especialmente a mi profesor guía Don Hugh Rudnick V. D. W. por su ayuda y a mi familia, que me ha apoyado en todas las cosas que he emprendido en mi vida.

Además, deseo manifestar mis agradecimientos a Juan Marcos Donoso, por su tiempo y disposición para atender mis dudas y problemas.

Agradecimientos a Endesa a través de su Unidad de Investigación y Desarrollo en la Universidad Católica de Chile.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
RESUMEN	ix
I INTRODUCCIÓN	1
1.1 GENERALIDADES	1
1.2 CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS	2
<i>1.2.1 Monóxido de Carbono: CO</i>	4
<i>1.2.2 Material Particulado Respirable: PM10</i>	4
<i>1.2.3 Dióxido de Azufre : SO₂</i>	5
<i>1.2.4 Dióxido de Nitrógeno : NO₂</i>	6
<i>1.2.5 Oxidantes Fotoquímicos</i>	7
1.3 TECNOLOGÍAS DE CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN	7
1.4 REGLAMENTACIÓN VIGENTE EN CHILE	11
<i>1.4.1 Ley de Bases del Medio Ambiente</i>	12
<i>1.4.2 Normas Chilenas de Calidad del Aire</i>	13
1.4.2.1 Resolución N° 369/1988	13
1.4.2.2 Resolución N°1215/1978	15
1.4.2.3 Decreto Supremo N°32/1990	16
1.4.2.4 Otras Reglamentaciones Vigentes	16
1.5 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	17
<i>1.5.1 Solución del predespacho en sistemas puramente térmicos</i>	18
<i>1.5.2 Despacho económico ambiental de sistemas puramente térmicos</i>	19
<i>1.5.3 Consecuencias de Restricciones Ambientales en Empresas Eléctricas</i>	23

1.6 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA	24
II DESPACHO ECONOMICO AMBIENTAL EN SISTEMAS TÉRMICOS	26
2.1 DESPACHO ECONÓMICO	26
2.1.1 <i>Función Objetivo en Sistema Térmico</i>	26
2.1.2 <i>Restricciones</i>	27
2.2 DESPACHO ECONÓMICO AMBIENTAL	28
2.3 MÉTODO PROPUESTO	29
2.3.1 <i>Algoritmo de solución</i>	30
2.3.2 <i>Descripción de Sistemas de Prueba</i>	34
2.3.2.1 Sistema de tres unidades.....	34
2.3.2.2 Sistema de 17 unidades	35
2.4 APLICACIÓN A SISTEMAS DE PRUEBA.....	36
2.4.1 <i>Sistema de tres unidades</i>	37
2.4.2 <i>Sistema de 17 unidades</i>	44
2.4.3 <i>Análisis, conclusiones y trabajo futuro</i>	53
III PROGRAMACIÓN HIDROTÉRMICA EN EL SISTEMA	
INTERCONECTADO CENTRAL CONSIDERANDO COSTOS	
AMBIENTALES	56
3.1 ANTECEDENTES GENERALES DEL CDEC-SIC	56
3.2 MODELO GOL.....	58
3.2.1 <i>Cálculo de precios de nudo</i>	61
3.3 INTRODUCCIÓN DE COSTOS DE CONTROL DE EMISIONES EN GOL.....	61
3.3.1 <i>Características del Parque Generador a Modelar</i>	63
3.3.1.1 Previsión de demandas	63
3.3.1.2 Programa de Obras en el SIC	64
3.3.1.3 Costos variables de operación	65
3.3.2 <i>Archivos de datos</i>	67
3.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS	69

IV CONCLUSIONES.....	87
V BIBLIOGRAFIA	92
ANEXOS	96
ANEXO 1: CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA.....	97
ANEXO 2: PROGRAMA DE OBRAS MODIFICADO.....	113
ANEXO 3: COSTOS MARGINALES ENTREGADOS POR MODELO GOL.....	114

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N°1.1. Índices ICA e ICAP	14
Tabla N°1.2. Calificación de índices de calidad del aire	14
Tabla N°1.3. Normas de calidad del aire	15
Tabla N°2.1. Parámetros de unidades en sistema de tres unidades.....	34
Tabla N°2.2. Límites de generación en sistema de tres unidades.....	35
Tabla N°2.3. Parámetros de unidades en sistema de 17 unidades.....	35
Tabla N°2.4. Límites de generación en sistema de 17 unidades	36
Tabla N°2.5. Despacho económico en sistema de tres unidades ($w_c=1$).....	37
Tabla N°2.6. Despacho ambiental en sistema de tres unidades ($w_s=1$).....	37
Tabla N°2.7. Despacho económico ambiental en sistema de tres unidades.....	38
Tabla N°2.8. Comparación de emisiones y costos en sistema de tres unidades.....	38
Tabla N°2.9. Despacho económico en sistema de 17 unidades ($w_c=1$).....	45
Tabla N°2.10. Despacho ambiental en sistema de 17 unidades ($w_s=1$).	46
Tabla N°2.11. Despacho económico ambiental en sistema de 17 unidades.....	47
Tabla N°2.12. Comparación de emisiones y costos en sistema de 17 unidades.....	48
Tabla N°3.1. Costos variables de operación de equipos de control de SO ₂	62
Tabla N°3.2. Previsión de consumos en el SIC.....	63
Tabla N°3.3. Factores de repartición trimestral.....	64
Tabla N°3.4. Programa de obras en el SIC.....	65
Tabla N°3.5. Costos variables de operación.....	66
Tabla N°3.6. Costo de falla.....	67
Tabla N°3.7. Centrales térmicas en el GOL.....	68
Tabla N°3.8. Descripción de casos analizados con el modelo GOL.....	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N°2.1. Diagrama de Flujo del Algoritmo desarrollado	31
Figura N°2.2. Diagrama de Flujo del Algoritmo de Iteración en λ	32
Figura N°2.3. Curva de equilibrio y tasa de disminución de emisiones.....	33
Figura N°2.4. Curva de equilibrio y tasa de disminución de emisiones (3 unidades, F _{carga} =0,42).....	40
Figura N°2.5. Curva de equilibrio y tasa de disminución de emisiones (3 unidades, F _{carga} =0,71).....	40
Figura N°2.6. Costos marginales sistema de tres unidades (F _{carga} =0,42)	41
Figura N°2.7. Costos marginales sistema de tres unidades (F _{carga} =0,71)	42
Figura N°2.8. Ingresos sistema de tres unidades (F _{carga} =0,42)	43
Figura N°2.9. Ingresos sistema de tres unidades (F _{carga} =0,71)	43
Figura N°2.10. Curva de equilibrio y tasa de disminución de emisiones (17 unidades, F _{carga} =0,41).....	49
Figura N°2.11. Curva de equilibrio y tasa de disminución de emisiones (17 unidades, F _{carga} =0,7).....	49
Figura N°2.12. Costos marginales sistema de 17 unidades (F _{carga} =0,41)	50
Figura N°2.13. Costos marginales sistema de 17 unidades (F _{carga} =0,7)	51
Figura N°2.14. Ingresos sistema de 17 unidades (F _{carga} =0,41)	52
Figura N°2.15. Ingresos sistema de 17 unidades (F _{carga} =0,7)	53
Figura N°3.1. Porcentajes generación térmica Programa de obras original	71
Figura N°3.2. Porcentajes generación térmica Programa de obras modificado	71
Figura N°3.3. Porcentajes respecto a caso base Programa de obras original	72
Figura N°3.4. Porcentajes respecto a caso base Programa de obras modificado.....	72
Figura N°3.5. Costos marginales por año hidrológico Programa de obras original	73
Figura N°3.6. Costos marginales por año hidrológico Programa de obras modificado ..	74
Figura N°3.7. Costos marginales trimestrales Programa de obras original	75

Figura N°3.8. Costos marginales trimestrales Programa de obras modificado	76
Figura N°3.9. Precios de nudo Programa de obras original.....	77
Figura N°3.10. Precios de nudo Programa de obras modificado.....	77
Figura N°3.11. Generación central a carbón Programa de obras original	78
Figura N°3.12. Generación central a carbón Programa de obras modificado	79
Figura N°3.13. Generación central a carbón Programa de obras original	79
Figura N°3.14. Generación central a carbón Programa de obras modificado	80
Figura N°3.15. Generación central a petróleo Programa de obras original.....	80
Figura N°3.16. Generación central a petróleo Programa de obras modificado	81
Figura N°3.17. Generación con otros combustibles Programa de obras original.....	81
Figura N°3.18. Generación con otros combustibles Programa de obras modificado	82
Figura N°3.19. Generación centrales de ciclo combinado Programa de obras original ..	82
Figura N°3.20. Generación centrales de ciclo combinado Programa de obras modificado	83
Figura N°3.21. Costos marginales respecto a caso base con programa de obras original	84
Figura N°3.22. Generación térmica respecto a caso base con programa de obras original	85

RESUMEN

Tradicionalmente, la planificación y operación de sistemas eléctricos se realiza de manera de minimizar los costos de generación, sin incluir en estos los costos sociales debido a la contaminación.

En este trabajo se estudia el de considerar estos costos en la generación eléctrica. Primero se investigan sus consecuencias en las personas y medio ambiente, las leyes vigentes en Chile, tecnologías de control de emisiones y el tratamiento que se le ha dado en la generación de electricidad en nuestro país y en el extranjero.

Se desarrolla un método de despacho económico con consideraciones ambientales para un sistema puramente térmico. Se utilizan dos sistemas de prueba para realizar estudios y se analizan los efectos de la consideración de las emisiones en los costos marginales y totales de operación del sistema.

Para evaluar los impactos de la contaminación ambiental en el principal sistema eléctrico chileno se utiliza el modelo Gestión Óptima del Laja, aplicable en el Sistema Interconectado Central. Se estudian cuatro casos en donde se varían los costos de control de emisiones y las centrales que se ven afectadas por estos costos.

Los resultados obtenidos se utilizan para comparar las generaciones por tipo de central, los costos marginales y los costos totales de generación del sistema.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

La contribución de la industria de la energía eléctrica a la contaminación ambiental despierta interrogantes acerca de la protección del medio ambiente y la búsqueda de métodos de eliminación o reducción de la contaminación producida por ésta, ya sea en el diseño de la industria o en sus estrategias de operación. Tradicionalmente, las centrales son operadas con el fin de obtener el menor costo económico sin considerar los niveles de emisiones producidos y, por lo tanto, sin tomar en cuenta los costos de la contaminación.

La generación a través de centrales termoeléctricas convencionales produce contaminación en tres formas: a) emisión de gases (dióxido de carbono (CO_2), dióxido de azufre (SO_2) y óxidos de nitrógeno (NO_x), entre otros), y partículas contaminantes que tienen un efecto ambiental global (efecto invernadero) y efectos locales como lluvia ácida, reducción de visibilidad, corrosión de instalaciones y bienes, y efectos en la salud de seres humanos y animales; b) vertimiento de aguas, que son utilizadas en el proceso de enfriamiento, por lo que se encuentran a altas temperaturas y con contaminantes; c) emisión de desechos sólidos, que pueden ser residuos de la combustión y del combustible utilizado.

Desde el punto de vista social, estos efectos deben considerarse como costos pues dañan la vida de una forma u otra. El daño causado por un contaminante depende de su tipo, condiciones meteorológicas y de la exposición de las personas a éste.

Un método para controlar la contaminación del aire que siempre se debería considerar es cambiar el método de operación de la planta, o sustituir los materiales no elaborados para eliminar o reducir la contaminación, por ejemplo, el uso de combustibles limpios como gas natural, combustible fósil con bajo contenido de azufre o

carbón gasificado, o mediante la modificación del proceso de combustión para producir menos CO o NO_x. Una opción diferente al cambio de combustible es la tentativa de purificar ese combustible para eliminar su constituyente precursor del contaminante, por ejemplo, con la instalación de equipos de control de emisiones para la reducción de la emisión de SO₂; el uso de equipos con combustión controlada para la reducción de la emisión de NO_x; la instalación de equipos precipitadores de partículas, equipos de tratamiento de aguas para desalinización y desmineralización, y torres de enfriamiento. La generación de CO₂ es intrínseca al funcionamiento de las plantas térmicas, por lo tanto, la única forma de reducirlo es aumentando al máximo la eficiencia de cada planta. En este sentido, la tecnología en las centrales de ciclo combinado, es adecuada para la disminución del CO₂. Plantas generadoras basadas en hidrógeno puro, eliminarían el CO₂ completamente.

La implementación de equipos para disminuir desechos implica costos de inversión y operación adicionales lo que hace indispensable un predespacho y despacho de unidades que considere las emisiones de éstas.

1.2 Contaminantes atmosféricos

Se mencionaron los principales contaminantes atmosféricos debido a la generación termoeléctrica. En este apartado se tratan más a fondo los efectos producidos según estudios realizados [24][33][11].

Se considera que existe contaminación atmosférica cuando el aire contiene impurezas en concentraciones dañinas para la salud del hombre o los animales, o es capaz de causar una pérdida de bienestar mediante la acumulación de polvo, suciedad, emanación de olores desagradables, disminución de rayos solares, etc.

Es necesario recordar que la contaminación atmosférica tiene consecuencias a escala ecológica global, implicando entre otros daños el referido al ambiente vegetal y

animal, incluso a la cultura. Es así como el fenómeno de la lluvia ácida producida por la emisión de dióxido de azufre a la atmósfera, por procesos industriales, es un problema que preocupa actualmente a importantes regiones del mundo, y afecta fundamentalmente a las aguas de lagos y ríos.

Para analizar la relación de la contaminación atmosférica con la salud del ser humano es necesario precisar lo que constituye su efecto adverso. Esto ha sido discutido en la literatura, pudiendo hacerse una larga lista de posibles efectos adversos, como los provocados sobre la salud humana. Produce cambios fisiológicos y patológicos médicamente significativos, generalmente evidenciados por uno o más de los siguientes puntos:

- a) Interferencia con la actividad normal de las personas afectadas
- b) Enfermedad respiratoria episódica
- c) Enfermedad incapacitante
- d) Daño respiratorio o permanente
- e) Disfunción respiratoria progresiva
- f) Muerte prematura

Para entender el impacto de la contaminación atmosférica sobre la salud hay que considerar tanto estudios epidemiológicos como médico-biológicos y de experimentación en laboratorio. También es necesario tomar en cuenta las variaciones individuales dentro de la población y ciertos subgrupos de ella que son más susceptibles.

A continuación se describen brevemente los distintos tipos de contaminantes atmosféricos.

1.2.1 Monóxido de Carbono: CO

El monóxido de carbono es producto de la combustión incompleta de compuestos carbonados y algunos procesos industriales y biológicos. Los principales aportes resultan de las emisiones vehiculares y al interior del hogar, de estufas, cocinas, humos del cigarrillo y calefont. Es un gas liviano, que en condiciones normales tiende a ascender rápidamente a capas altas de la atmósfera.

En el cuerpo humano, el CO se combina con la hemoglobina de la sangre formando carboxihemoglobina, siendo 200 a 300 veces más afín por la hemoglobina que el oxígeno, por lo que disminuye el transporte de oxígeno desde los pulmones a los tejidos. Esta disminución puede afectar el sistema cardiovascular, siendo especialmente peligrosa cuando hay alteraciones previas de la función miocardia. Existe evidencia además de que el CO puede favorecer la arteriosclerosis. Un efecto no cuantificable en la salud debido al CO son los cambios de conducta.

1.2.2 Material Particulado Respirable: PM10

El efecto de las partículas depende de su tamaño, es decir, de los que se denomina la fracción respirable que son menores que 10 [μm], destacando las partículas menores que 2 [μm], que son capaces de llegar hasta los alvéolos, de donde no pueden salir.

Las partículas afectan fundamentalmente al árbol respiratorio (efectos irritativos y broncoconstrictores) y mucosas (conjuntivas de los ojos).

En cuanto a su composición química, la fracción gruesa (2,5 - 10 [μm]) del material particulado respirable está compuesta en su mayoría por partículas de pH básico producto de combustión no controlada y de procesos de desintegración mecánica. Las

partículas de diámetro menor que 2,5 [μm] son, generalmente, ácidas e incluyen hollín y otros derivados de las emisiones vehiculares e industriales (la mayor parte de las emisiones de las fuentes industriales, domésticas y de transporte tienen distribuciones de tamaño de particulado menor de 2,5 [μm]). Otras sustancias que pueden estar presentes en las partículas son el plomo, arsénico, berilio, cadmio, mercurio, sulfatos, nitratos e hidrocarburos policiclos aromáticos.

1.2.3 Dióxido de Azufre: SO_2

Este contaminante es el resultado de la combustión del azufre contenido en los combustibles fósiles (petróleos combustibles, gasolinas, petróleo diesel, carbón, etc.), de la fundición de minerales que contienen azufre y de otros procesos industriales. Durante su proceso de oxidación en la atmósfera, este contaminante forma sulfatos, es decir, sales que pueden ser transportadas en el material particulado respirable (PM10) y que en presencia de humedad forman ácidos. Estos ácidos son una parte importante del material particulado secundario. Tanto la exposición a sulfatos como a los ácidos derivados del SO_2 , es de extremo riesgo para la salud debido a que ingresan directamente al sistema circulatorio humano a través de las vías respiratorias.

Es difícil caracterizar sus efectos sobre el organismo, ya que su acción podría potenciarse con humos, ozono, dióxido de nitrógeno, material particulado, polen y otros agentes broncoconstrictores. En todo caso se sabe que es un potente broncoconstrictor, tanto en personas sanas como en pacientes con asma, estos últimos mucho más sensibles. El ejercicio físico aumenta este efecto, ya que al aumentar la ventilación aumenta el SO_2 inhalado, siendo suficientes concentraciones aún de 0,25 a 0,5 ppm.

En materiales y en el ecosistema produce corrosión en metales y daños en árboles.

1.2.4 Dióxido de Nitrógeno: NO₂

Este compuesto es generado naturalmente por acción volcánica y bacteriana, y por tormentas eléctricas. Sus fuentes antropogénicas, residen principalmente en procesos de quema de combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas metano, etc.) a altas temperaturas. Es un importante precursor de la formación de ozono. Al interior del hogar, sus principales fuentes son las cocinas a gas, las estufas de parafina y los hornos.

El NO₂ es parcialmente responsable del tinte pardusco asociado a la contaminación atmosférica, aunque la mayor fuente de coloración y de disminución de la visibilidad es el material particulado. Es también un contaminante importante al interior de las viviendas donde se utilizan aparatos a gas. El NO₂ causa broncoconstricción inespecífica tanto en asmáticos como en sanos, y produce un aumento de las enfermedades respiratorias, bajos niveles de función pulmonar y aumento en la frecuencia de infecciones del tracto respiratorio inferior.

Otras consecuencias del NO₂ son la necrosis en hojas de algunas plantas, descoloramiento de tintas y corrosión de metales en ambientes húmedos.

1.2.5 Oxidantes Fotoquímicos

El Ozono (O_3) es el compuesto más representativo de los oxidantes fotoquímicos. Se forma por la oxidación de NO_x en presencia de la luz solar y compuestos orgánicos reactivos volátiles.

La toxicidad del ozono ocurre en un continuo, en el cual mayores concentraciones causan mayores efectos. Los síntomas que han sido reportados son: tos y dolor de cabeza, irritación de ojos, nariz y garganta, dolor de tórax, incremento de mucosidad, estertores, cierre de las vías respiratorias, languidez, malestar y náuseas, y aumento en la incidencia de ataques asmáticos.

El O_3 produce, además, deterioro en gomas sintéticas, daño a vegetación y alteraciones en rendimientos agrícolas.

1.3 Tecnologías de Control de la Contaminación

Los gases de desecho de la producción de electricidad a partir del carbón contienen partículas finas (ceniza volátil), óxidos de nitrógeno y dióxido de azufre. Las centrales que generan con petróleo también producen óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre y algunas partículas. Las partículas liberadas al quemar carbón se originan del material mineral no combustible del carbón; el petróleo contiene mucho menos material mineral y, por consiguiente, una emisión inferior de partículas significativa. El dióxido de azufre en ambos casos proviene en forma directa de la oxidación del azufre en el combustible (el carbón contiene de 0,5% a más de 5% de azufre y el petróleo de 0,5% a 4%). Un carbón con un 1% de azufre dará en combustión con 15% de aire en exceso, 0,06% de azufre en el gas efluente, mientras que un carbón con 4% de azufre producirá 0,25%. El petróleo combustible originará valores ligeramente inferiores respecto al

mismo porcentaje de azufre en el combustible. La respuesta obvia sería el concentrarse en combustibles de contenido de azufre bajo [3] [25][36][37][8][23][15].

En ausencia de tal materia prima de contenido de azufre bajo, las opciones son tratar el combustible antes de la combustión o bien remover el azufre más tarde. La primera posibilidad parece atractiva ya que la concentración de azufre es mucho más elevada en el combustible que en la emisión del gas. Sin embargo, la desulfurización de combustibles ha demostrado ser difícil y hasta la fecha se ha obtenido más éxito mediante el uso de técnicas de limpieza de gas.

Se han sugerido muchos procesos para la remoción de los óxidos de azufre que provienen de los gases de las chimeneas, los primeros en tener éxito implicaban la limpieza de los gases del conducto por fricción con agua.

En la actualidad, el interés mayor de Estados Unidos donde los estándares de emisión son los más estrictos, está puesto en la absorción de SO_2 en caliza húmeda (CaO) o pastas aguadas de piedra caliza (CaCO_3) que después, se desechan (tecnología denominada Flue Gas Desulphuration). Uno de los problemas principales de este método ha sido la eliminación del lodo del desecho que se produce (una mezcla de sulfatos, sulfitos y piedra caliza) el cual tiene las características pobres de sedimentación y que ha demostrado ser muy difícil de tratar. El proceso del óxido de magnesio evita el problema del desecho al regenerar las sales de magnesio tras la absorción del SO_2 , ya sea mediante la oxidación o la reducción del ahora SO_2 concentrado que se regeneró. Este proceso requiere varios pasos adicionales en relación con la absorción en piedra caliza para el proceso de desecho; no sólo hace que el SO_2 se tenga que tratar dos veces, sino que en las calderas encendidas por medio de carbón las partículas se deben remover antes de que se inicie el tratamiento del gas.

Otra posibilidad es la oxidación catalítica, pero su dificultad principal es que las concentraciones de dióxido de azufre son muy bajas (0,2% en comparación con 7% para plantas de conversión catalítica normales como las que se utilizan en la industria de metales no ferrosos). La catálisis requiere temperaturas elevadas, alrededor de 450 °C, y

los gases de la chimenea deben estar libres de partículas. Esto significa, la remoción de partículas a temperaturas elevadas más, donde sea necesario, recalentamiento del gas antes de su transferencia hacia el interior del lecho de catálisis. Ninguno de estos sistemas ha probado ser por completo satisfactorio para la remoción del SO_2 de las emisiones de una central generadora de energía eléctrica.

Los óxidos de nitrógeno se producen a partir de la oxidación del nitrógeno atmosférico a temperaturas elevadas en los hornos de las plantas generadoras y por medio de la combustión y la liberación de componentes de nitrogenados en el combustible. El control de los óxidos de nitrógeno de las calderas grandes es un problema relativamente reciente que surgió debido al reconocimiento de la contribución que éstos hacen al smog fotoquímico. En la actualidad no hay procesos, incluso en etapa experimental, que se pudieran utilizar para extraer los óxidos de nitrógeno de los gases de la chimenea; de hecho, el método ha consistido en reducir las emisiones de NO_x mediante la modificación de la combustión.

El grado al cual la reacción para la formación de monóxido de nitrógeno ocurre dentro de una caldera es una función de la temperatura de combustión, que a la vez depende del diseño de la caldera, del combustible que se emplea y la cantidad del aire que se encuentre presente en exceso. La combustión del carbón en las calderas convencionales originará 360 gramos de óxidos de nitrógeno por millón de unidades BTU a 3% de aire en exceso, lo cual corresponde a una concentración de gas de emisión de aproximadamente 570 ppm; muchas calderas existentes dan valores mucho más elevados que éste, sobre 1200 ppm. Los valores correspondientes para petróleo combustible son 310 gramos por millón de unidades BTU con una concentración de NO_x en los gases de emisión de 530 ppm.

Conforme aumenta la temperatura del horno, también aumenta la extensión de la reacción entre el N_2 y el O_2 ; por consiguiente, son deseables los métodos que posean la capacidad de mantener la temperatura de combustión baja sin pérdida de eficiencia en la caldera. Tales métodos incluyen encendido tangencial, donde las flamas del horno se

colocan de tal manera que no interfieran una con otra; esto ocasiona una temperatura más uniforme dentro de toda la cámara de combustión de tal forma que sólo exista oxígeno suficiente para quemar el carbón pero ningún exceso disponible para reaccionar con el nitrógeno.

Las partículas son un problema mayor en las calderas que funcionan mediante la combustión a base de carbón. El contenido de ceniza del carbón varía desde 20% hasta 40% y cuando tal carbón se pone sobre la tierra antes de la combustión, la emisión gaseosa puede contener hasta 80% del contenido de ceniza original como ceniza volátil. El método más adecuado para remover esta ceniza volátil es la precipitación electrostática. Se ha encontrado que la eficiencia es una función de la concentración de trióxido de azufre (SO_3) en el gas, la cual es una función del contenido de azufre del carbón. Se obtienen eficiencias superiores con carbón de mayor contenido de azufre, y en algunas circunstancias puede ser necesario adicionar SO_3 o sulfato al gas de la chimenea.

En el Anexo N°1 se presentan en más detalle métodos para combatir la contaminación atmosférica.

1.4 Reglamentación Vigente en Chile

La Ley Eléctrica Chilena no trata el tema de contaminación atmosférica debido a generación eléctrica. Las restricciones ambientales son impuestas por las leyes ambientales que rigen en el país, en condiciones que se detallarán más adelante [24][33][12].

Efectivamente, el reglamento que rige para el funcionamiento de las centrales generadoras de energía eléctrica en Chile es el Decreto N°6: "Reglamento de Coordinación de la Operación Interconectada de Centrales Generadoras y Líneas de Transporte", dictado el 22 de Enero de 1985. En el Artículo 15°, inciso segundo, se entregan las condiciones en que debe realizarse el despacho de las unidades. La programación de mediano y largo plazo derivará de estudios de planificación de la operación del sistema eléctrico que, preservando la seguridad de servicio instantánea global del sistema, lleven a minimizar su costo total actualizado de operación y falla en el período de estudio. La minimización de costos se efectuará para el conjunto de las instalaciones de generación y transporte del sistema, con independencia de la propiedad de dichas instalaciones. En este reglamento no se menciona ningún tipo de restricciones ambientales para la planificación y funcionamiento de las centrales.

La legislación ambiental de Chile regula las materias relacionadas con la protección del medio ambiente, la preservación de la naturaleza, la conservación del patrimonio medio ambiental y el derecho de vivir en un medio ambiente libre de contaminación.

La Constitución Política de la República (Artículo 9 N°8) asegura a todas las personas el derecho a vivir en un ambiente libre de contaminación y la Ley de Bases del Medio Ambiente (Ley N°19.300) establece las bases generales de la legislación ambiental. Además, las Normas Chilenas de Calidad del Aire reúnen todos los decretos, reglamentos y resoluciones que regulan las emisiones en el territorio nacional.

1.4.1 Ley de Bases del Medio Ambiente

En la Ley de Bases del Medio Ambiente se establecen definiciones legales claras y precisas para conceptos y elementos que son tratados en el tema ambiental. Los de mayor interés en este caso son:

- **Contaminación:** la presencia en el ambiente de sustancias, elementos energía o combinación de ellos, en concentraciones o concentraciones y permanencia superiores o inferiores, según corresponda, a las establecidas en la legislación vigente;
- **Contaminante:** todo elemento, compuesto, sustancia, derivado químico o biológico, energía, radiación, vibración, ruido, o una combinación de ellos, cuya presencia en el ambiente, en ciertos niveles, concentraciones o períodos de tiempo, pueda constituir un riesgo a la salud de las personas, a la calidad de vida de la población, a la preservación de la naturaleza o a la conservación del patrimonio ambiental;
- **Daño Ambiental:** toda pérdida, disminución, detrimento o menoscabo significativo inferido al medio ambiente o a uno o más de sus componentes;
- **Medio Ambiente Libre de Contaminación:** aquél en el que los contaminantes se encuentran en concentraciones y períodos inferiores a aquéllos susceptibles de constituir un riesgo a la salud de las personas, a la calidad de vida de la población, a la preservación de la naturaleza o a la conservación del patrimonio ambiental.

En lo que se refiere a emisiones, la ley especifica en el Artículo 40: "Las normas de emisión se establecerán mediante decreto supremo, el que señalará su ámbito territorial de aplicación. Tratándose de materias que no correspondan a un determinado Ministerio, tal Decreto será dictado por intermedio del Ministerio Secretaría General de la Presidencia.

Corresponderá a la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA) proponer, facilitar y coordinar la aplicación de las Normas de Emisión."

1.4.2 Normas Chilenas de Calidad del Aire

El Servicio de Salud Metropolitano del Ambiente (SESMA) realiza la fiscalización del cumplimiento de las normas de emisión atmosférica provenientes de fuentes fijas en la ciudad de Santiago, a través de su Programa de Emisiones de Fuentes Fijas, PROCEFF.

El control de las fuentes fijas está basado en un sistema mixto, en el cual al sector privado le corresponde demostrar el cumplimiento de la normativa, efectuando las mediciones según la metodología de medición oficial, cuya ejecución es efectuada por los laboratorios privados reconocidos por el Servicio. Por otra parte, es el Estado el que debe asegurar la calidad de las mediciones con auditorías y calificando a las empresas privadas de medición.

Las normas que son relevantes para la industria de generación de electricidad chilena, en particular, para la generación térmica, se detallan a continuación.

1.4.2.1 Resolución N° 369/1988

La Resolución N°369 del Ministerio de Salud del 12 de Abril de 1988, publicada en el diario oficial el 26 de Abril de 1988, establece los índices de calidad del aire para determinar el nivel de contaminación atmosférica de la Región Metropolitana, según se resume en tablas 1.1 y 1.2.

El objetivo de esta resolución es establecer el índice de calidad del aire referido a gases (ICA) y el índice de calidad del aire referido a partículas (ICAP) para ser utilizados en la ciudad de Santiago.

El índice ICA resulta de la aplicación de una metodología que se indica en la resolución, a las concentraciones de monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre

(SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂) y oxidante fotoquímico (O₃), determinados por la Red de Monitoreo MACAM dependiente del SESMA.

El índice ICAP se aplica a la misma metodología que se describe, pero a una concentración de Material Particulado de tamaño menor a 10 µm (PM10) determinada por la Red MACAM.

Tabla N°1.1. Índices ICA e ICAP¹

INDICE	ICA				ICAP
	CO ppm	SO ₂ µg/m ³	NO ₂ µg/m ³	O ₃ µg/m ³	PM10 µg/m ³ (24 horas)
0	0	0	0	0	0
100	9	365	470	160	150
200	19	929	1.290	470	195
300	30	1.493	2.110	780	240
400	40	2.056	2.930	1.090	285
500	50	2.620	3.750	1.400	330

Tanto el ICA como el ICAP dan origen a la siguiente calificación de la situación de acuerdo al valor obtenido:

Tabla N°1.2. Calificación de índices de calidad del aire

INDICE	CALIFICACION
0-100	BUENO
101-200	REGULAR
201-300	MALO
301-400	CRITICO
401-500	PELIGROSO

¹ Las concentraciones de CO son para un periodo de 8 hrs; 24 hrs para SO₂ y partículas de 1 hr para NO₂ y O₃.

1.4.2.2 Resolución N°1215/1978

La Resolución N°1215 del Ministerio de Salud fija las normas de calidad del aire destinadas a prevenir y controlar la contaminación atmosférica, de manera de proteger la salud humana.

Estas normas son aplicables a nivel nacional y proveen fundamentos técnicos y administrativos del sistema de prevención y control de la contaminación atmosférica.

Las concentraciones máximas permitidas y los métodos de análisis utilizados para la determinación de los contaminantes son los siguientes:

Tabla N°1.3. Normas de calidad del aire

INDICADOR	UNIDAD	ESTANDAR	TIEMPO	METODO DE ANALISIS
Partículas totales en suspensión PTS	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	75	Concentración media geométrica anual	Método gravimétrico de muestreador de alto volumen o equivalente
	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	260	Concentración media aritmética en 24 hrs	
PM10	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	150	Media aritmética diaria	
Anhídrido sulfuroso (SO_2)	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	80	Concentración media aritmética anual	Método colorimétrico de la pararrosanilina o equivalente
	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	365	Concentración media aritmética durante 24 hrs	
Monóxido de carbono (CO)	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	10.000	Concentración media 8 hrs	Método de radiación infrarroja no dispersiva o equivalente
	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	40.000	Concentración media aritmética de 1 hora	
Oxidantes fotoquímicos (O_3)	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	160	Concentración media aritmética de 1 hora	Método de quimiluminiscencia o equivalente
Dióxido de nitrógeno (NO_2)	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	100	Concentración media aritmética anual	

1.4.2.3 Decreto Supremo N°32/1990

El Decreto Supremo N°32 del Ministerio de Salud, publicado en el diario oficial el 24 de Mayo de 1990, establece restricciones al funcionamiento de las fuentes estacionarias puntuales y grupales, emisoras de contaminantes atmosféricos, en situaciones de emergencia de contaminación del aire.

Cuando los estimadores del índice ICAP superan el nivel 300 se decreta Preemergencia y la autoridad sanitaria puede ordenar la paralización por periodos de 24 horas prorrogables, a todas aquellas fuentes ubicadas en los primeros lugares del listado, que en conjunto aportan el 20% de la emisión diaria. Cuando los estimadores ICAP alcanzan el valor 500 se decreta Emergencia y paralizan aquellas fuentes que en total aportan el 50% de la emisión diaria del material particulado.

Para determinar cuáles fuentes emisoras de contaminación deben paralizar en Preemergencia o Emergencia se ha confeccionado un listado con las fuentes emisoras ordenadas en orden decreciente respecto de la concentración de partículas.

1.4.2.4 Otras Reglamentaciones Vigentes

Otras reglamentaciones importantes para la generación eléctrica térmica son:

- Reglamento de funcionamiento de fuentes emisoras de contaminantes atmosféricos que indica, en situaciones de emergencia de contaminación atmosférica. 19 de Febrero de 1990.
- Establece normas de emisión de material particulado a fuentes estacionarias puntuales y grupales. 13 de Enero de 1992.

- Complementa procedimiento de compensación de emisiones para fuentes estacionarias puntuales que indica. 27 de Enero de 1995.
- Reglamenta funcionamiento de establecimientos emisores de anhídrido sulfuroso, material particulado y arsénico en todo el territorio de la República. 29 de Septiembre de 1991. Diario Oficial, 16 de Enero de 1992.
- Establece norma de calidad primaria para material particulado respirable MP10, en especial de los valores que definen situaciones de emergencia. 16 de Marzo de 1998. Diario Oficial, 25 de Mayo de 1998.
- Establece la Prevención y Descontaminación Atmosférica para la Región Metropolitana. 22 de Enero de 1998. Diario Oficial, 6 de Junio de 1998.

1.5 Revisión Bibliográfica

El problema de la contaminación debido a la generación eléctrica tiene varias dimensiones que han sido cubiertas en investigaciones diversas.

Existen variadas publicaciones extranjeras, especialmente de Estados Unidos y Europa, orientadas a la solución del problema de despacho económico con restricciones ambientales, debido a las estrictas leyes ambientales vigentes. Unas abordan el tema desde la misma perspectiva del despacho económico tradicional, otras buscan nuevas formas para resolverlo. En el país el tema no ha sido muy desarrollado, siendo la Universidad de Concepción una de las pioneras en realizar estudios e informes en el tema de contaminación atmosférica producida por centrales termoeléctricas. En la Pontificia Universidad Católica de Chile existen dos informes, realizados en el curso "Mercados Eléctricos"[19][27], que abordan el tema ambiental en Chile y de cómo afecta a la industria eléctrica.

Esta investigación está orientada al despacho económico ambiental por lo que se realizó una búsqueda bibliográfica en el tema, seleccionándose una muestra que ilustra los desarrollos en el área.

1.5.1 Solución del predespacho en sistemas puramente térmicos

La solución del problema de predespacho y despacho económico con restricciones ambientales en la publicación de D. Srinivasan y A. Tettamanzi [9] se lleva a cabo con un nuevo algoritmo llamado "Algoritmo Evolucionario" (EA). Este algoritmo pertenece a una familia de técnicas de optimización estocásticas basadas en el concepto de *evolución*, es poderoso particularmente para solucionar problemas donde la cantidad de posibles soluciones es muy grande para resolverse con técnicas tradicionales y la estructura y parámetros del problema varían en el tiempo.

El problema se resuelve minimizando los costos totales del sistema y las emisiones de contaminantes (SO_2 , NO_x , CO_2 y material particulado). Todas las funciones de emisiones se representan con un polinomio de segundo orden en P, aunque para las emisiones de NO_x esto no es lo más exacto puesto que éstas son no lineales en P. Las restricciones que se consideran son:

- Balance de potencia
- Reserva en giro
- Límites de generación de unidades
- Mínimos tiempos de encendido y apagado de unidades
- Condiciones iniciales de unidades
- Restricciones de personal

No hay restricciones ambientales, estas sólo se reflejan en los costos en la función objetivo.

1.5.2 Despacho económico ambiental de sistemas puramente térmicos

Y. Hu y W. Wee [39] presentan un sistema de despacho jerárquico para reducir costos y emisiones de SO_2 . Una estructura jerárquica divide el problema en niveles, anual, mensual, diario y horario. Para cada nivel se realiza el despacho económico con restricciones, empezando por el anual. Los resultados del nivel anterior son la base para el siguiente hasta llegar al nivel horario. Esto permite que el método de solución no deba ser demasiado sofisticado y que encontrar la solución tome un tiempo razonable.

Para resolver el problema se utiliza un algoritmo con doble lazo. El lazo interior calcula el despacho minimizando el costo ponderado. El lazo exterior corrige los ponderadores de acuerdo a las restricciones de emisiones de SO_2 . El sistema se prueba usando datos de la Compañía de Gas y Electricidad de Cincinnati.

En la publicación de J. Talaq, F. El-Hawary y M.El-Hawary [16] se intenta reducir la producción de emisiones atmosféricas causadas por la generación térmica a través de las siguientes estrategias:

- Mínimas emisiones
- Mínimas emisiones con restricción de costos
- Mínimo costo con control de emisiones
- Mínimo nivel de concentración
- Mínimo costo con restricción de concentración
- Mínimo de función ponderada de costo y emisiones

Se entregan modelos para emisiones que incluyen la función de emisiones, concentración de emisiones y estimación de costos de la contaminación. Lo nuevo de esta publicación es la inclusión de las condiciones meteorológicas en el despacho ambiental utilizando un modelo de difusión de aire para cada unidad generadora. Este considera las emisiones de la unidad y un coeficiente meteorológico que depende de la distancia entre la unidad y el punto más contaminado, de la altura de la chimenea y de la velocidad del viento.

Se resuelve el problema de optimización multi-objetivo con la técnica ϵ -restricciones que consiste en minimizar una de las funciones objetivo, dejando las restantes como restricciones.

En la publicación de V. Vickers, W. Hobbs, S. Vemuri y D. Todd [35] se describe el sistema de restricción de emisiones de SO_2 debido a la legislación en Estados Unidos. Este será implementado con un programa de permisos, donde un permiso representa una tonelada de SO_2 que se descarga a la atmósfera. Cada empresa debe adquirir permisos de acuerdo a la cantidad de contaminante que producen sus unidades y a lo que se espera del mercado de los permisos que se iniciará con esta medida.

Se analiza la operación de la empresa eléctrica Bigers Rivers, una cooperativa eléctrica rural ubicada en el oeste de Kentucky, incluyendo el planeamiento de contratos de combustible y el despacho de unidades dadas las restricciones de emisiones de SO_2 . La función objetivo es la suma de costos de: combustible, remoción el SO_2 , inventario, operación y mantención y mercado de permisos. Se tiene una enorme cantidad de restricciones desglosadas en las siguientes categorías:

- Restricciones de emisiones
- Restricciones de proveedores de combustible
- Restricciones de almacenamiento de combustibles
- Restricciones de capacidad de generación de unidades
- Restricciones de demanda

El método de optimización que se utiliza es la programación lineal puesto que todas las ecuaciones (función objetivo y restricciones) son lineales.

J. Lamont y E. Obessis [20] entregan un resumen de algoritmos para el despacho económico ambiental. La estrategia de despacho es la clásica, excepto que la función objetivo y las restricciones cambian dependiendo de lo que se quiere minimizar (costos, emisiones de SO_2 , emisiones de NO_x). Una contribución de la publicación son los modelos de emisiones que incluyen las emisiones en el encendido de la unidad, que no habían sido consideradas anteriormente. Además, se entrega una función más exacta para determinar las emisiones producidas durante la operación, en función de las emisiones en la chimenea y no de la potencia generada por la unidad.

S. Roy [32] describe un método que entrega, mediante programación lineal, la generación correspondiente a cada unidad del sistema con el objetivo de lograr un costo eficiente en un escenario, controlando las emisiones de partículas y gaseosas. Para esto utiliza las variables costo relativo y emisiones relativas con respecto a un caso base. El escenario se especifica con el número de empresas del sistema y unidades de cada una (especificando cantidad de térmicas e hidráulicas, su capacidad y disponibilidad), las líneas de transmisión que las unen, contratos de cada empresa.

W. Spens y F. Lee [38] presentan un método que optimiza el despacho económico ambiental dados los límites máximos de emisiones de SO_2 y NO_x . El método opera sobre un horizonte multihorario considerando restricciones ambientales anuales y requerimientos de carga horarios. El modelo es flexible en cuanto a la información requerida la que puede ser entregada, para cada unidad, en intervalos anuales, estacionales u horarios. El método se ilustra en un ejemplo de tres centrales térmicas.

En el trabajo de J. Valenzuela [19] se detallan cinco estrategias de minimización del impacto ambiental debido a la generación térmica: Minimización de emisiones, Minimización de emisiones con restricciones de costo, Minimización de costos con restricción de emisiones, Minimización de costos con restricción de concentración de contaminante y Minimización de función ponderada de costos y emisiones. Mediante el

método de Lagrange se propone la solución de las metodologías analizadas, utilizándola en ejemplos prácticos. La finalidad principal es solucionar el problema de Despacho Económico de Carga Ambiental, considerando las estrategias aplicables desde el punto de vista práctico.

P. Fuentes [27] desarrolla algoritmos para la solución de diversas estrategias de despacho económico ambiental enfocado a centrales de tipo térmica. Las estrategias presentadas son:

- mínimo costo del combustible,
- mínimas emisiones de SO_2 ,
- mínimas emisiones de NO_x ,
- mínima cantidad de combustible,
- restricción de emisiones de SO_2 ,
- restricción de emisiones de NO_x ,
- control de costos y emisiones de SO_2 con restricción de emisiones de SO_2 ,
- mínimo costo con restricción en emisiones de SO_2 y en emisiones de NO_x ,
- mínimas emisiones de SO_2 con costos restringidos,
- mínimo nivel de concentración de partículas,
- mínimos costos y emisiones.

Se acota el problema a través de las estrategias de mínimo costo y mínimas emisiones con lo que se obtienen los valores máximos y mínimos de costos, emisiones de SO_2 y emisiones de NO_x . El principal problema para encontrar la solución radica en la necesidad de establecer una relación entre lo económico y lo ambiental, siendo la evaluación monetaria de la contaminación una solución propuesta.

C.A. Roa-Sepúlveda, M. Lillo, U.G. Knight, A.H. Coonick [4] presentan una nueva solución del problema de despacho económico con restricciones ambientales

utilizando una técnica modificada de árboles de decisión. La diferencia con el método original es que se mejora el criterio de búsqueda de posibles soluciones, aumentando su número utilizando lógica difusa. La función objetivo incluye la función de costos y las emisiones ponderadas por un factor entre cero y uno. El modelo de emisiones de SO_2 es un polinomio de segundo orden y el de NO_x es exponencial.

1.5.3 Consecuencias de Restricciones Ambientales en Empresas Eléctricas

K.D. Le y otros [21] entregan una publicación que contiene seis breves informes que describen las nuevas necesidades de las empresas eléctricas en el área de emisiones atmosféricas debido a la Enmienda de Aire Limpio. Cinco de los informes basan su análisis en compañías eléctricas de Estados Unidos y el restante, en una empresa eléctrica de Japón.

La publicación de F. Jakl, K. Bakic y L. Valencic [13] presenta un doble uso de la red del sistema de información ambiental para monitorear la calidad del aire en la cercanía de plantas térmicas. Los datos son transmitidos en tiempo real cada treinta minutos, para ser utilizados en el cálculo de la producción diaria de energía térmica, en concordancia con las condiciones ecológicas en los alrededores de las plantas.

R.C. Furtado, R. C. Cavalcanti y M. F. Furtado [28] examinan el trato que se ha dado al problema ambiental en la reestructuración del sector eléctrico en Brasil y realizan sugerencias orientadas a aumentar el conocimiento ambiental obtenido en las últimas décadas. Se analiza el marco regulatorio en que se encuentran insertas las empresas de generación eléctrica y se proponen los puntos que aun no han sido incluidos en las leyes.

P. Ayala [26] presenta las consecuencias de las leyes ambientales en Chile para el Sistema Interconectado Central. Desarrolla una metodología general de solución en

base a la búsqueda de externalidades críticas tanto desde el punto de vista legal como económico y lo aplica a las empresas eléctricas del Sistema Interconectado Central. Denomina externalidades críticas a las externalidades que no están reguladas por estándares de calidad o de emisión, o por legislación específica. La metodología utilizada considera estudiar el impacto de las externalidades críticas en la planificación eléctrica, para esto los aspectos de la planificación que se observan son: el plan de obras del SIC, los costos marginales trimestrales, el precio de nudo y los niveles de energía generada. Finalmente se determina en cuanto varía la fecha de entrada al SIC de las distintas centrales futuras, cuanto varía el precio de la electricidad y en cuanto se modificarán los ingresos por venta de energía de algunas centrales eléctricas.

1.6 Estructura de la Memoria

El trabajo se dividió básicamente en tres áreas:

- Revisión bibliográfica y estudio de la legislación ambiental que afecta a la operación del sector eléctrico.
- Desarrollo de un algoritmo para despacho económico con consideraciones ambientales, en sistemas puramente térmicos.
- Análisis del impacto de los costos ambientales en la operación económica del Sistema Interconectado Central a través del modelo Gestión Óptima del Laja

En este primer capítulo se aborda el tema de la contaminación en rasgos generales. Para esto se realizó una búsqueda del material existente en Chile y en publicaciones extranjeras sobre despacho económico con restricciones ambientales, contaminación producida por centrales termoeléctricas, efectos de la contaminación atmosférica en la salud humana e impactos en el ambiente, legislación vigente en Chile en el tema ambiental y medidas de control de emisiones.

En el capítulo dos se presenta el tema del despacho económico con consideraciones ambientales para sistemas puramente térmicos, debido a que es el primer paso para un estudio de este tipo. Este despacho no es tan engorroso como un despacho hidrotérmico, puesto que no considera tantas variables ni restricciones. Para realizar pruebas con el método propuesto se realizó un programa del algoritmo en lenguaje C y se utilizaron dos sistemas de prueba obtenidos de la literatura.

La introducción de las variables ambientales en el principal sistema eléctrico chileno se presenta en el tercer capítulo. Se realizan análisis de los resultados obtenidos con el modelo Gestión Óptima del Laja, en el Sistema Interconectado Central, al variar los costos de las centrales que emiten más contaminantes. También se analizan casos considerando la ubicación geográfica de las unidades, los sistemas de control de emisiones que utilicen, etc.

2 DESPACHO ECONOMICO AMBIENTAL EN SISTEMAS TÉRMICOS

2.1 Despacho Económico

El objetivo del despacho económico clásico es asignar la generación total entre unidades generadoras en servicio de modo de minimizar el costo de abastecer la carga total, incluyendo pérdidas y respetando restricciones operativas de las unidades del sistema [14][3].

Modela funciones de producción de las unidades generadoras, pérdidas de transmisión y límites operativos de las unidades. Típicamente asume tensiones constantes en cada barra y factores de potencia constante y no se modelan las restricciones de transmisión.

2.1.1 Función Objetivo en Sistema Térmico

La función objetivo F_T es igual al costo total de abastecer la carga total, y está dada por:

$$F_T = F_1 + F_2 + \dots + F_N = \sum_{i=1}^N F_i$$

donde F_T : costo total de generación del sistema

F_i : costo de generación de la unidad i

N : número de unidades generadoras del sistema

Los costos de operación de las centrales térmicas se dividen en fijos y variables. Los costos variables son, básicamente, los costos de combustible y dependen del tipo de

combustible y del rendimiento de la máquina. El consumo de combustible ($H_i(P_i)$) se mide en unidades de calor, [Kcal/h] o [BTU/h] y la curva de consumo se modela frecuentemente por una función de segundo grado en P. El costo de generación de cada unidad se obtiene multiplicando los costos de operación por el valor del combustible utilizado por la unidad, por lo que se tiene:

$$H_i(P_i) = a_i \cdot P_i^2 + b_i \cdot P_i + c_i$$

$$F_i(P_i) = \alpha_i \cdot H_i(P_i)$$

donde α_i es el precio del combustible utilizado por la unidad i, y a_i , b_i y c_i se determinan en base a la información del funcionamiento de la unidad generadora, utilizando técnicas de identificación de parámetros, con datos almacenados de potencia de salida versus combustible de entrada a la unidad.

2.1.2 Restricciones

La principal restricción en la operación del sistema es que la suma de las potencias generadas sea igual al consumo más las pérdidas, pero en este caso, se simplificará obviando las pérdidas. La ecuación del balance de potencias resulta:

$$\phi = P_L - \sum_{i=1}^N P_i = 0$$

donde P_L : potencia demandada por la carga del sistema

P_i : potencia generada por la unidad i

Otras restricciones que deben imponerse al sistema de generación son los límites máximo y mínimo de potencia generada por cada unidad, esto es:

$$P_{iMIN} \leq P_i \leq P_{iMAX}$$

Las restricciones de transmisión no se incluyen, asumiendo que el voltaje en las barras no variará en forma significativa y que los niveles de carga de las líneas de transmisión no serán violados.

Con las ecuaciones y restricciones anteriores es posible definir el problema de despacho económico.

$$\begin{aligned}
 & \text{Min } F_T \\
 & \text{s.a.} \\
 & \phi = P_L - \sum_{i=1}^N P_i \\
 & P_{iMIN} \leq P_i \leq P_{iMAX} \quad i = 1, \dots, N
 \end{aligned}$$

2.2 Despacho Económico Ambiental

El problema de despacho económico ambiental es una extensión del problema de despacho económico expuesto anteriormente. Se agregan restricciones ambientales del contaminante que se quiere disminuir, tales como óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, dióxido de carbono y material particulado.

La meta es encontrar la potencia generada P_i por cada unidad que minimice el costo de operación total mientras que los requerimientos de carga, la capacidad de generación y las restricciones de emisiones de contaminantes se encuentren satisfechos.

Para incluir las emisiones en el despacho de la generación se han propuesto diferentes métodos:

- Minimizar la emisión total de contaminantes, utilizando como función objetivo una función de las emisiones del contaminante o contaminantes que se desee disminuir.
- Incluir el control de emisiones en el despacho económico convencional sumando funciones de emisiones a la función de costos de combustible de las unidades.

- Resolver el problema de minimización clásico incorporando las funciones de emisiones como restricciones.

El primer método sólo es útil para efectos de estudio ya que no considera los costos de combustibles. Su solución entrega el valor mínimo de emisiones, que es la ideal, ambientalmente hablando, pero es la más costosa económicamente.

En el segundo, las emisiones se incluyen ya sea con ponderadores para cada función o con el costo por polución de cada tipo de contaminante incluido. La dificultad, en este caso, se presenta en el cálculo de los costos por emisiones de contaminantes, puesto que estos costos no siempre se pueden especificar en términos monetarios, o no existen parámetros para cuantificar monetariamente los efectos de la contaminación.

El último método es más adecuado cuando existen leyes que restringen las emisiones de algún contaminante, debido a que existe un problema similar al anterior, puesto que es difícil conocer cual es el mejor valor al cual restringir las emisiones.

2.3 Método propuesto

En este trabajo se optó por el segundo método de los descritos en la sección anterior, es decir, en la función objetivo se incluye la función de emisiones de contaminantes, asignando ponderaciones para cada función [39][14]. Con los resultados obtenidos es posible conocer la relación entre la disminución de emisiones versus el aumento en los costos, pudiendo de esta forma, aplicar una disminución de emisiones hasta un punto en que los costos no aumenten excesivamente.

La formulación matemática del problema es:

$$\text{Min } C_T = w_c \cdot C_C + w_s \cdot C_S$$

s.a.

$$P_L = \sum_{i=1}^N P_i$$

$$P_{iMIN} \leq P_i \leq P_{iMAX} \quad i = 1, \dots, N$$

$$S_T \leq S_A$$

donde

$$C_C = F_T \quad \text{Costo de combustibles [\$]}$$

$$C_S = \sum r_i H_i(P_i) \quad \text{Emisión total de SO}_2 \text{ [Ton]}$$

w_c : Ponderación de costos de combustible

w_s : Ponderación de impacto de la emisión

r_i : Factor de Emisión de SO₂ de la unidad i [Ton/MBtu]

H_i : Consumo de combustible de la unidad i [MBtu/h]

En la formulación anterior, el método de ponderaciones se usa para definir la importancia relativa del costo y las emisiones. Debe notarse que los ponderadores w_c y w_s no son valores fijos, son herramientas para observar la relación entre las dos funciones objetivo ya que no es posible minimizar las dos funciones a la vez.

Las funciones de emisión de SO₂ se modelan con ecuaciones cuadráticas dependientes de la potencia generada por la central.

2.3.1 Algoritmo de solución

En este trabajo se optó por desarrollar un algoritmo con doble lazo para resolver el problema descrito antes. En el lazo inicial se calcula el despacho que minimice la función objetivo con ponderadores definidos. En el lazo posterior se corrigen los ponderadores de acuerdo a la restricción de emisión de SO₂. El esquema del algoritmo se muestra en la figura 2.1.

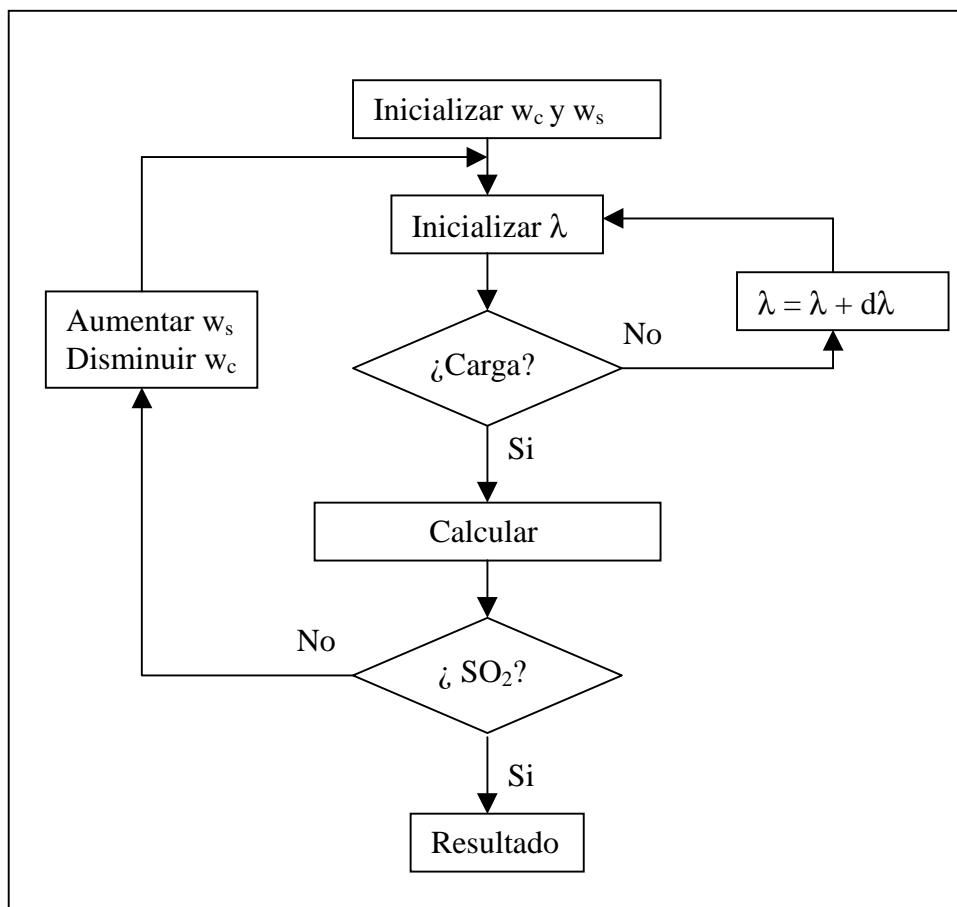


Figura N°2. 1. Diagrama de Flujo del Algoritmo desarrollado

El algoritmo se puede resumir en dos pasos: (a) Búsqueda con iteración en λ , y (b) Revisión de emisión de SO_2 y corrección de ponderadores.

(a) Método de Iteración en λ

El despacho se calcula, primero, ignorando la restricción de emisiones de SO_2 . Los ponderadores iniciales son $w_c=1$ y $w_s=0$, por lo que se minimiza la función de costos en la primera iteración. El algoritmo iterativo utilizado es el método de iteración en λ ,

cuyo diagrama de flujo se muestra en la figura 2.2. Para la primera iteración de este algoritmo, se debe entregar un valor inicial de λ al modelo, y para la segunda se utiliza este valor ponderado por una constante. En las iteraciones restantes, el algoritmo calcula el nuevo valor de λ interpolando con sus dos valores anteriores y los errores ε correspondientes a estas iteraciones.

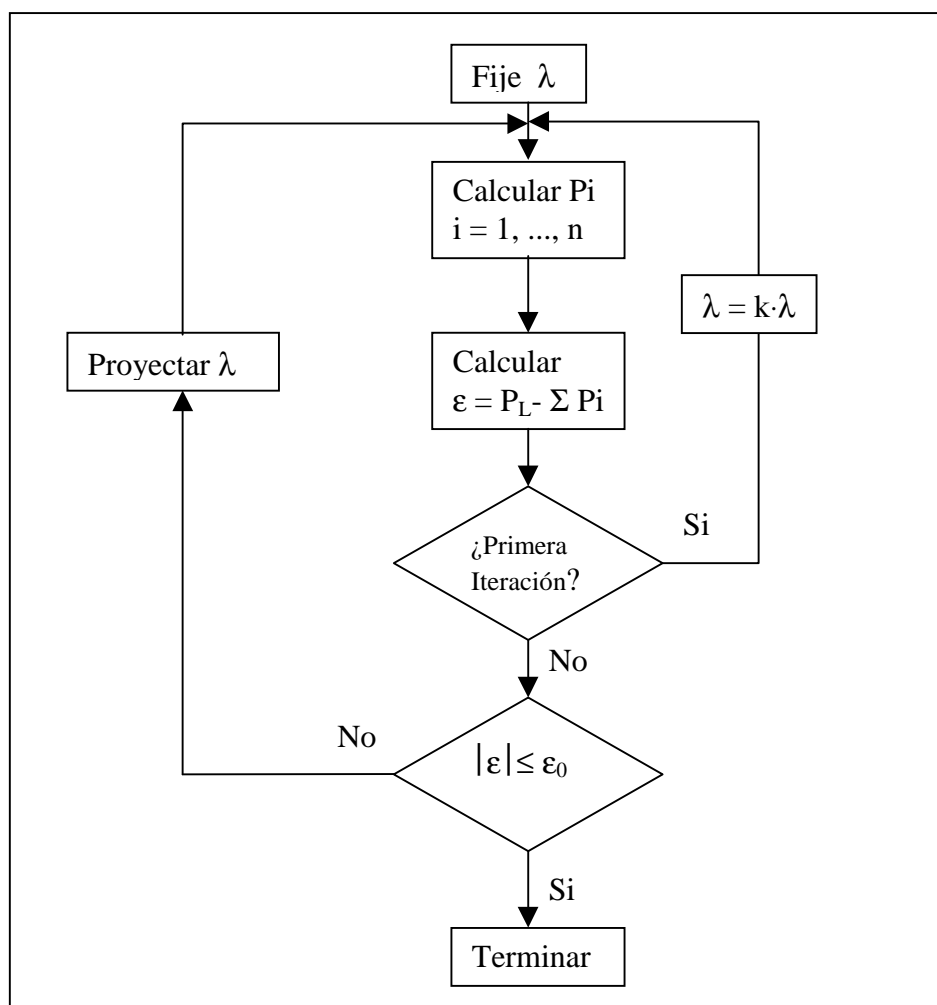


Figura N°2. 2. Diagrama de Flujo del Algoritmo de Iteración en λ

(b) Revisión de emisión de SO₂ y corrección de ponderadores

Durante el proceso, los ponderadores w_c y w_s (que deben sumar uno) se modifican en una pequeña cantidad δ_w , variándolos desde 1 y 0 y entre 0 y 1, respectivamente, lo que entrega el despacho económico ambiental para todo el universo de ponderadores. Esta operación es equivalente a aumentar la influencia de las emisiones de SO₂ en la función objetivo.

Se define la tasa de disminución de emisiones R como sigue:

$$R = \frac{\text{(aumento de costos)}}{\text{(disminución de emisiones de SO}_2\text{)}} = -\frac{dC}{dE}$$

El valor de R corresponde a la tasa marginal de costos respecto a las emisiones de SO₂.

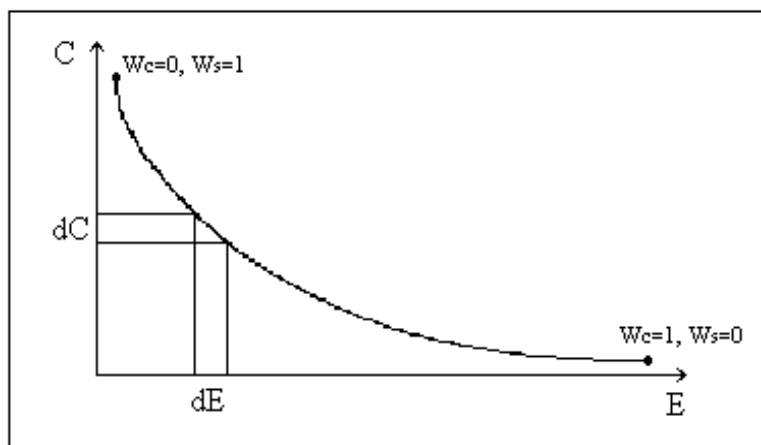


Figura N°2. 3. Curva de equilibrio y tasa de disminución de emisiones

Inicialmente ($w_c=1$, $w_s=0$), R es pequeño debido a que un pequeño aumento en los costos produce una gran disminución en las emisiones, y a medida que w_c disminuye, R aumenta. Esto se puede observar claramente en la figura 2.3, donde se muestra una curva de equilibrio (trade off) típica.

2.3.2 Descripción de Sistemas de Prueba

El método descrito anteriormente se programó en Lenguaje C, y se realizaron varias pruebas para evaluar su funcionamiento en sistemas reales.

Se utilizan dos sistemas de prueba, uno de tres centrales y uno de diecisiete centrales térmicas, ambos sacados de la literatura, puesto que no se tuvo acceso a los niveles de emisiones producidas por las centrales térmicas del sistema chileno.

2.3.2.1 Sistema de tres unidades

Este sistema consiste en tres unidades de generación térmica [27] conectadas a una barra que recibe una carga P_L . La primera es una unidad a carbón y las otras unidades son a petróleo.

La entrada de cada unidad debe darse como una función de costos F , que se obtiene multiplicando la función de entrada-salida H (MBtu/hr) por una constante de razón de costo α dada en (\$/MBtu) propia para cada tipo de combustible.

La función de emisiones de SO_2 es aproximadamente proporcional a la función H , y se obtiene multiplicando ésta por una constante de razón r dada en (ton/MBtu).

A continuación se describen las tres unidades.

Tabla N°2. 1. Parámetros de unidades en sistema de tres unidades

	Combustible	H			α US\$/MBtu	r ton/MBtu
		MBtu/MW ²	MBtu/MW	MBtu		
Unidad 1	Carbón	0,00142	7,2	510	1,1	$1,084 \cdot 10^{-3}$
Unidad 2	Petróleo	0,00194	7,85	310	1,0	$1,084 \cdot 10^{-3}$
Unidad 3	Petróleo	0,00482	7,97	78	1,0	$1,084 \cdot 10^{-3}$

Tabla N°2. 2. Límites de generación en sistema de tres unidades

Unidad	Potencia mínima MW	Potencia máxima MW
1	150	600
2	100	400
3	50	200

2.3.2.2 Sistema de 17 unidades

El sistema utiliza los datos de unidades pertenecientes a la Compañía de Gas y Electricidad de Cincinnati [39]. Los parámetros de cada unidad se detallan en la tabla 2.3. Los datos son del mismo tipo que las unidades del sistema anterior.

Tabla N°2. 3. Parámetros de unidades en sistema de 17 unidades

Unidad	H			α US\$/MBtu	r lb/MBtu
	MBtu/MW²	MBtu/MW	MBtu		
1	0,000202	9,213	74,4	1,8	1,66
2	0,006788	7,606	146,8	1,8	1,65
3	0,004879	7,720	160,5	1,8	1,71
4	0,001308	8,134	144	1,8	1,70
5	0,003408	7,814	249,3	1,8	4,14
6	0,005573	7,622	176,5	1,8	4,12
7	0,017923	8,583	175,1	1,8	3,01
8	0,001464	7,965	213,8	1,8	3,96
9	0,004773	6,800	468,7	1,8	4,11
10	0,004773	6,750	468,7	1,8	1,08
11	0,001949	8,152	250,2	1,7	2,2
12	0,002385	7,531	245,3	1,7	2,2
13	0,005436	6,978	310,8	1,7	2,2
14	0,003026	7,720	269,0	1,7	2,2
15	0,00029	8,648	414,7	1,7	1,03
16	0,00115	7,897	294,5	1,7	0,92
17	0,00250	7,580	328,0	1,8	4,87

Tabla N°2. 4. Límites de generación en sistema de 17 unidades

Unidad	Potencia mínima MW	Potencia máxima MW
1	100	600
2	100	500
3	100	500
4	100	400
5	50	600
6	85	500
7	100	800
8	100	250
9	153	320
10	50	400
11	80	300
12	100	190
13	100	700
14	100	500
15	157	414
16	100	1000
17	0	600

2.4 Aplicación a Sistemas de Prueba

Se realizaron varios estudios con los dos sistemas de prueba, se modificó la potencia de carga del sistema, se observaron los cambios en los costos totales al disminuir las emisiones, los ingresos por unidad y variación de costos marginales. En todos se utilizó un valor $\delta_w=0,01$, es decir, se obtienen 100 valores entre $w_c=1$ y $w_c=0$.

2.4.1 Sistema de tres unidades

Se utilizaron dos potencias de carga para realizar las pruebas en este sistema. Una potencia de 500 [MW] y otra de 850 [MW], con factores de carga de 0,42 y 0,71, respectivamente. Para efectos del estudio se calcularon el despacho económico tradicional ($w_c=1$), un despacho ambiental ($w_s=1$), y un despacho económico ambiental (w_c entre 0 y 1) en cada caso. Los resultados se entregan en las tablas 2.5, 2.6 y 2.7.

Tabla N°2. 5. Despacho económico en sistema de tres unidades($w_c=1$)

Unidad	Pcarga = 500 [MW]			Pcarga = 850 [MW]		
	Potencia [MW]	Emisión SO2 [ton]	Costo [Miles US\$]	Potencia [MW]	Emisión SO2 [ton]	Costo [Miles US\$]
1	227	2.52	2.44	392	4.03	3.91
2	204	2.26	1.99	336	3.60	3.17
3	69	0.74	0.65	122	1.27	1.12
Total	500	5.52	5.08	850	8.90	8.19

Tabla N°2. 6. Despacho ambiental en sistema de tres unidades($w_s=1$)

Unidad	Pcarga = 500 [MW]			Pcarga = 850 [MW]		
	Potencia [MW]	Emisión SO2 [ton]	Costo [Miles US\$]	Potencia [MW]	Emisión SO2 [ton]	Costo [Miles US\$]
1	350	3.64	3.52	540	5.47	5.30
2	100	1.27	1.11	230	2.52	2.22
3	50	0.56	0.49	79	0.84	0.74
Total	500	5.46	5.13	850	8.83	8.26

Los valores de los ponderadores para el despacho económico ambiental son algún par cualesquiera entre 0 y 1, debido a que no se tiene restricción de emisiones ni de costos definida.

Tabla N°2. 7. Despacho económico ambiental en sistema de tres unidades

Unidad	Pcarga = 500 [MW], Wc=0,76			Pcarga = 850 [MW], Wc=0,53		
	Potencia [MW]	Emisión SO2 [ton]	Costo [Miles US\$]	Potencia [MW]	Emisión SO2 [ton]	Costo [Miles US\$]
1	287	3.06	2.97	493	5.00	4.84
2	161	1.84	1.62	265	2.86	2.52
3	51	0.57	0.50	93	0.98	0.86
Total	500	5.48	5.09	850	8.84	8.22

Tabla N°2. 8. Comparación de emisiones y costos en sistema de tres unidades

Pcarga = 500 [MW]			Pcarga = 850 [MW]		
Wc	Emisión SO2 [ton]	Costo Total [Miles US\$]	Wc	Emisión SO2 [ton]	Costo Total [Miles US\$]
1	5.52	5.08	1	8.90	8.19
0.76	5.48	5.09	0.53	8.84	8.22
0	5.46	5.13	0	8.83	8.26

En las tres primeras tablas puede observarse que unidades se benefician con la consideración de las emisiones en el despacho, las cuales aumentan su generación a medida que w_c disminuye; y a las que se ven afectadas negativamente por esto. El análisis se realizará observando los ingresos y potencias de las tres unidades en los gráficos 2.8 y 2.9.

En la tabla 2.8 se observa un resumen de los resultados de las tablas 2.5, 2.6 y 2.7. Con esto pueden compararse las emisiones y costos totales obtenidos en cada caso. Comparado al despacho económico puro, el despacho ambiental puro reduce un 1,04%

las emisiones de SO_2 ($F_{\text{carga}}=0,42$), mientras que el costo aumenta un 0,94%, lo que equivale a US\$ 838/ton.

Al utilizar el despacho económico ambiental se puede encontrar un despacho en el cual el costo por disminución de emisiones no sea tan alto como en el caso extremo de utilizar despacho ambiental puro. Por ejemplo, con $w_c=0,76$ ($F_{\text{carga}}=0,42$), el costo por disminución es de US\$ 219/ton, obteniéndose entre el despacho económico puro y éste una reducción de 0,78% con un aumento de costos de 0,19%.

Cuando se conocen la cantidad máxima de emisiones permitidas o el valor máximo permitido de costo total del sistema, es posible incluir alguno de estos valores como restricciones en el algoritmo, con lo que se conocería el punto de operación óptima del sistema.

Luego, se estudia el comportamiento de las curvas de equilibrio del sistema con las distintas cargas, y sus correspondientes tasas de disminución de emisiones, lo que se muestra en las figuras 2.4 y 2.5.

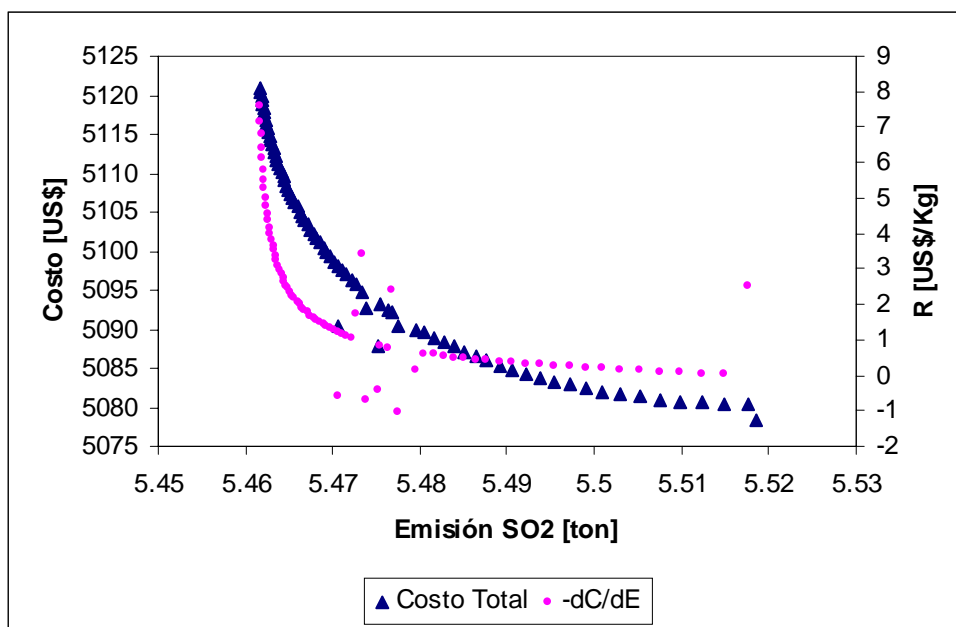


Figura N°2.4. Curva de equilibrio y tasa de disminución de emisiones (3 unidades, $F_{carga}=0,42$)

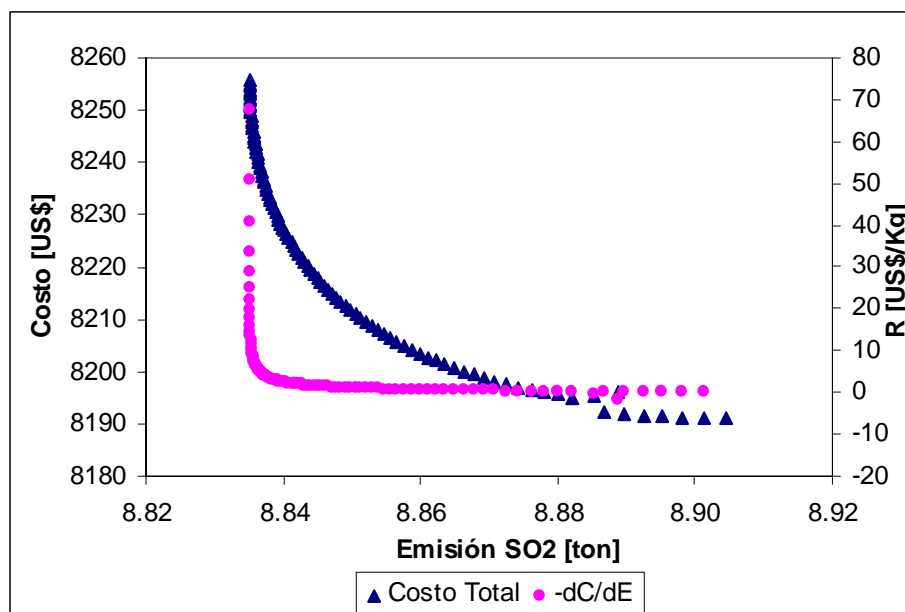


Figura N°2.5. Curva de equilibrio y tasa de disminución de emisiones (3 unidades, $F_{carga}=0,71$)

En los dos gráficos anteriores se observa que para los primeros pares de valores de ponderadores (sector derecho del gráfico) se consigue una disminución de emisiones, entre iteraciones, relativamente grande respecto de las últimas. Los puntos correspondientes a las primeras iteraciones (w_c cercano a 1) se encuentran más separados y se distinguen fácilmente uno de otro. En cambio cuando w_c disminuye y w_s aumenta (sector izquierdo del gráfico), los puntos se confunden uno con otro, es decir, no se logra mayor diferencia entre las emisiones de un despacho económico ambiental con un par de ponderadores y el siguiente.

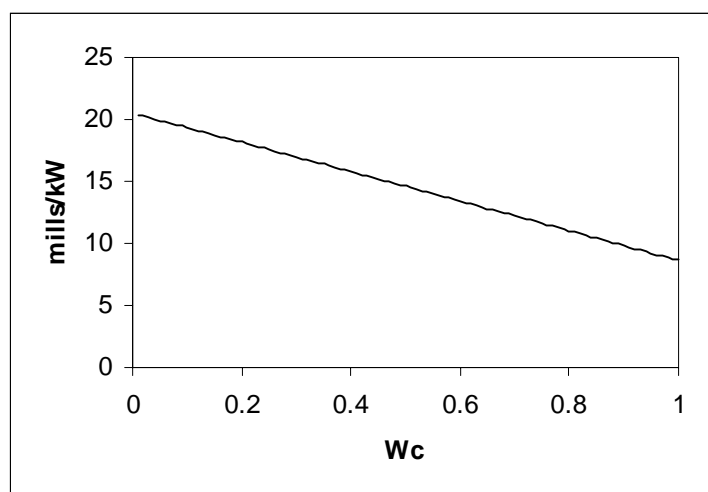


Figura N°2. 6. Costos marginales sistema de tres unidades ($F_{carga}=0,42$)

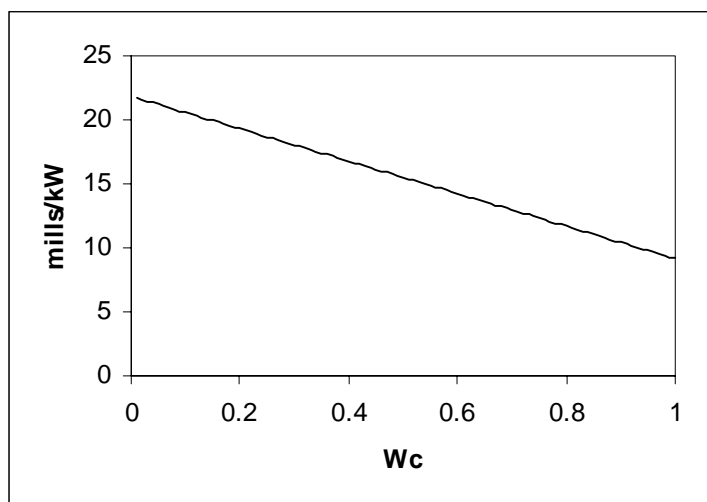


Figura N°2. 7. Costos marginales sistema de tres unidades ($F_{carga}=0,71$)

En las figuras 2.6 y 2.7 se presentan las variaciones de los costos marginales en función de w_c . Como es de esperar, estos costos aumentan a medida que w_c disminuye, debido a que cada vez se le da mayor importancia a la minimización emisiones de SO_2 que a minimizar solamente los costos.

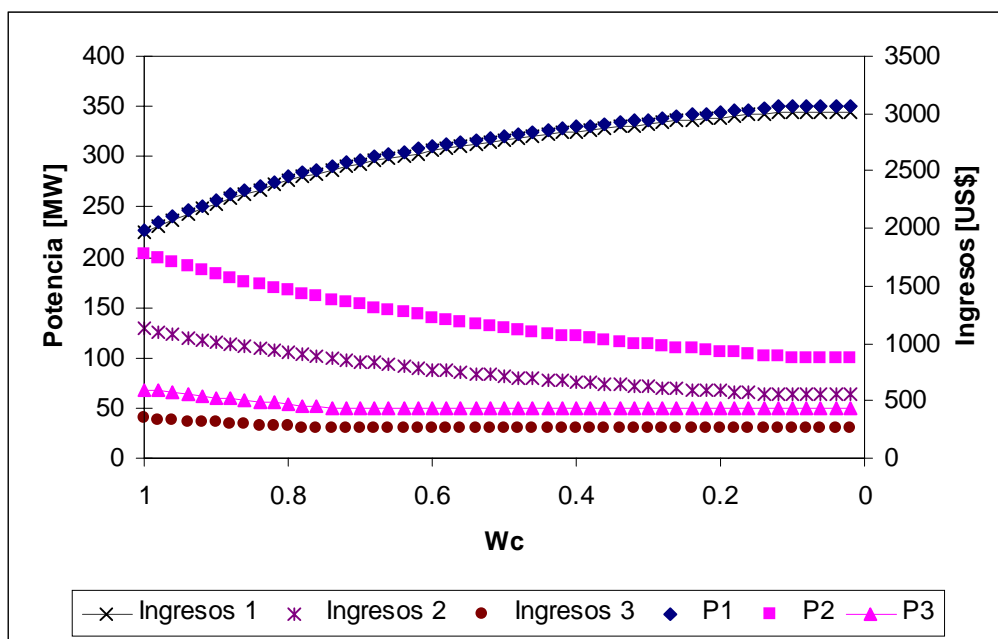


Figura N°2. 8. Ingresos sistema de tres unidades ($F_{carga}=0,42$)

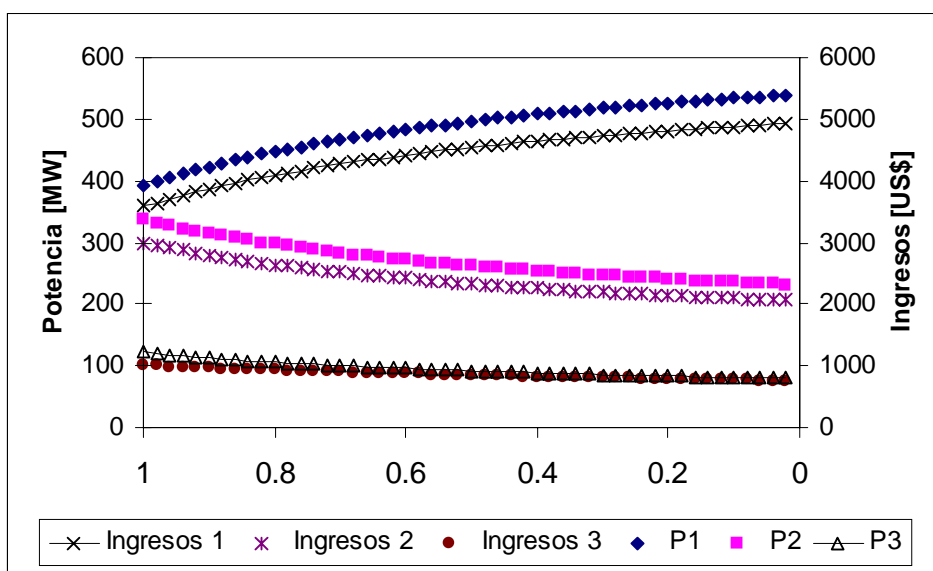


Figura N°2. 9. Ingresos sistema de tres unidades ($F_{carga}=0,71$)

En los gráficos 2.8 y 2.9 se muestran las potencias generadas e ingresos ($P_{gen} * C_{marg}$) de las unidades para cada par de valores de los ponderadores w . De los resultados obtenidos se deduce que la unidad uno es la más limpia, puesto aumenta su generación a medida que disminuye w_c ; la unidad 2 es la que produce más emisiones por unidad generada, y la unidad 3 a pesar de ser la más cara no es la más limpia.

Además, se observa que la central más limpia aumenta sus ingresos, mientras que las centrales más sucias lo disminuyen respecto al caso de no considerar las emisiones de SO_2 .

2.4.2 Sistema de 17 unidades

Nuevamente se realizan estudios en el sistema con dos potencias de carga diferentes. Las potencias de carga utilizadas son de 3.500 [MW] y 6.000 [MW], con un factor de carga del sistema igual a 0,41 y 0,7 respectivamente.

Tabla N°2. 9. Despacho económico en sistema de 17 unidades ($w_c=1$)

Unidad	Pcarga = 500 [MW]			Pcarga = 850 [MW]		
	Potencia [MW]	Emisión SO2 [Kg]	Costo [US\$]	Potencia [MW]	Emisión SO2 [Kg]	Costo [US\$]
1	100	753	1796	600	4282	10215
2	100	731	1756	165	1192	2861
3	100	763	1766	218	1616	3741
4	197	1388	3233	400	2787	6492
5	123	2367	2264	299	5435	5198
6	92	1734	1667	200	3601	3461
7	100	1659	2183	100	1659	2183
8	234	3878	3878	250	4134	4134
9	194	3671	3537	320	5845	5632
10	199	982	3601	325	1553	5696
11	258	2483	4222	300	2871	4881
12	190	1762	2996	190	1762	2996
13	200	1928	3278	317	3074	5226
14	238	2274	3865	448	4332	7365
15	414	1894	6876	414	1894	6876
16	548	2078	8447	1000	3906	15881
17	214	4566	3713	454	9486	7713
Total	3500	34911	59076	6000	59430	100552

Tabla N°2. 10. Despacho ambiental en sistema de 17 unidades ($w_s=1$)

Unidad	Pcarga = 500 [MW]			Pcarga = 850 [MW]		
	Potencia [MW]	Emisión SO2 [Kg]	Costo [US\$]	Potencia [MW]	Emisión SO2 [Kg]	Costo [US\$]
1	197	1432	3415	600	4282	10215
2	128	926	2223	500	4235	10164
3	133	992	2298	500	4073	9432
4	359	2500	5824	400	2787	6492
5	50	1220	1167	50	1220	1167
6	85	1619	1556	85	1619	1556
7	100	1659	2183	100	1659	2183
8	100	1845	1845	108	1964	1964
9	153	3028	2917	153	3028	2917
10	400	1930	7078	400	1930	7078
11	80	915	1555	300	2871	4881
12	100	1022	1738	190	1762	2996
13	100	1063	1807	700	7859	13360
14	100	1071	1821	500	4886	8305
15	414	1894	6876	414	1894	6876
16	1000	3906	15881	1000	3906	15881
17	0	726	590	0	726	590
Total	3500	27750	60775	6000	50703	106060

Tabla N°2. 11. Despacho económico ambiental en sistema de 17 unidades

Unidad	Pcarga = 500 [MW], Wc=0,42			Pcarga = 850 [MW], Wc=0,5		
	Potencia [MW]	Emisión SO2 [Kg]	Costo [US\$]	Potencia [MW]	Emisión SO2 [Kg]	Costo [US\$]
1	158	1159	2765	600	4282	10215
2	125	905	2173	500	4235	10164
3	144	1066	2468	500	4073	9432
4	390	2714	6322	400	2787	6492
5	50	1220	1167	82	1718	1643
6	85	1619	1556	85	1619	1556
7	100	1659	2183	100	1659	2183
8	100	1845	1845	229	3801	3801
9	153	3028	2917	169	3281	3161
10	400	1930	7078	400	1930	7078
11	80	915	1555	300	2871	4881
12	101	1030	1751	190	1762	2996
13	100	1063	1807	531	5551	9436
14	100	1071	1821	500	4886	8305
15	414	1894	6876	414	1894	6876
16	1000	3906	15881	1000	3906	15881
17	0	726	590	0	726	590
Total	3500	27752	60757	6000	50981	104691

Al comparar las tablas 2.9, 2.10 y 2.11 puede deducirse cuales unidades son “menos contaminantes”. Estas corresponden a las que al aumentar la importancia de la función de emisiones en la función objetivo (w_s aumenta), aumentan sus potencias generadas, excepto cuando en el despacho económico puro se encuentran operando en su potencia máxima.

Debe notarse que esta situación de “menos contaminante” es relativa, y depende básicamente de dos factores: las emisiones de las unidades restantes y, del punto de operación de la unidad, puesto que las funciones de costos y de emisiones se modelan con funciones de segundo grado.

Además, puede observarse que la unidad 15 es económica y limpia (menos contaminante) pues en todos los casos genera su potencia máxima; y que la unidad 7 es costosa y produce más emisiones puesto que en todos los casos opera en su mínimo.

Tabla N°2. 12. Comparación de emisiones y costos en sistema de 17 unidades

Pcarga = 3.500 [MW]			Pcarga = 6.000 [MW]		
Wc	Emisión SO2 [Kg]	Costo Total [US\$]	Wc	Emisión SO2 [Kg]	Costo Total [US\$]
1	34911	59076	1	59430	100552
0.42	27752	60757	0.5	50981	104691
0	27750	60775	0	50703	106060

En la tabla 2.12 se observan las emisiones y costos de los tres casos detallados.

Esta vez, comparado al despacho económico tradicional, el despacho ambiental reduce hasta un 20,51% ($F_{carga}=0,41$) las emisiones de SO_2 con un aumento de 2,88% el costo del sistema, lo que equivale a US\$ 237/ton.

Al utilizar la curva de equilibrio puede encontrarse un despacho económico ambiental en el que la disminución de emisiones no signifique un costo tan alto. Por ejemplo, con una carga de 3.500 MW y $w_c=0,81$, se logra una disminución de 18,43% en las emisiones, con un aumento de 1,44% en los costos, que equivale a US\$ 132/ton.

En las figuras 2.10 y 2.11 se encuentran las curvas de equilibrio para las dos cargas del sistema y sus correspondientes tasas de disminución de emisiones.

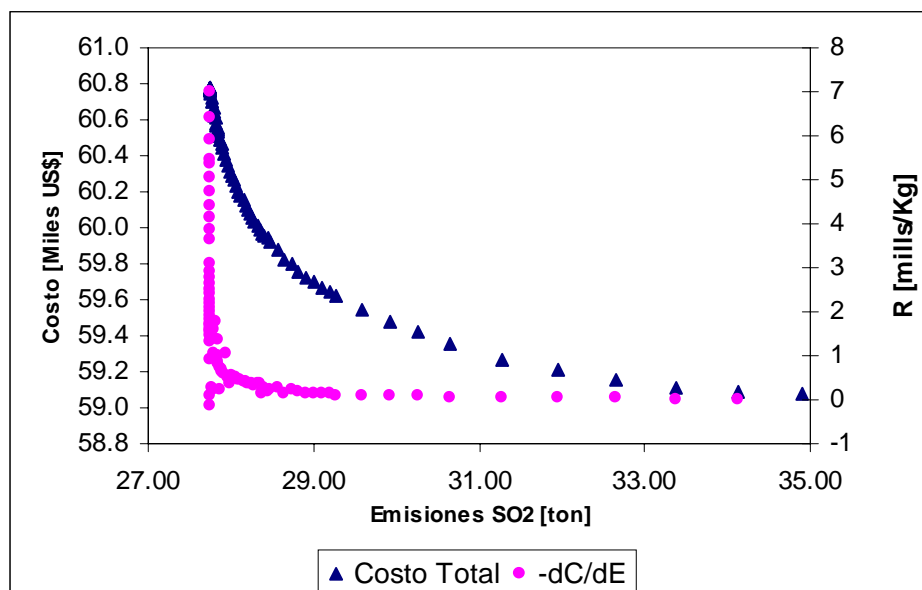


Figura N°2. 10. Curva de equilibrio y tasa de disminución de emisiones (17 unidades, $F_{carga}=0,41$)

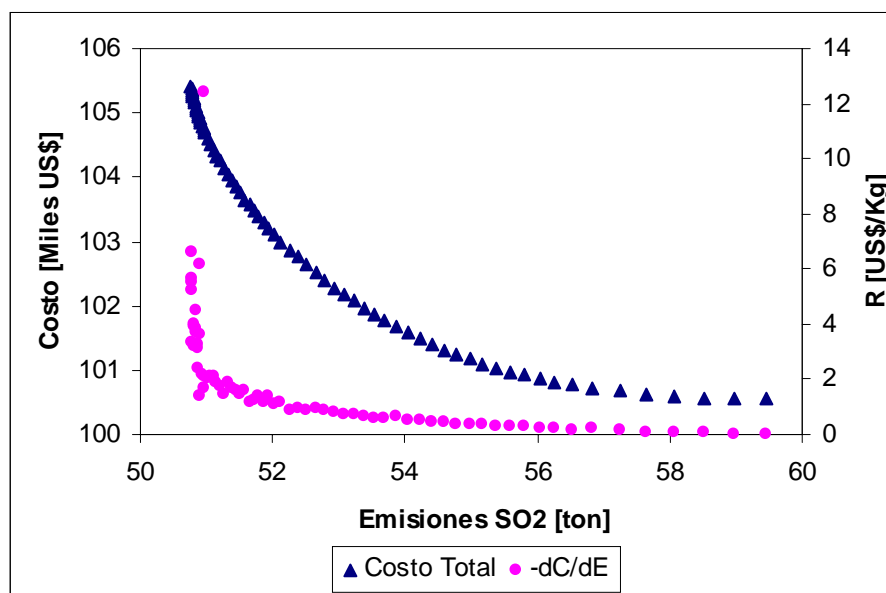


Figura N°2. 11. Curva de equilibrio y tasa de disminución de emisiones (17 unidades, $F_{carga}=0,7$)

Por tratarse de un sistema con mayor número de unidades, estas curvas de equilibrio son más parecidas a la curva de equilibrio ideal (figura 2.1). Es notorio que para las primeras iteraciones (sector derecho de las figuras 2.10 y 2.11) es posible disminuir las emisiones del sistema sin elevar significativamente el costo del sistema.

La variación de los costos marginales (figura 2.12), en el caso con potencia de carga menor, es diferente a la obtenida en todos los otros casos. Los costos marginales no disminuyen monótonamente a medida que w_c aumenta.

Esta situación se produce puesto que, debido a que se utiliza un modelo de despacho, todas las centrales del sistema deben generar aunque sea su potencia mínima y, en este caso, los costos marginales de estas unidades son mayores a los del sistema.

En la tabla 2.10 (despacho ambiental puro) puede observarse que hay 10 unidades generando en su mínimo, mientras que en la tabla 2.9 (despacho económico puro) solamente una unidad opera en su mínimo. A medida que w_c disminuye, estas centrales quedan generando en su mínimo, por lo que no “marginan”, lo que hace que el costo marginal del sistema disminuya, pero que el costo total sea mayor que en el caso inicial.

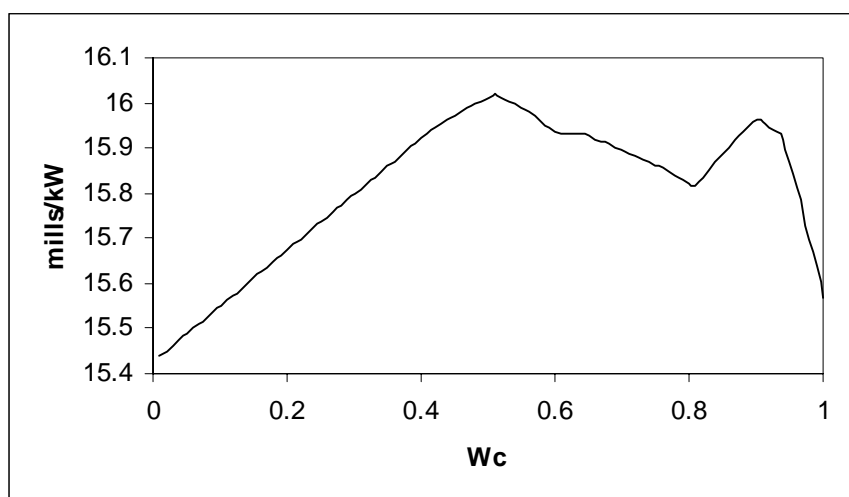


Figura N°2. 12. Costos marginales sistema de 17 unidades ($F_{carga}=0,41$)

Sin embargo, se aprecia que cuando el sistema opera con una potencia de carga mayor, la variación de los costos marginales (figura 2.13) es idéntica a la presentada por el sistema de tres unidades: disminuye a medida que la función de emisiones disminuye su relevancia en la función objetivo (w_c aumenta).

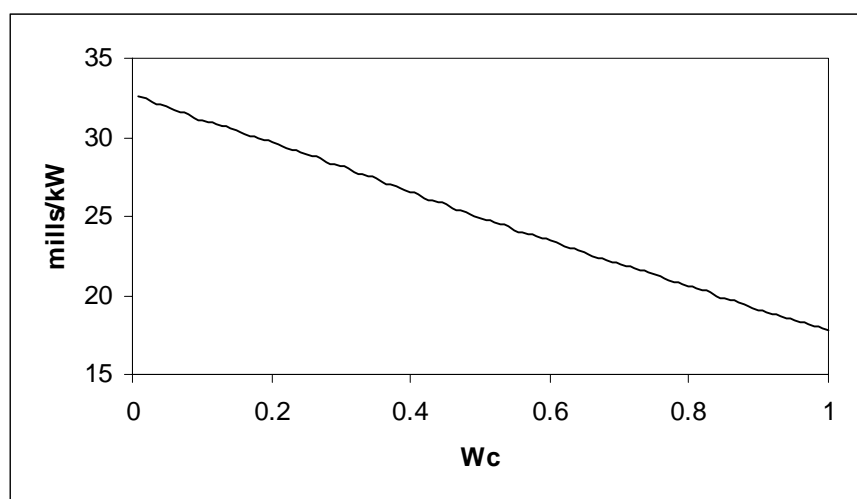


Figura N°2. 13. Costos marginales sistema de 17 unidades ($F_{carga}=0,7$)

En este caso se grafican las potencias e ingresos sólo de dos centrales del sistema, una que disminuye la potencia generada a medida que w_c disminuye, es decir, una unidad que produce más emisiones relativas (Unidad 8), y una que aumenta su generación a medida que disminuye w_c (Unidad 10), lo que implica que es una central menos contaminante que la anterior.

En la figura 2.14 se aprecia que ambas centrales generan aproximadamente lo mismo en un despacho económico tradicional, en cambio cuando se consideran las emisiones de SO_2 , sus generaciones cambian notoriamente. La unidad 8 disminuye su potencia generada y sus ingresos, aunque la variación de estos últimos no es tan pronunciada como la variación de la generación. La unidad 10, en cambio, aumenta sus ingresos y generación aproximadamente de la misma manera.

En la figura 2.15 las potencias generadas inicialmente ($w_c=1$) no son semejantes como en el caso anterior debido a que la unidad 8 tiene una potencia máxima menor a la de la unidad 10. Aún así, se observa que la unidad 8 disminuye su generación a medida que w_c disminuye, al contrario de la unidad 10, que la aumenta.

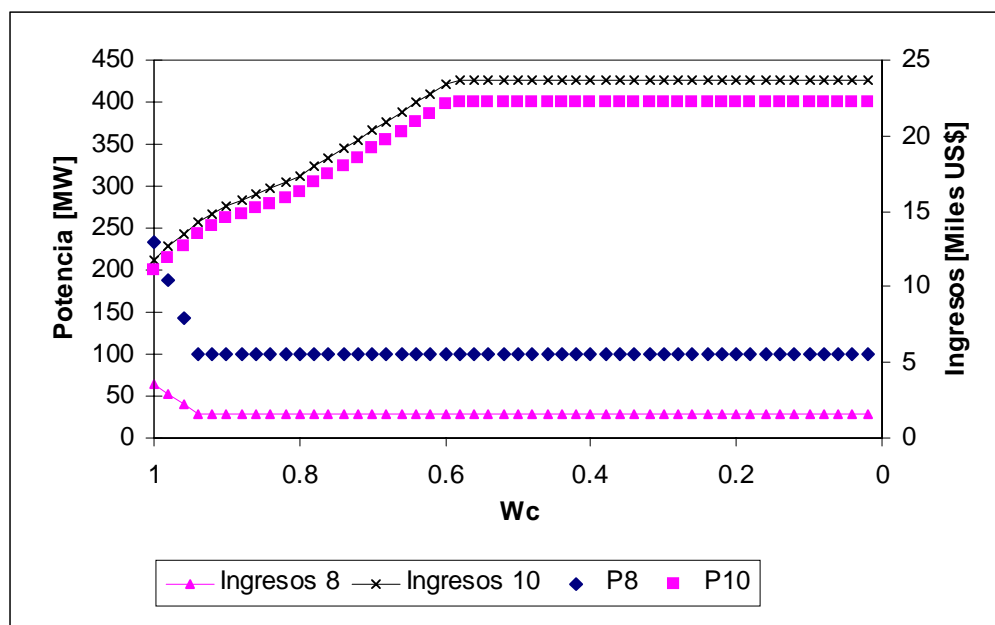


Figura N°2. 14. Ingresos sistema de 17 unidades ($F_{carga}=0,41$)

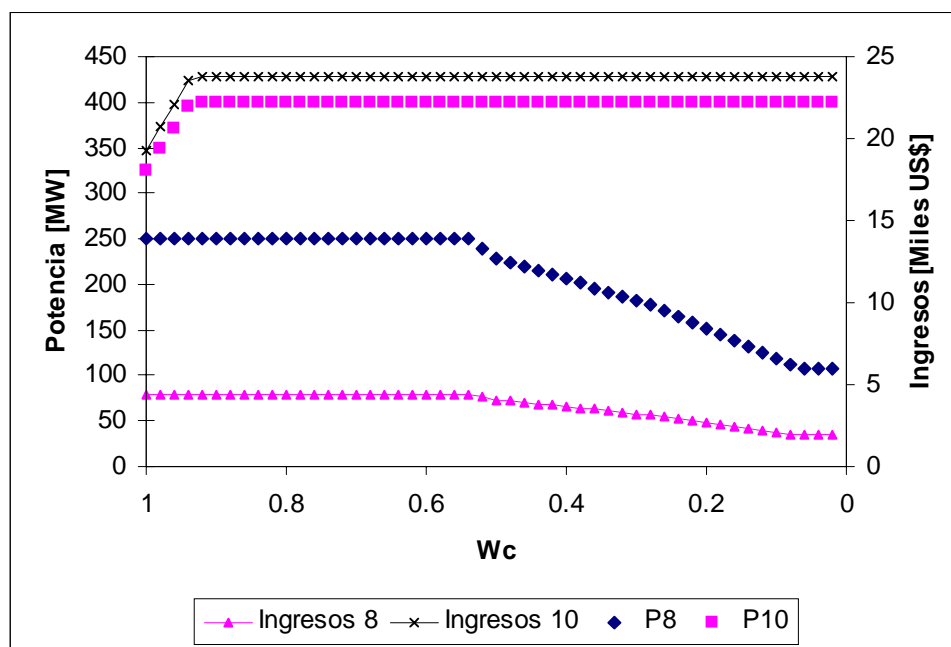


Figura N°2. 15. Ingresos sistema de 17 unidades ($F_{carga}=0,7$)

2.4.3 Análisis, conclusiones y trabajo futuro

En el estudio de los dos sistemas se utilizaron dos potencias de carga para cada uno, observando las potencias generadas por unidad, las emisiones totales del sistema, los costos totales del sistema y los costos marginales.

Se compararon las emisiones y costos totales de tres situaciones: despacho económico tradicional, despacho ambiental puro y despacho económico ambiental.

En todos los casos se observa que es posible mejorar, desde el punto de vista ambiental y económico, la solución entregada por los despachos económico y ambiental puros, al utilizar un despacho “intermedio”, es decir, cuando se consideran ambas

funciones, de costo y emisiones, para realizar la planificación de la operación del sistema.

Este despacho económico ambiental “intermedio” puede fijarse entregando al modelo utilizado una restricción de emisiones totales del sistema o una restricción de costos totales permitidos para el sistema.

Puede concluirse que mientras mayor es la cantidad de unidades del sistema, mayor será la disminución que se puede lograr con el despacho económico ambiental, mientras que la potencia de carga del sistema también afecta a los resultados que se obtienen. Cuando se trabaja con una potencia de carga menor, la disminución de emisiones puede ser mucho mayor, debido a que el sistema tiene más posibilidades de generación.

Al utilizar el despacho económico ambiental, las unidades más limpias se ven beneficiadas con un aumento en sus generaciones, que trae consigo un aumento en sus ingresos. No así las centrales que contaminan más respecto a las demás del sistema. Estas se ven afectadas por una disminución en sus generaciones e ingresos, lo que las obligará a utilizar métodos para disminuir sus emisiones o cambiar de tecnologías de generación de electricidad a sistemas más limpios, pero a la vez, cuidando sus costos.

Un aspecto del modelo propuesto que merece mayor desarrollo es el lazo interno del algoritmo, que utiliza búsqueda en λ , puesto que este lazo no posee una buena convergencia. La convergencia del algoritmo depende mucho del valor inicial y la constante para el segundo valor, entregados al modelo, lo que varía mucho con la potencia de carga, el tipo y número de unidades del sistema. Este algoritmo puede ser reemplazado por el método del gradiente de Cauchy o por el método de Newton, que poseen una mayor convergencia.

Otros desarrollos en este tema se encuentran en el tema del predespacho de unidades considerando las emisiones de contaminantes producidos por la generación de electricidad. Para realizar el predespacho deben respetarse muchas otras restricciones (reserva de generación, tiempos mínimos de partida y detención, costos de partida y

detención, procesos de sincronización), lo que hace que un modelo de este tipo sea mucho más complejo que el de despacho.

Además, para utilizar un método como el presentado en el sistema eléctrico chileno será necesario incluir las centrales hidroeléctricas, es decir, transformar el despacho térmico en despacho hidrotérmico. Nuevamente la dificultad de esto se presenta en el aumento de complejidad, debido a la introducción en el sistema de las centrales hidráulicas de pasada y de embalse, con sus respectivas restricciones.

3 PROGRAMACIÓN HIDROTÉRMICA EN EL SISTEMA INTERCONECTADO CENTRAL CONSIDERANDO COSTOS AMBIENTALES

Este trabajo contribuye con una evaluación cuantitativa del impacto que los costos de control de la contaminación atmosférica producida por las centrales termoeléctricas en el principal sistema eléctrico chileno tienen en la operación del sistema. Con este objetivo, se utiliza el modelo Gestión Óptima del Laja (GOL), utilizado por la Comisión Nacional de Energía (CNE) para el cálculo de los precios de nudo del SIC. El modelo GOL es la base sobre la cual se construyó el modelo Operación Mensual del Sistema Interconectado Central (OMSIC), hoy en utilización por el CDEC-SIC para la programación de la operación del SIC.

3.1 Antecedentes Generales del CDEC-SIC

La planificación de la operación de las unidades generadoras de los sistemas eléctricos interconectados debe ser realizada por los "Centros de Despacho Económico de Cargas" (CDEC). En particular, para el Sistema Interconectado Central (SIC), la planificación es ejecutada por el CDEC-SIC [12][5].

La creación del CDEC-SIC obedece a la necesidad de compatibilizar, por una parte, la operación del sistema de tarificación a costo marginal establecido en la Ley General de Servicios Eléctricos de 1982 y por otra parte, el cumplimiento de suministros suscritos por las empresas generadoras integrantes con la operación a mínimo costo del conjunto del parque generador del sistema.

Este organismo, en la actualidad, está integrado por siete empresas, la Empresa Nacional de Electricidad S.A. (ENDESA), Gener S.A., Empresa Eléctrica Colbún-Machicura S.A., Empresa Eléctrica Pehuenche S.A., Empresa Eléctrica Guacolda S.A., Empresa Eléctrica Pangue S.A., Arauco Generación S.A., Sociedad Eléctrica Santiago S.A. y San Isidro S.A..

Cada empresa productora integrante del CDEC-SIC, debe estar en condiciones de satisfacer en cada año su demanda de energía bajo condiciones de hidrología seca, en sus centrales hidroeléctricas, y considerando su disponibilidad promedio en sus unidades térmicas. Además de considerar la capacidad de generación propia, para la programación de la operación se toman en cuenta los suministros de otras entidades generadoras, sean o no miembros del CDEC-SIC, que operen en sincronismo con el sistema y cuya producción parcial o total le haya sido asegurada mediante un contrato suscrito a precio convenido libremente.

La demanda de energía a considerar corresponde a la suma de todos los suministros de energía previstos, ya sea para sus propios clientes o bien para otros integrantes del CDEC-SIC, y las pérdidas de transmisión respectivas.

El criterio de optimización que aplica el CDEC-SIC para operar el sistema consiste en minimizar el costo global actualizado de operación y falla, preservando la seguridad de servicio del sistema eléctrico. La existencia de un embalse de regulación interanual de la importancia del Lago Laja obliga a estudiar la operación con horizontes de al menos dos años de operación a futuro. Su importancia obedece a que el costo marginal del sistema es función principalmente del volumen de agua almacenada en este embalse, como consecuencia de su carácter de regulación interanual que le permite almacenar agua a futuro. Por esta razón, le puede asociar un valor a su agua embalsada en función de la energía térmica que pueda desplazar posteriormente.

Además, se modela la regulación de otros embalses de menor tamaño, debido a que la programación de la operación se realiza semanalmente (4 etapas semanales y el

resto mensual). A estos embalses también se les asocia un valor a su agua. Adicionalmente, se realiza una programación diaria y un despacho de carga instantáneo basado en el costo de producción de cada una de las unidades del sistema, por lo que el CDEC-SIC se encuentra tarifando sus transferencias de energía entre integrantes con costos marginales horarios.

La optimización de la operación del conjunto del parque generador y la existencia de contratos de suministro de cada empresa generadora con clientes directos, origina transferencias de energía entre las empresas productoras. Estas transferencias se valorizan al costo marginal horario del sistema.

El CDEC en la actualidad no considera costos de control de la contaminación en la planificación de la operación del sistema y es interés de este trabajo evaluar el impacto de considerarlos.

3.2 Modelo GOL

En los primeros años, después de la creación del CDEC-SIC, la planificación de la operación de las centrales generadoras se realizaba en base al modelo de Gestión Óptima del Laja (GOL) [29].

El GOL corresponde a un modelo de programación hidrotérmica que utiliza la técnica de programación dinámica estocástica para la optimización. Algunas de sus características más importantes son:

- El consumo está concentrado en una barra única.
- La demanda se representa a través de un bloque de energía y una punta de potencia.

- Optimiza las extracciones del Lago Laja, de modo de minimizar el costo actualizado esperado de la generación termoeléctrica y de falla en todo el horizonte de planificación.

- Las centrales termoeléctricas son representadas por una función de costo lineal por tramos, en la cual la pendiente corresponde al costo unitario de una central termoeléctrica. Se representan sólo sus costos variables, que se suponen independientes de su nivel de carga.

$$C_{variable} = C_{var\ no\ comb} + Rend \cdot C_{var\ comb}$$

donde

$C_{var\ no\ comb}$: Costos variables no combustibles en mills/kWh
 $Rend$: Consumo específico de la unidad en Kg/kWh
 $C_{var\ comb}$: Consumo combustible en US\$/ton

- El costo de falla está modelado con una función lineal con tres tramos.
- La aleatoriedad hidrológica está representada por una muestra estadística de 40 años hidrológicos y existe dependencia estadística al interior del año.
- Utiliza criterio de azar- decisión.
- Utiliza etapas trimestrales.

En el modelo GOL la optimización se realiza únicamente sobre el lago Laja, considerando el resto de las centrales de embalse como centrales de pasada.

El procedimiento seguido para programar la operación con el modelo GOL es el siguiente:

1. Mensualmente se efectúa una corrida del modelo actualizando los precios de combustibles de las unidades térmicas, mantenimientos de unidades y los consumos de energía. De esta corrida del modelo, se obtiene el costo marginal esperado asociado a la cota inicial del trimestre.

2. Con el costo marginal esperado, se define la generación térmica requerida con las curvas de consumo incremental de ellas.

3. El aporte de las centrales hidráulicas de pasada se obtiene a partir de estimaciones basadas en la condición hidrológica imperante cada mes.

4. El aporte de las centrales de embalse de menor regulación es determinado por cada empresa individualmente. Para ello, cada empresa propietaria de un embalse dispone de un modelo de operación para éste, a partir del cual determina la consigna de generación para el mes.

5. Una vez terminados los aportes de las centrales térmicas e hidráulicas, el aporte del lago Laja se obtiene como energía. Se efectúan correcciones en la colocación de los embalses con capacidad de regulación disponible.

Con este procedimiento se realizó la programación de la operación hasta 1989, donde se presentó un período de sequía extrema por lo que se debió abandonar este procedimiento para evitar fallas en el abastecimiento de la energía.

Desde octubre de 1991 entró en funcionamiento el modelo de Operación Mensual del Sistema Interconectado Central (OMSIC), a modo de alternativa al GOL. Este nuevo modelo incorporó las siguientes modificaciones:

1. Las etapas son mensuales
2. Se supone independencia estadística en el período de invierno, meses de abril a septiembre, y dependencia estadística en el período de deshielos, de octubre a marzo.
3. Permite utilizar en la optimización una condición o grupo de condiciones hidrológicas en la primera etapa.

Los demás supuestos del GOL se mantuvieron inalterados.

3.2.1 Cálculo de precios de nudo

Los precios de nudo de energía son calculados por la Comisión Nacional de Energía (CNE) cada seis meses utilizando el modelo GOL con un período de estudio de diez años (hidrológicos²), con la cota inicial para el Lago Laja de abril del primer año del estudio. Se calcula un promedio ponderado de los primeros 16 trimestres del estudio, contados desde abril del primer año, de donde se obtiene el precio básico de nudo de la energía.

El precio básico de la energía corresponde a los nudos San Isidro y Cerro Navia – Alto Jahuel, el precio de los nudos restantes se calculan aplicando factores de penalización obtenidos de un estudio realizado por la CNE.

3.3 Introducción de Costos de Control de Emisiones en GOL

El objetivo del estudio es evaluar la incorporación de los costos de control de emisiones en el modelo GOL y su impacto en la operación del SIC. Para estos efectos se utilizaron costos variables de operación asociados a equipos de control de emisiones de gases contaminantes utilizados en plantas termoeléctricas convencionales.

Los costos de inversión por control de la contaminación serán relevantes en la evaluación social del parque generador óptimo futuro [26]. Para los efectos de evaluación de la operación económica del SIC sólo interesan los costos variables, de hecho, el modelo GOL incorpora sólo los costos variables de las centrales térmicas. En la referencia [2] se detallan los costos de inversión y operación de equipos de control de

² Un año hidrológico es desde abril de un año hasta marzo del año siguiente

emisiones de gases y partículas, de los cuales solamente los equipos de control de SO₂ incluyen costos variables (tabla 3.1), por lo que en este caso son los únicos que pueden incluirse en el análisis.

Tabla N°3. 1. Costos variables de operación de equipos de control de SO₂

Tipo de sistema	Eficiencia	Costos de operación variables	
	%	US\$/ton SO ₂	mills/kWh
1. Wet FGD ³	90	80-120	0,7-1,0
2. Dry injection ⁴	95	200-400	1,7-3,4

La manera en que es posible introducir estos costos es sumándolos directamente a los costos variables no combustibles de las centrales que emiten SO₂, es decir, de las centrales que operan con carbón o petróleo⁵, no es por ende, necesario incluir costos de control para el gas natural. Por lo anterior, los costos variables quedan de la siguiente manera:

$$C_{variable} = C_{var\ no\ comb} + C_{control\ SO_2} + Rend \cdot C_{var\ comb}$$

El costo variable queda expresado en mills/kWh, al igual que los costos variables no combustibles y los costos variables por control de emisiones de SO₂; los costos variables combustibles están expresados en US\$/ton y el rendimiento en Kg/kWh.

³ Sistema descrito en 1.3

⁴ Similar a FGD, pero con absorción en seco

⁵ Una central a petróleo produce una cantidad de SO₂ un poco menor que una a carbón para el mismo % de contenido de azufre

3.3.1 Características del Parque Generador a Modelar

El sistema eléctrico sobre el cual se realizan los estudios corresponde a aquel definido por la Comisión Nacional de Energía en las bases utilizadas para la determinación de los precios de nudo del SIC, correspondientes a la fijación de precios de abril de 1998 [6].

A continuación se detallan los datos que se emplean para los estudios con el modelo GOL.

3.3.1.1 Previsión de demandas

Tabla N°3. 2. Previsión de consumos en el SIC

Año	Producción Neta GWh	Factor de Carga %
1998	25.771	72
1999	27.854	72
2000	29.981	72
2001	32.391	72
2002	35.136	72
2003	38.153	72
2004	41.339	72
2005	44.805	72
2006	48.720	72
2007	52.808	72
2008	57.283	72

Tabla N°3. 3. Factores de repartición trimestral

Trimestre	Energía trimestral/ Energía anual	Demanda max trim/ Demanda max anual
Ene-Mar	0,237	0,882
Abr-Jun	0,255	1,000
Jul-Sep	0,256	0,993
Oct-Dic	0,252	0,923

3.3.1.2 Programa de Obras en el SIC

En el programa de obras se consideran las centrales térmicas necesarias sobre la base de la previsión de demandas de potencia de punta y energía del sistema eléctrico para los siguientes diez años [10]. La determinación de este plan de obras no considera los costos de inversión y operación de equipos de control de emisiones en unidades térmicas ni el impacto ambiental ocasionado por la construcción de centrales hidroeléctricas, los que tendrían consecuencias en el plan [1]. Para efectos de este estudio, se considera el plan de obras determinado por la CNE, así como el determinado por otros investigadores [26], según se detalla en el punto 3.4.

Tabla N°3. 4. Programa de obras en el SIC

Fecha	Obra	Potencia [MW]
Jun de 1998	PetroPower	48,6
Jul de 1998	Central Nehuenco	351,2
Oct de 1998	Central San Isidro	370
Oct de 1998	Central Rucúe	160
Oct de 1999	Central Peuchén	79
Abr de 2000	Central Mampil	52
Abr de 2001	Central Cortaderal	195
Abr de 2002	Central Ralco	570
Ene de 2003	Central a gas ciclo combinado	332,4
Abr de 2004	Central a gas ciclo combinado	332,4
Abr de 2005	Central a gas ciclo combinado	332,4
Ene de 2006	Central a gas ciclo combinado	332,4
Abr de 2006	Central a gas ciclo combinado	332,4
Abr de 2007	Central a gas ciclo combinado	332,4
Ene de 2008	Central a gas ciclo combinado	332,4

3.3.1.3 Costos variables de operación

Los costos utilizados por la CNE, que no incluyen costos de control de emisiones, se resumen en la tabla 3.5. En la tabla 3.6 está el costo de falla entregado por la CNE.

Tabla N°3. 5. Costos variables de operación

Central	Tipo de combustible	Consumo específico Kg/kWh	Costos var no combustibles mills/kWh	Costos de combustibles US\$/ton
Bocamina	Carbón	0,368	1,67	47,97
Ventanas 1	Carbón	0,415	2,18	42,62
Ventanas 2	Carbón	0,397	1,38	42,62
Laguna Verde	Carbón	0,850	7,86	46,92
Huasco	Carbón	0,740	3,64	43,90
Guacolda 1	Carbón	0,360	2,00	45,65
Guacolda 2	Carbón	0,360	2,00	45,65
Renca	Diesel	0,362	3,64	197,87
Turbina a Gas 1	Fuel	0,362	7,29	130,12
Turbinas a Gas 2	Diesel	0,337	0,91	223,47
Turbinas El Indio	Diesel	0,264	1,00	219,02

Central	Combustible	Potencia [MW]	Costo total de generación mills/kWh	CVNC mills/kWh
Central Arauco	Licor negro, biomasa, petróleo	0-54,2	0	0
		54,2-62,2	5	0
		62,2-69	12	0
		69-86	18	0
		86-94	45	0
Central Constitución		0-6	25	0
		6-15	53	0
Centrales Ciclo combinado			mills/kWh	mills/kWh
Central SES	Gas Natural		10,13	1,55
Central Nehuenco	Gas Natural		9,45	2,12
Central San Isidro	Gas Natural		9,65	2,50
Ciclo combinado estándar	Gas Natural		10,21	2,75

Tabla N°3. 6. Costo de falla

Rango	Costo US\$/MWh
0-10%	139,7
10-20%	232,5
Sobre 20%	293,7

3.3.2 Archivos de datos

GOL necesita dos archivos de datos para hacer cada corrida, N.dat, que contiene la información de las centrales térmicas, costo de falla y demanda del sistema; e Hidro.dat, que contiene la información de las centrales hidráulicas.

El modelo GOL que se utiliza posee sólo 4 centrales térmicas, adicionales a las que existen, para incluir las nuevas centrales térmicas del plan de obras. Por este motivo, se tuvieron que modelar varias centrales juntas. En la tabla 3.7 se presentan las centrales térmicas incluidas en el GOL y cuales centrales del Sistema Interconectado Central se incluyeron en cada una.

Tabla N°3. 7. Centrales térmicas en el GOL

Nombre	Centrales del SIC
BOCA	Bocamina
VEN1	Ventanas 1
VEN2	Ventanas 2
RENC	Renca
LVER	Laguna Verde + Huasco
HSCO	Arauco + Constitución
TGAF	Turbina a Gas 1
TGAD	Turbina a Gas 2 + Turbinas El Indio
TER2	Guacolda 1 + Guacolda 2
TER3	SES + Nehuenco + San Isidro
TER4	Todas las centrales de ciclo combinado futuras

Los datos de las centrales combinadas (consumo específico, costos variables no combustibles y costos de combustible) se calcularon en proporción a sus potencias.

Además, se incluyeron las centrales Petropower y Arauco en su rango con costo cero (desde 0 a 54,2 MW) como centrales hidráulicas de pasada, debido a que no tienen costos variables combustibles ni costos variables no combustibles. Los costos variables de las centrales Arauco (desde 54,2 a 94 [MW]) y Constitución se tomaron como un promedio debido a que el modelo no acepta costos por tramo (tabla 3.5) como los que poseen estas centrales.

Se utiliza una cota inicial para el Lago Laja de 1326,41 msnm.

El programa se corre varias veces para obtener los costos marginales, energías generadas por central térmica, energías de falla, etc. Se estudian varios casos, además del original con los datos entregados por la CNE. Se varían los costos no combustibles de algunas centrales, para observar los efectos en costos marginales, energía generada por central, ingresos por empresa y porcentaje de generación hidráulica versus térmica. Además, se utiliza otro programa de obras que pretende incluir todas las externalidades ambientales[1] producidas por la generación eléctrica (Anexo 2).

3.4 Análisis de Resultados

Para el análisis se utilizan dos programas de obras: el programa de obras (PO) que entrega la CNE [6] para el cálculo de precios de nudo de abril de 1998 y un programa de obras modificado (PM). Para la modificación de este último se consideran los costos ambientales del impacto generado por la construcción y operación de las centrales generadoras de energía eléctrica, hidráulicas y térmicas [1].

Con cada programa de obras se estudian cuatro casos, un caso con los costos variables de operación de las centrales térmicas entregados por la CNE [6] (base) y los otros tres según la descripción dada en la tabla 3.8.

Tabla N°3. 8. Descripción de casos analizados con el modelo GOL

PObase	Programa de obras y costos entregados por la CNE
POtec1	Programa de obras entregado por la CNE y costos variables de sistemas de control de emisiones de SO ₂ con tecnología 1 (tabla 3.1) en todas las centrales a carbón y petróleo
POtec2	Programa de obras entregado por la CNE y costos variables de sistemas de control de emisiones de SO ₂ con tecnología 2 (tabla 3.1) en todas las centrales a carbón y petróleo
POpbtec2	Programa de obras entregado por la CNE y costos variables de sistemas de control de emisiones de SO ₂ con tecnología 2 (tabla 3.1) en unidades a carbón y petróleo ubicadas en zonas pobladas ⁶
PMbase	Programa de obras modificado y costos entregados por la CNE
PMtec1	Programa de obras modificado y costos variables de sistemas de control de emisiones de SO ₂ con tecnología 1 (tabla 3.1) en todas las centrales a carbón y petróleo
PMtec2	Programa de obras modificado y costos variables de sistemas de control de emisiones de SO ₂ con tecnología 2 (tabla 3.1) en todas las centrales a carbón y petróleo
PMpbtec2	Programa de obras modificado y costos variables de sistemas de control de emisiones de SO ₂ con tecnología 2 (tabla 3.1) en unidades a carbón y petróleo ubicadas en zonas pobladas

⁶ Las centrales Bocamina, Ventanas, Laguna Verde y Renca se consideran ubicadas en zonas altamente pobladas (Talcahuano, V Región y Santiago).

En los siguientes gráficos se presentan los porcentajes de generación térmica respecto de la generación total, para todos los casos observados.

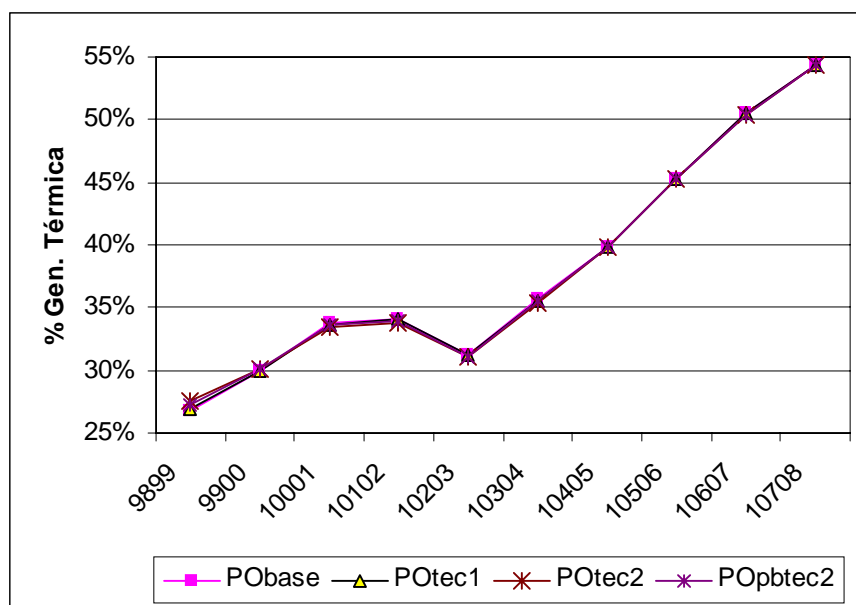


Figura N°3. 1. Porcentajes generación térmica Programa de obras original

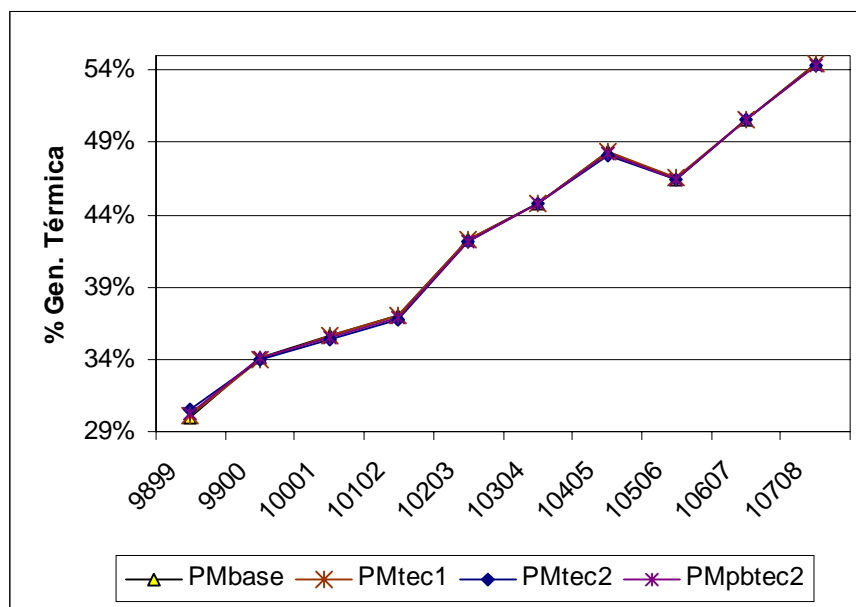


Figura N°3. 2. Porcentajes generación térmica Programa de obras modificado

En las figuras 3.1 y 3.2 no se aprecia mayor diferencia entre los casos base (PObase y PMbase) y los casos en que se incrementaron los costos variables de alguna de las centrales. De esto se concluye que el aporte de generación térmica al sistema depende mucho más del plan de obras que de los costos de las centrales.

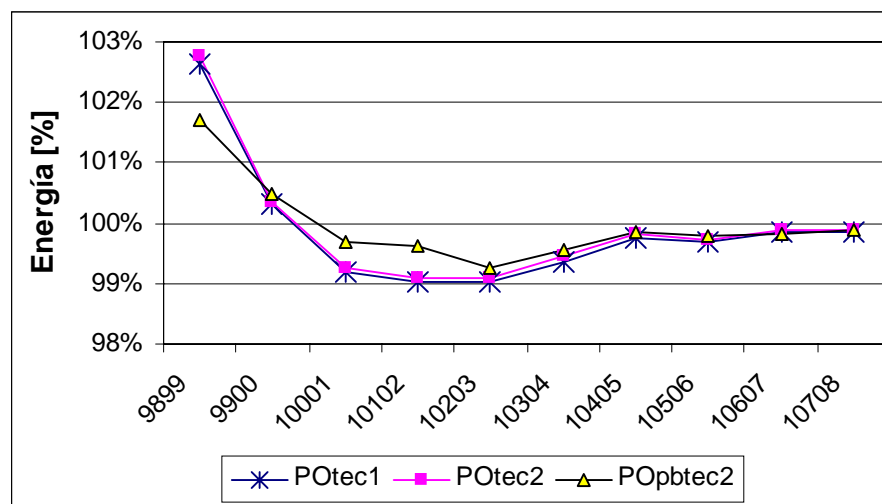


Figura N°3. 3. Porcentajes respecto a caso base Programa de obras original

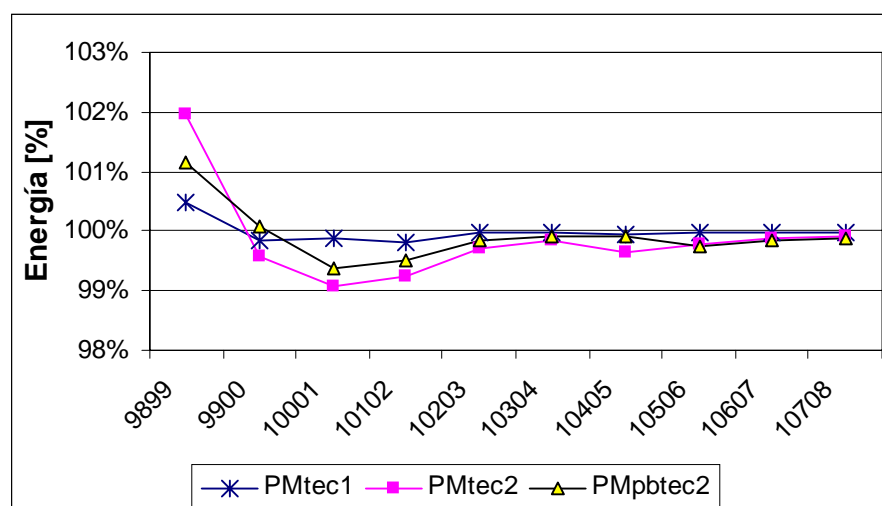


Figura N°3. 4. Porcentajes respecto a caso base Programa de obras modificado

Como consecuencia del aumento de costos variables de las centrales térmicas, se produce un aumento en la generación térmica en los dos primeros años del estudio en los casos con el programa de obras original, respecto del caso base (PObase), y una disminución para los ocho años restantes. En POtec2, cuyos costos variables no combustibles son los mayores e incluyen a todas las centrales a carbón y petróleo, esta variación es más acentuada, es decir, una mayor generación térmica los dos primeros años (respecto al caso base) y una mayor generación hidroeléctrica en los restantes, respecto de los demás casos (figura 3.3).

Con el programa de obras modificado ocurre un efecto similar a excepción de que sólo el primer periodo hidrológico del estudio las generaciones son mayores respecto al caso base (PMbase), lo que se aprecia en la figura 3.4.

Los costos marginales de los casos estudiados se muestran en los siguientes gráficos.

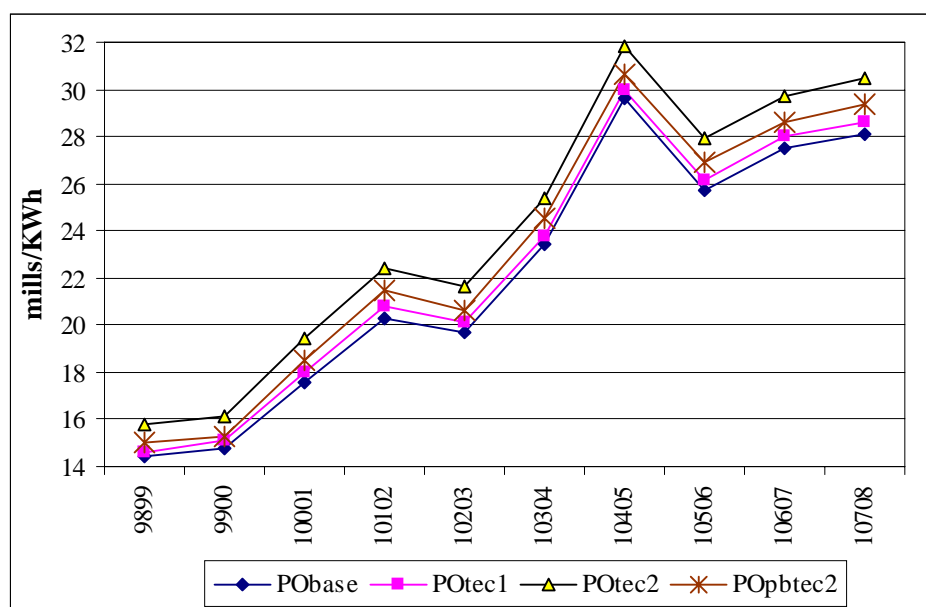


Figura N°3. 5. Costos marginales por año hidrológico Programa de obras original

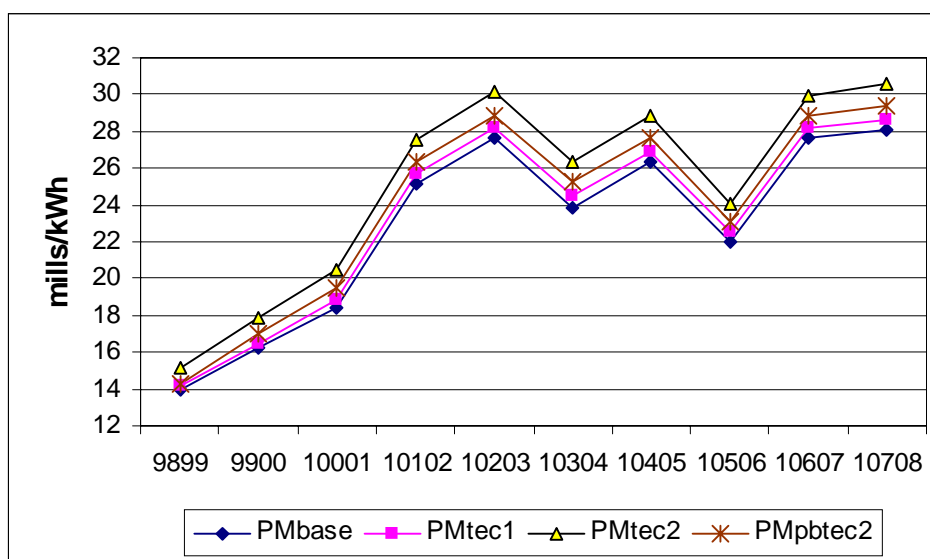


Figura N°3. 6. Costos marginales por año hidrológico Programa de obras modificado

En las figuras 3.5 y 3.6 se encuentran los costos marginales anuales promedio de los diez años del estudio, para cada plan de obras, y en las figuras 3.7 y 3.8, los costos marginales trimestrales de los primeros 16 trimestres, los cuales se utilizan para el cálculo de los precios de nudo. Los resultados numéricos se encuentran en el Anexo 3.

De estas cuatro figuras se puede concluir que siempre que se aumenten los costos variables de las centrales térmicas, el costo marginal aumenta. Los casos en que se utiliza la tecnología 2 (POtec2 y PMtec2) son los que presentan un mayor aumento puesto que sus costos son incrementados en todas las centrales térmicas a carbón y petróleo y en una cantidad mayor que en el caso 1. Los casos POpbtec2 y PMpbtec2, a pesar de haber aumentado más por cada unidad (respecto de los casos POtec1 y PMtec1) entrega costos marginales menores debido a que no todas las centrales fueron afectadas con el alza.

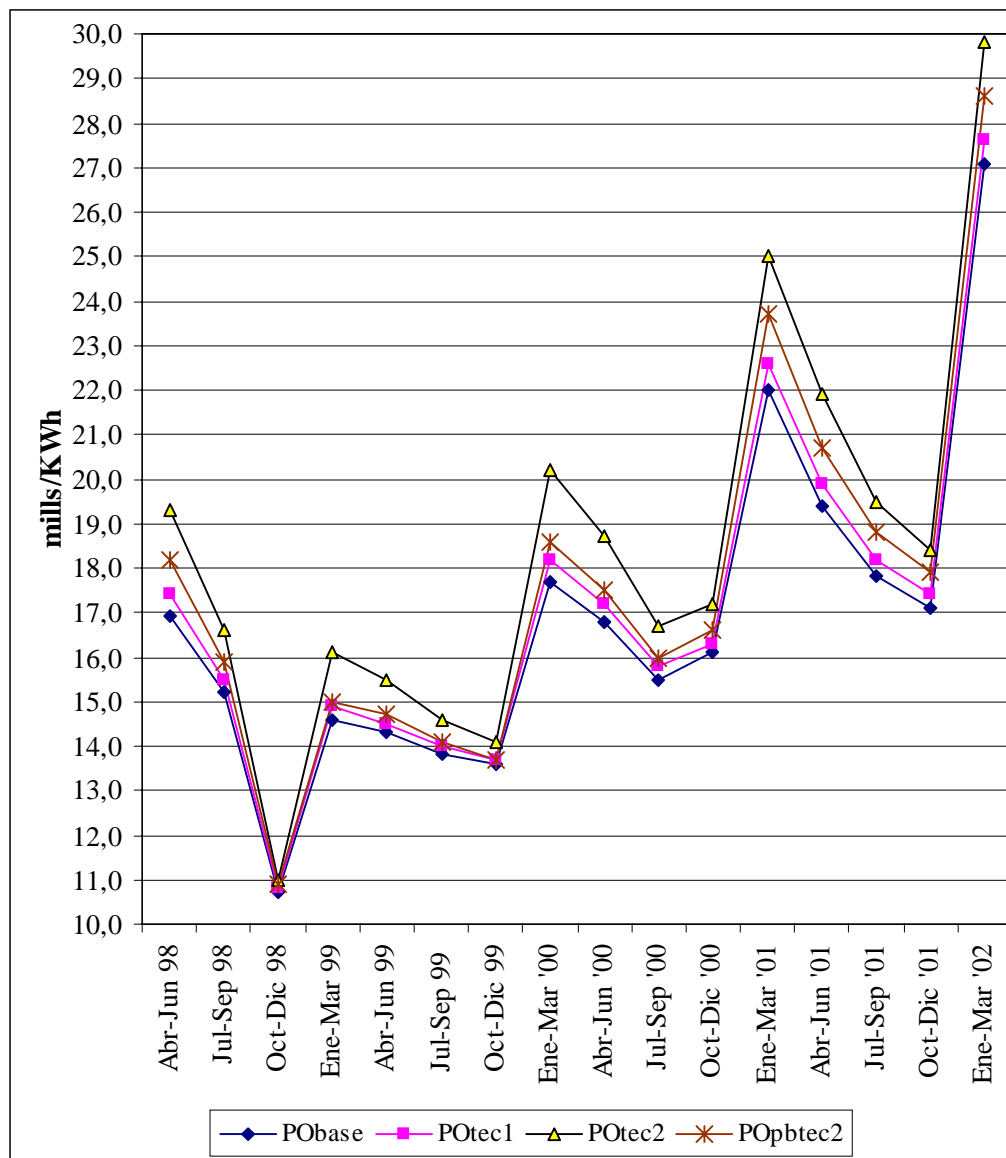


Figura N°3. 7. Costos marginales trimestrales Programa de obras original

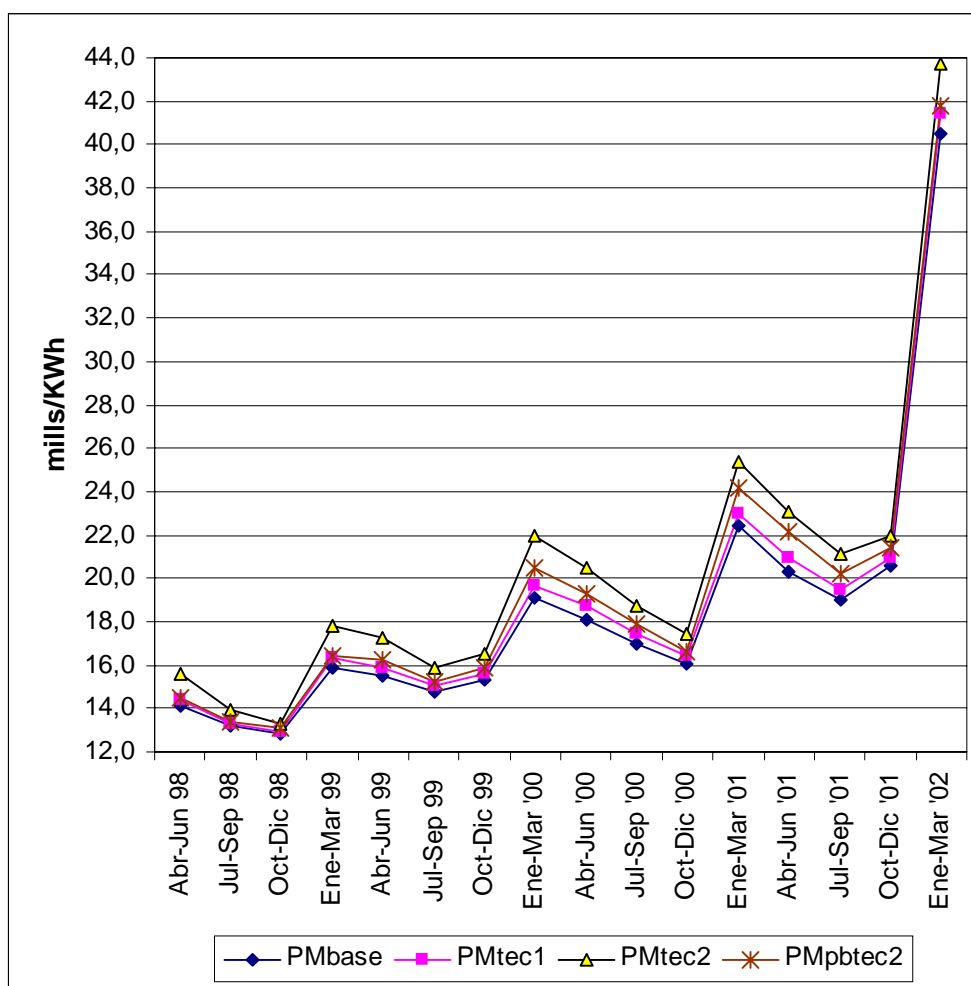


Figura N°3. 8. Costos marginales trimestrales Programa de obras modificado

Nuevamente se observa que la variación de costos marginales depende del plan de obras definido.

En las figuras 3.9 y 3.10 se indican los precios de nudo. Como se explica en 3.2.1, los precios de nudo se calculan con el promedio de los costos marginales de los 16 primeros trimestres. Se observa que los precios de nudo con el programa de obras modificado son mayores que con el programa de obras original, debido a que el primero refleja los costos sociales asociados a la construcción de las centrales hidroeléctricas.

Además, puede concluirse que siempre que se incluyan costos debidos a la contaminación o a impactos en el medio ambiente, el precio de nudo aumenta.

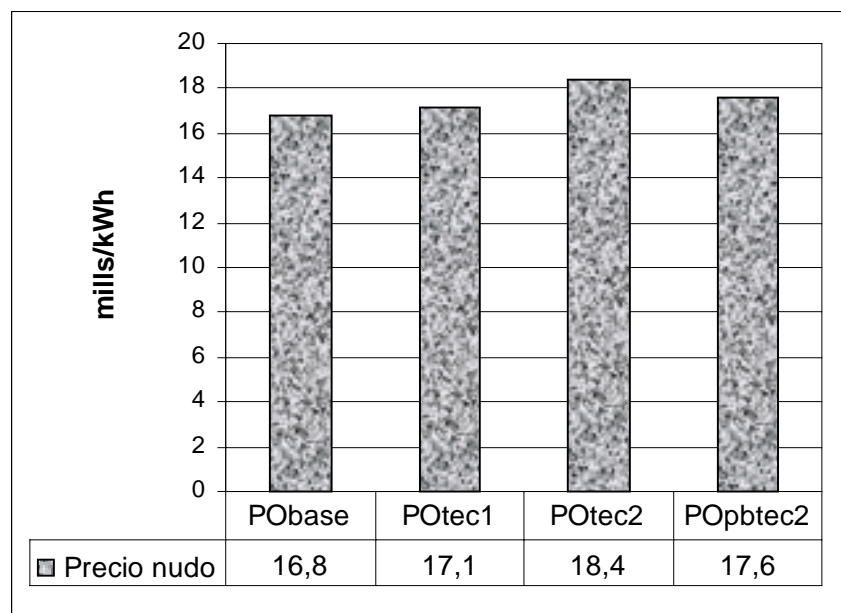


Figura N°3. 9. Precios de nudo Programa de obras original

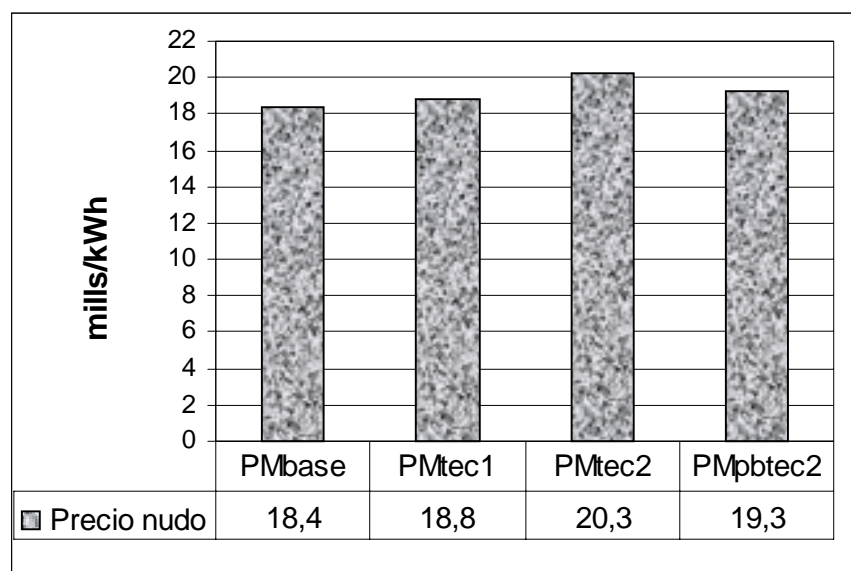


Figura N°3. 10. Precios de nudo Programa de obras modificado

De todos los resultados anteriores se aprecia que, cualquiera sea la forma en que se incluyan los costos de control de emisiones o de costo social por impacto de la contaminación, estos se verán reflejados en los costos marginales de la electricidad, es decir, en el precio de la energía eléctrica.

Para comparar los efectos de la inclusión de costos ambientales en las centrales se observaron las variaciones en la generación de energía de varias centrales con distintos combustibles, carbón (Ventanas 2, Guacolda 1 y 2), petróleo (Renca), licor negro, biomasa y petróleo (Arauco y Constitución) y gas natural (SES, Nehuenco y San Isidro). Las centrales a carbón o petróleo vieron modificados sus costos por el aumento de sus costos variables no combustibles debido a sistemas de control de emisiones, Ventanas y Renca, además, debido a su localización geográfica y las que generan con biomasa y petróleo, y gas natural no sufrieron cambios respecto de los datos entregados por la CNE.

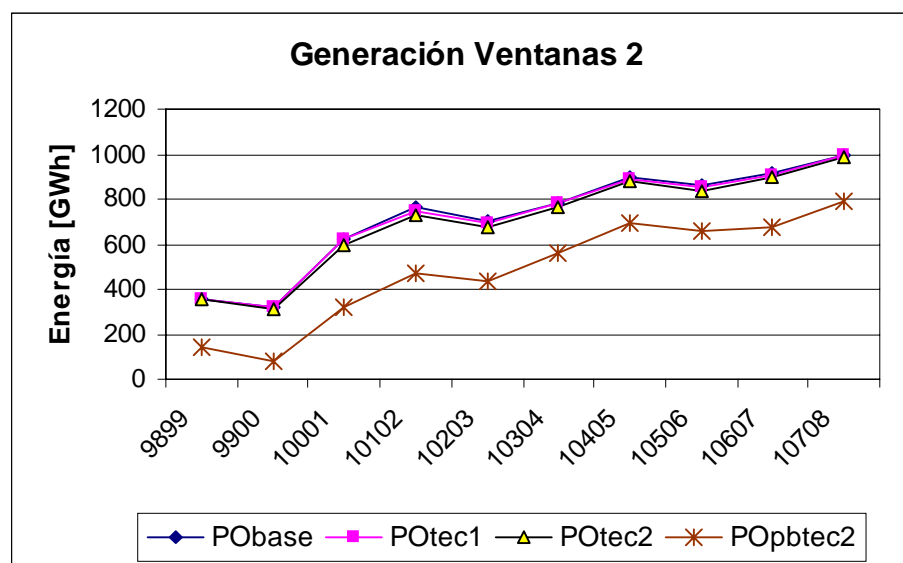


Figura N°3. 11. Generación central a carbón Programa de obras original

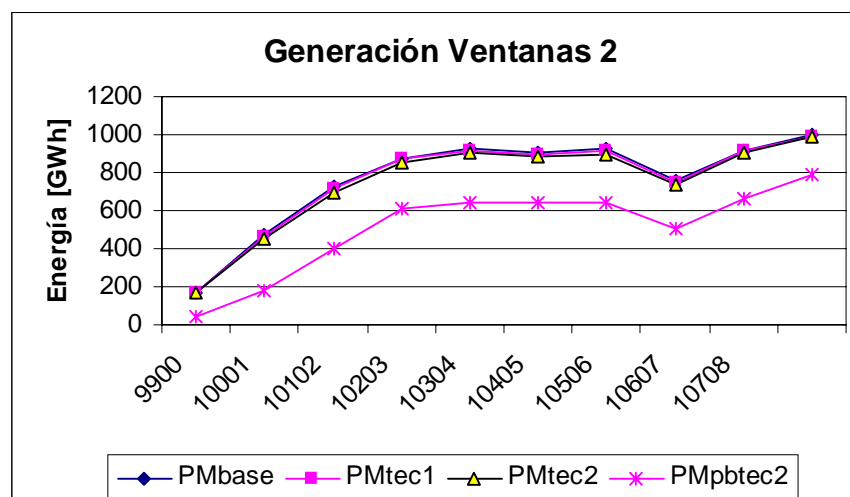


Figura N°3. 12. Generación central a carbón Programa de obras modificado

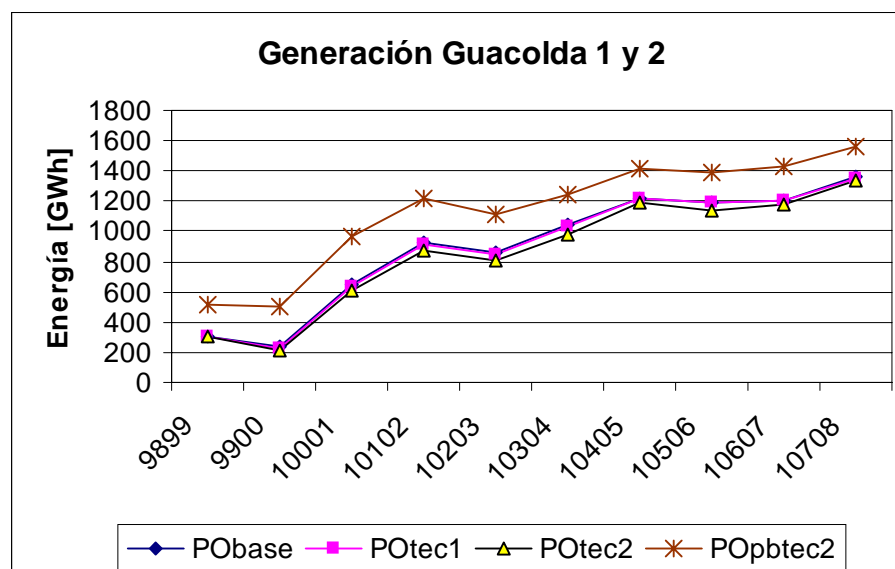


Figura N°3. 13. Generación central a carbón Programa de obras original

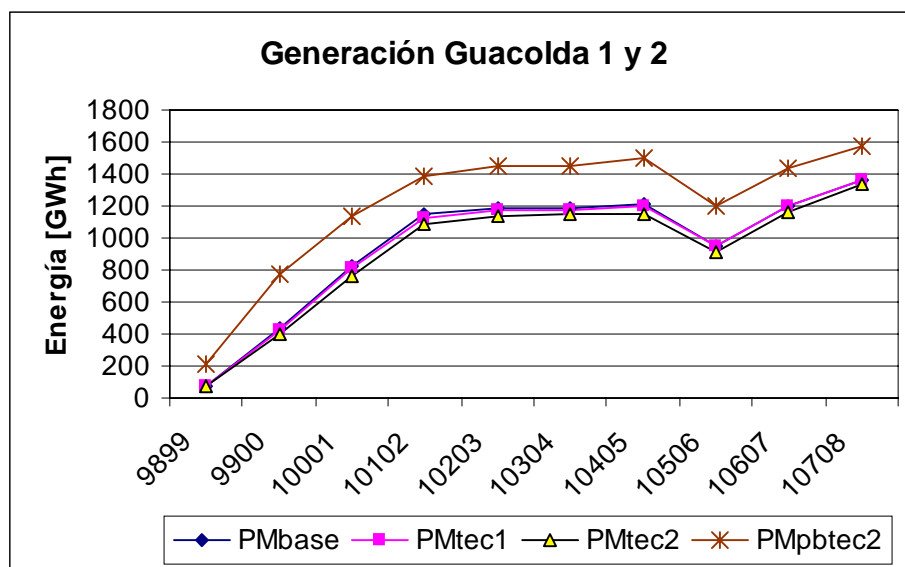


Figura N°3. 14. Generación central a carbón Programa de obras modificado

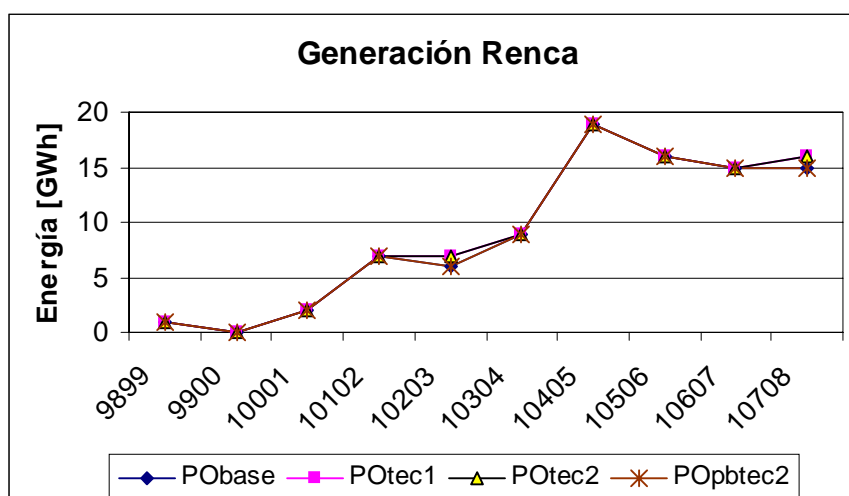


Figura N°3. 15. Generación central a petróleo Programa de obras original

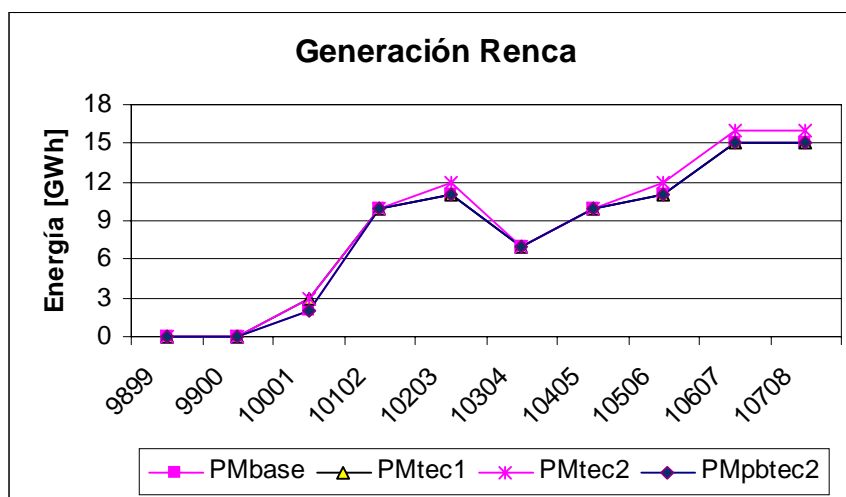


Figura N°3. 16. Generación central a petróleo Programa de obras modificado

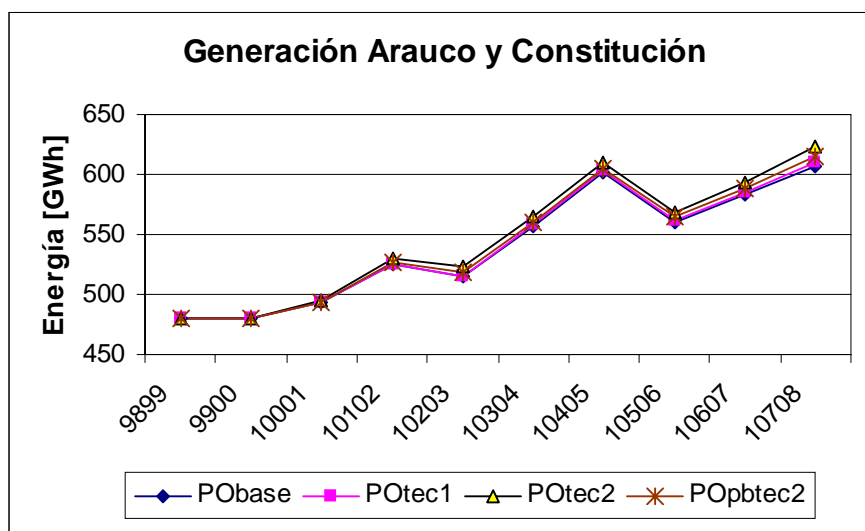


Figura N°3. 17. Generación con otros combustibles Programa de obras original

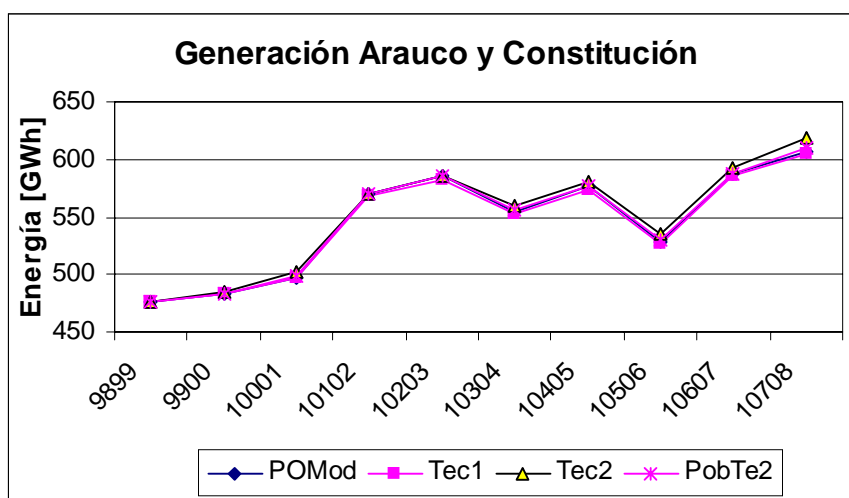


Figura N°3.18. Generación con otros combustibles Programa de obras modificado

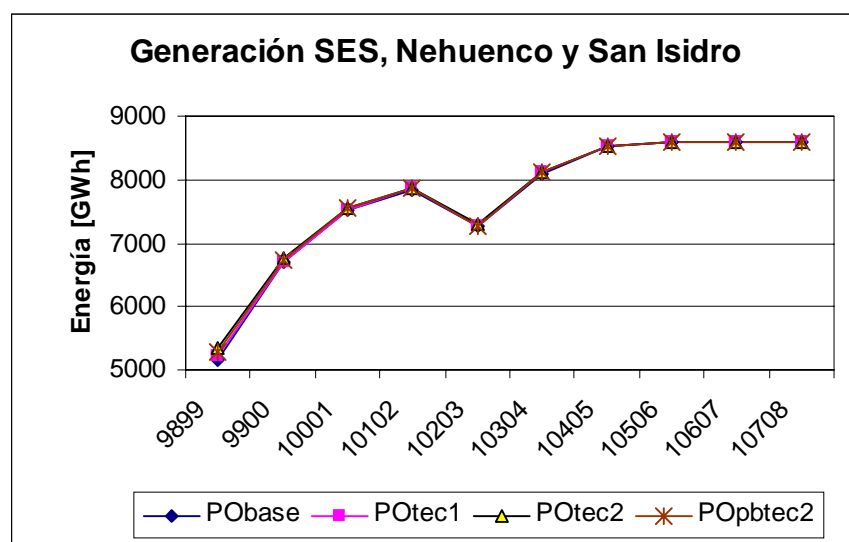


Figura N°3. 19. Generación centrales de ciclo combinado Programa de obras

original

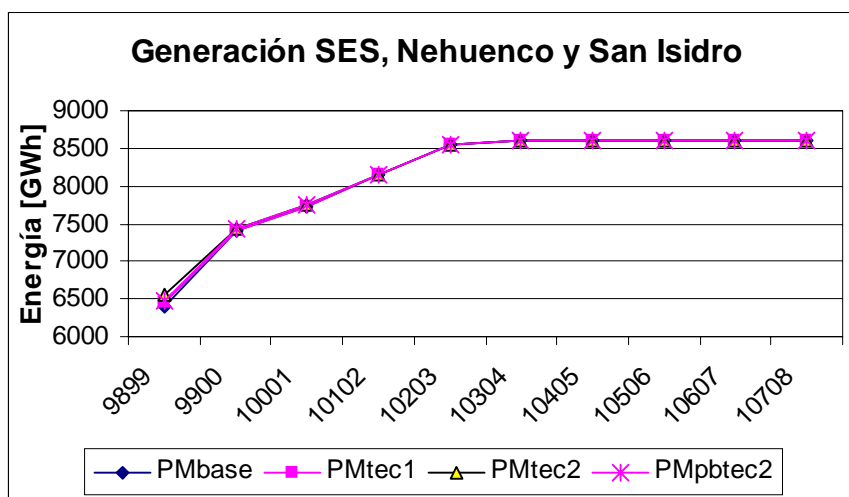


Figura N°3. 20. Generación centrales de ciclo combinado Programa de obras
modificado

De las figuras 3.11 a 3.16 se puede concluir que para las centrales a carbón o petróleo, la generación no varía demasiado si todas las centrales quedan en condiciones semejantes, es decir, cuando a todas las centrales a carbón y petróleo se les aumentan sus costos variables en la misma cantidad (tec1, tec2).

Se aprecia que en el caso en que sólo las centrales cercanas a sitios poblados son afectadas, la central a carbón afectada disminuye apreciablemente su generación (figuras 3.11 y 3.12), a pesar de tener los mismos costos que en tec2, esto se debe a que hay otras centrales a carbón que no han aumentado sus costos respecto del caso base por lo que pueden generar en vez de ella (figuras 3.13 y 3.14). Esto no ocurre en el caso de las centrales a petróleo que puede verse que mantienen aproximadamente la misma generación en todos los casos (figuras 3.15 y 3.16).

La generación de Arauco más Constitución (figuras 3.17 y 3.18), que no fue afectada por un aumento de costos, se mantiene casi igual en todos los casos. Se observa un leve aumento de sus generaciones al utilizar la tecnología dos para el control de

emisiones de las otras centrales. Los costos variables de estas centrales se encuentran entre los costos de una central a carbón y una a petróleo, por lo que al aumentar los costos de estas últimas aumenta el aporte de dichas centrales (Arauco y Constitución).

En cuanto a las centrales de ciclo combinado (figuras 3.19 y 3.20), mantienen el mismo nivel de generación, a pesar de que las centrales a carbón y petróleo aumenten sus costos debido a, que de cualquier modo, son más económicas.

Para comparar los efectos producidos por la modificación del plan de obras se graficaron los porcentajes de los costos marginales y aporte de generación térmica respecto al caso base con el plan de obras original (PObase), de los casos con tecnología 2 con ambos planes de obras y del caso base con plan de obras modificado.

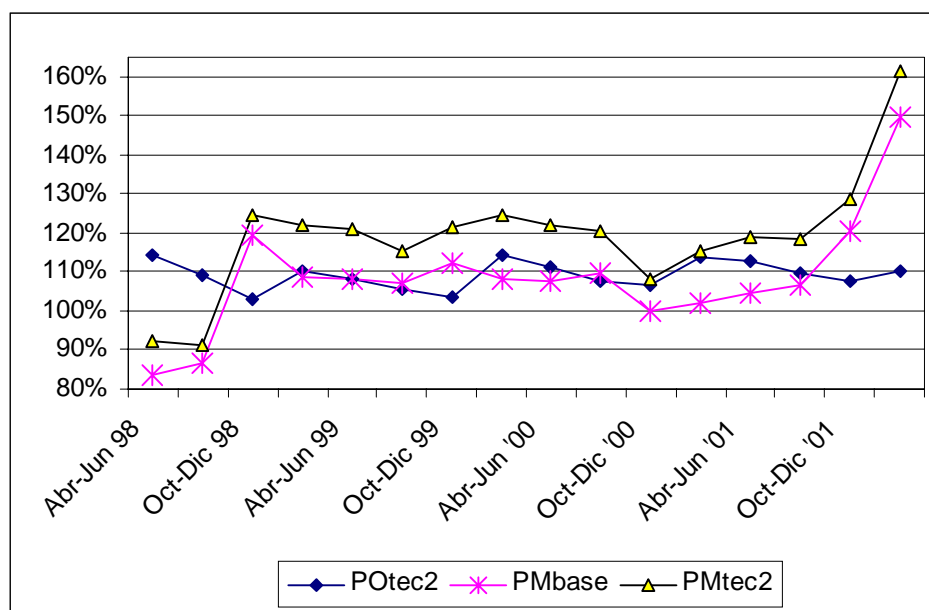


Figura N°3. 21. Costos marginales respecto a caso base con programa de obras original

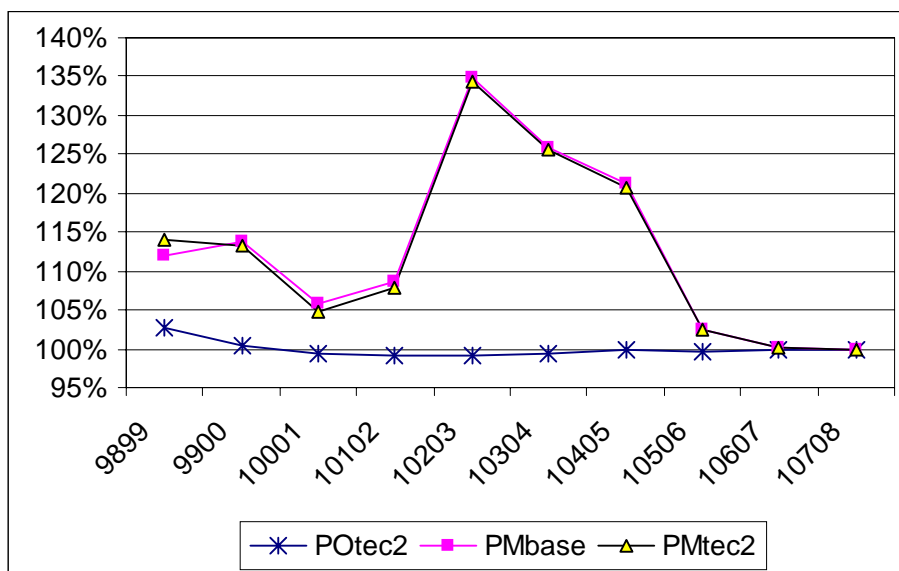


Figura N°3. 22. Generación térmica respecto a caso base con programa de obras original

De las figuras 3.21 y 3.22 se concluye que las mayores variaciones respecto al caso base con plan de obras original se obtienen al modificar el plan de obras y no al aumentar los costos variables de las centrales del sistema, principalmente en los aportes de la generación térmica al sistema.

Teniendo los costos marginales, la generación por cada central y sus respectivos costos variables sería posible evaluar el impacto en los ingresos y egresos de las empresas propietarias de las centrales por efecto de esta incorporación de costos de control de emisiones. Sin embargo, con estos valores no se pueden calcular directamente los ingresos y egresos puesto que el modelo GOL entrega resultados promedio de acuerdo al número de simulaciones⁷ que se utilicen. Es decir, puede ocurrir que una central genere una cantidad de energía (promedio de las simulaciones) a pesar de que, en el periodo, el costo marginal del sistema sea menor que sus costos variables. Esto sucede

⁷ En este trabajo se utilizaron 1.000 simulaciones para todos los estudios con el modelo GOL.

debido a que, en algunas simulaciones, el costo marginal del sistema fue mucho mayor que el promedio, lo que hizo que la central generara, provocando que la generación promedio sea diferente de cero.

Como último análisis, se intentaron incluir en las simulaciones los costos sociales provocados por las emisiones. Existen dos modelaciones para evaluar este costo, una busca comparar los daños ocasionados por la contaminación atmosférica con el beneficio para las personas de tener un ambiente libre de contaminación y calcula un valor económico para estos beneficios, y la otra, intenta medir económicamente todos los perjuicios provocados por la contaminación, que incluyen muertes prematuras, enfermedades, daños en materiales y vida silvestre, etc. Estudios de este tipo no han sido realizados para Chile, lo que dificulta encontrar un valor económico adecuado para realizar los análisis. Se incluyeron valores obtenidos de las referencias [22][31] pero los resultados obtenidos no fueron satisfactorios. La idea comprendía calcular la generación de cada central con los costos sociales incluidos de acuerdo a los contaminantes producidos por cada unidad, pero pagarles según el costo marginal económico, es decir, sin incluir los costos sociales. Los costos marginales económicos (fijando la generación de las centrales contaminantes y sin incluir en sus costos los costos sociales por contaminación) fueron demasiado elevados, incluso mayores que los obtenidos al calcular la planificación de la operación con los costos sociales por contaminación en las centrales a carbón y petróleo (pero manteniendo estas centrales con toda su capacidad de generación), debido a que el SIC tiene muy poca reserva de generación. Al fijar la generación de algunas centrales térmicas se limitan las posibilidades del sistema para generar energía eléctrica y entregar la potencia de punta, obligándola a generar más electricidad con centrales hidroeléctricas y con centrales térmicas más caras, aumentando los costos del sistema.

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se han analizado las consecuencias de considerar la contaminación ambiental en la planificación y operación de los sistemas eléctricos.

La contaminación del aire debido a la generación termoeléctrica depende, básicamente, del combustible que se utiliza. Por esto, los impactos producidos por las unidades térmicas deben diferenciarse en cuanto al tipo y cantidad de emisiones generadas, y a los efectos de estos contaminantes sobre personas, medio ambiente y materiales.

Este trabajo se inició realizando una revisión bibliográfica con el fin de conocer mejor el tema de la contaminación, sus causas y consecuencias. Se estudiaron las leyes vigentes en Chile y los efectos de los contaminantes del aire, para posteriormente aplicarlos específicamente a la industria de generación eléctrica.

Además, se revisaron publicaciones nacionales y extranjeras sobre planificación y operación de sistemas eléctricos que consideraran los impactos producidos por la contaminación atmosférica. Se encontraron diversos métodos para realizar un despacho térmico con restricciones ambientales. La utilización de alguno en particular dependerá de las leyes existentes en el tema ambiental y de los sistemas eléctricos en los cuales deba implementarse.

Se desarrolló un modelo de despacho económico ambiental para sistemas de generación térmica en lenguaje C y se utilizaron dos sistemas de prueba para realizar ensayos y análisis. Este modelo considera las emisiones de SO_2 producidas por la generación de energía termoeléctrica.

Con los resultados obtenidos fue posible observar la relación entre la disminución de emisiones de SO_2 y el costo asociado a esta disminución. De la misma forma se pueden obtener las curvas de equilibrio para otros contaminantes, basta tener la relación de emisiones del contaminante en función de la potencia generada.

La disminución de emisiones que será posible obtener mediante este método dependerá de los costos asociados que se esté dispuesto a gastar por el uso de tecnologías más limpias y, además, del tamaño del sistema, puesto que si no existen alternativas de generación, la disminución de contaminantes que se logrará será muy pequeña.

El método de despacho económico con consideraciones ambientales empleado será aún más útil en sistemas en que la restricción de emisiones o una restricción de costos máxima sea conocida. Con esto, el despacho se realiza con alguna de estas restricciones incluida en las restricciones, de lo que se obtendrá el despacho de las unidades minimizando las emisiones en la mayor cantidad permitida.

Para observar los impactos de la contaminación ambiental en un sistema eléctrico chileno se realizaron análisis con el modelo Gestión Óptima del Laja incluyendo costos de control de emisiones, en el Sistema Interconectado Central.

La principal conclusión de este análisis fue que siempre que se consideren los aspectos ambientales en la planificación de la operación de sistemas eléctricos se producirá un aumento de los costos de la electricidad, por lo que la inclusión de los costos de la contaminación atmosférica afectará no sólo a las empresas del rubro, sino que también a sus consumidores.

Lo anterior es razonable puesto que la producción de este bien (energía eléctrica) genera efectos adversos que perjudican directa o indirectamente a todas las personas (enfermedades, efectos sobre flora y fauna, cambios en el clima, etc.), y somos todos los que pagamos este costo social, independientes de nuestro consumo de energía eléctrica, es decir, de nuestro aporte a la producción de emisiones. Al incluir estos costos ambientales en la planificación y operación de sistemas eléctricos, se internalizará en algún grado el costo social y serán los consumidores y productores quienes directamente deban pagarlos.

Las centrales térmicas que se ven más afectadas son las centrales que operan con carbón, puesto que su utilización produce la mayor cantidad de emisiones, respecto de los demás combustibles, en especial de material particulado.

Sin embargo, los equipos de control que se consideraron para incluir los costos del control de la contaminación en el GOL fueron de emisiones de SO₂, contaminante producido por generación a base de carbón y petróleo aproximadamente en la misma medida por ambos combustibles⁸. Debido a esto, la generación de las centrales a carbón y petróleo se vio afectada.

Las centrales a petróleo disminuyeron su aporte más que las centrales a carbón, puesto que sus costos variables son mayores y un aumento las hace aún más costosas.

Las centrales a carbón son centrales económicas y mantuvieron su generación en los casos en que se aumentaron los costos para todas las centrales a carbón y petróleo sin distinción. En el caso en que se aumentaron los costos sólo a las centrales ubicadas en áreas pobladas, las centrales a carbón afectadas disminuyeron su generación.

Las centrales de ciclo combinado prácticamente no variaron sus aportes en los casos en que se aumentaron los costos de las otras centrales térmicas.

Además, se analizaron casos en que se consideraban los costos por impactos ambientales de la construcción de las centrales hidroeléctricas, lo que se refleja en el cambio del programa de obras. El efecto de esto fue un significativo aumento de la generación térmica total, y en particular, de la generación a carbón y gas natural, por ser los más económicos. Además, se produjo un aumento de los precios de nudo con respecto a los casos en que se utilizó el programa de obras original.

Con la modificación del plan de obras se obtuvieron variaciones más acentuadas que con el aumento de los costos variables de algunas centrales, de lo que se deduce que pueden lograrse mayores efectos atacando el problema de la contaminación en la etapa

⁸ El aporte depende del contenido de azufre del combustible que se utiliza.

de planificación de los sistemas eléctricos. En esta etapa es posible incluir no sólo los costos variables de los equipos de control de emisiones, sino que también se abarcan los costos de inversión y los costos de los impactos ambientales producidos por la construcción de las centrales, especialmente importantes en la construcción de centrales hidroeléctricas.

En la actualidad, la manera más eficiente de generar energía termoeléctrica en el país es la generación a través de centrales de ciclo combinado. Es una forma más barata en términos económicos y menos costosa en términos ambientales, puesto produce una mínima cantidad de emisiones, comparada con centrales térmicas convencionales (a carbón o petróleo) y es mucho más económica.

En Chile, aún no existen leyes que verdaderamente obliguen a las empresas a disminuir sus emisiones. Cuando hay periodos de preemergencia y emergencia en Santiago, se retiran de funcionamiento las industrias que se encuentran en una lista realizada por el SESMA, si alguna central térmica se encuentra en esta lista, no puede generar, sin importar en las condiciones en que se encuentre operando el Sistema Interconectado Central. En cambio, si existe una ley que exija a las centrales a restringir sus emisiones, se incentiva a las empresas al cambio a tecnologías limpias y uso de combustibles con bajo contenido de azufre, permitiendo así una disminución de emisiones en todos los periodos, no solamente en casos críticos.

El control de la contaminación atmosférica no es sólo un asunto del control técnico de los procesos que generan contaminantes del aire, sino que implica un patrón complejo de factores económicos, planificación urbana y controles legislativos.

En Chile todavía no existen estudios que cuantifiquen económicamente todos los impactos provocados por la contaminación. Es necesario valorar económicamente los daños provocados por la polución en todos los ámbitos, salud humana, vegetación, capital físico, etc. para crear leyes que obliguen a las empresas a considerar e internalizar los costos sociales provocados por su funcionamiento.

Debe recordarse que no sólo las centrales térmicas producen efectos adversos. Además de los impactos ambientales que se consideraron en este trabajo, existen impactos ocasionados por las centrales hidroeléctricas que no han sido cuantificados totalmente, y que tal vez provoquen un daño similar o mayor al provocado por las centrales térmicas.

Este trabajo es un primer paso para un estudio completo de las consecuencias ambientales de la generación eléctrica. Aún es necesario realizar estudios más acabados en cuanto al impacto en los ingresos de las empresas eléctricas, cuyo resultado incentivará o desmotivará a éstas a incluir sistemas de control de emisiones o utilizar tecnologías más limpias para la producción de electricidad.

Además, es necesario desarrollar métodos de planificación y operación que sean aplicables en el sistema chileno, para lo cual será indispensable la participación de las empresas generadoras integradas a los sistemas eléctricos chilenos.

V. BIBLIOGRAFIA

- [1] **A. Alonso, R. Harrison**, "Assessments of enviromental externalities in electric generation projects. The chilean case". World Congress of Enviromental and Resourses Economics. Venecia, Italia, Junio 1998.
- [2] **A. Hernández, N. Pizarro**, "Costos de Exigencias Ambientales". Informe Curso Mercados Eléctricos, Pontificia Universidad Católica de Chile, Primer Semestre 1997.
- [3] **A. Wood y B. Wollenberg**, "Power Generation, Operation and Control". John Wiley, 1996.
- [4] **C.A. Roa-Sepúlveda, M. Lillo, U.G. Knight, A.H. Coonick**, "Fuzzy Decision Trees for an Enviromentaly-Friendly Economic Dispatch". VI Symposium os Specialits in Electric Operational and Expansion Planning, Salvador, Bahía, Brasil, Mayo 1998.
- [5] **Centro de Despacho Económico de Carga**, "Estadísticas de Operaciones CDEC-SIC". 1986-1995
- [6] **Comisión Nacional de Energía**, "Informe Técnico Definitivo: Cálculo de Precios de Nudo en el Sistema Interconectado Central para la Fijación de Precios de Abril de 1998".
- [7] **Comisión Nacional del Medio Ambiente**. "Perfil Ambiental de Chile", 1994. Capítulo 13, páginas 264-268
- [8] **D, Elson**, "La Contaminación Atmosférica". Ediciones Catedra, 1990.
- [9] **D. Srinivasan, A. G. B. Tettamanzi**, "An Evolutionary Algorithm for Evaluation of Emission Compliance Options in view of the Clean Air Act Amendments". IEEE Transactions on Power Systems, vol.12, N°1, Febrero 1997, páginas 336-341

- [10] **D.F.L. N°1/82.** Ley General de Servicios Eléctricos, en Materia de Energía Eléctrica. D.O. N°31.366-13 de Septiembre de 1982.
- [11] **Decreto N°16.** Establece Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para la Región Metropolitana. Comisión Nacional del Medio Ambiente. D.O.N°36.083-6 de Junio de 1998.
- [12] **Decreto N°6/85.** Reglamento de Coordinación de la Operación Interconectada de Centrales Generadoras y Líneas de Transporte. D.O. N°32.109-28 de Febrero de 1985.
- [13] **F. Jakl, K. Bakic, L. Valencic,** "Combined Use of the Air Monitoring System in Production and Transmission of Electricity". IEEE Transactions on Power Systems, vol.12, N°3, Agosto 1997, páginas 1068-1075
- [14] **H. Rudnick,** "Operación Económica de Sistemas Eléctricos", Apuntes de curso. Pontificia Universidad Católica de Chile, Segundo Semestre 1996.
- [15] **Intendencia Región Metropolitana Santiago de Chile,** "Sistemas de Derechos de Emisión de Contaminantes Atmosféricos". Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Universidad de Chile, INTEC CHILE, Noviembre 1990.
- [16] **J. H. Talaq, F. El-Hawary, M. E. El-Hawary,** "A Summary of Environmental/Economic Dispatch Algorithms". IEEE Transactions on Power Systems, vol.9, N°3, Agosto 1994, páginas 1508-1516
- [17] **J. Hernández, R. Isla,** "Legislación Ambiental y su Relación con el Desarrollo del Sector Eléctrico". Informe Curso Mercados Eléctricos, Pontificia Universidad Católica de Chile, Primer Semestre 1997.
- [18] **J. K. Delson,** "Controlled Emission Dispatch". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol.93/1974, July-Dec 1974, páginas 1359-1366.
- [19] **J. Valenzuela,** "Cuantificación de las Restricciones Ambientales en el Despacho Económico Térmico". Informe de Memoria de Título para optar al título de Ingeniero Civil Eléctrico, Universidad de Concepción, Agosto 1996

- [20] **J. W. Lamont, E. V. Obessis**, "Emission Dispatch Models and Algorithms for the 1990's". IEEE Transactions on Power Systems, vol.10, N°2, Mayo 1995, páginas 941-947
- [21] **K. D. Le, J. Golden, C. Stansberry, R. Vice, J. Wood, J. Ballance, G. Brown, J. Kamy, E. Nielsen, H. Nakajima, M. Ookubo, I. Iyoda, G. Cauley**, "Potential Impacts of Clean Air Regulations on System Operations". IEEE Transactions on Power Systems, vol.10, N°2, Mayo 1995, páginas 647-656
- [22] **L. A. Cifuentes, L. B. Lave**, "Economic Valuation of Air Pollution Abatement: Benefits from Health Effects". Annu. Rev. Energy Environ. 1993. 18:319-342
- [23] **L. E. J. Roberts, P. S. Liss, P. A. H. Saunders**, "Power Generation and the Environment". Oxford University Press, 1990.
- [24] **Ley N°19300**: "Ley de Bases del Medio Ambiente". Diario oficial 9 de Mayo de 1994.
- [25] **N. J. Sell**, "Industrial Pollution Control, Issues and Techniques". Van Nostrand Reinhold Company, 1981.
- [26] **P. Ayala**, "Impacto de los costos ambientales en la planificación de los proyectos de generación eléctrica del Sistema Interconectado Central". Trabajo de Título para Ingeniero Civil, Universidad Federico Santa María, Valparaíso, Diciembre 1997.
- [27] **P. Fuentes**, "Despacho Económico Bajo Restricciones Ambientales". Informe de Memoria de Título para optar al título de Ingeniero Civil Eléctrico, Universidad de Concepción, Agosto 1997
- [28] **R. C. Furtado, R.C. Cavalcanti, M.F. Furtado**, "The Environmental Issues in the New Model of the Brazilian Power Sector". VI Symposium os Specialits in Electric Operational and Expansion Planning, Salvador, Bahía, Brasil, Mayo 1998.
- [29] **R. Quinteros**, "Planificación de la Operación Semanal del SIC Utilizando Técnicas de Programación Lineal". Memoria de Título, Pontificia Universidad Católica de Chile, 1996.

- [30] **R. Ramanathan**, "Emission Constrained Economic Dispatch". IEEE Transactions on Power Systems, vol.9, N°4, Noviembre 1994, páginas 1994-2000
- [31] **S. Newwll, B. Zuckerman, Dr. F. Field, Joel Clark**, "Life Cycle Analysis Methodology Incorporating Social Cost as a Valuation Metric". Massachusetts Institute of Technology, Febrero 1998.
- [32] **S. Roy**, "Cost-Effectiveness of Emission Control al Fossil-Fuel Units for Different Cumulative Load Patterns". IEEE Transactions on Power Systems, vol.12, N°1, Febrero 1997, páginas 321-328
- [33] **Servicio de Salud Metropolitano del Ambiente**. "Fuentes Fijas. Norma Ambiental en Aire", 1995-1996..
- [34] **T. Jackson, C. Standberry, S. Estes, K. Le, R. Boyle, M. Nguyen**, "Evaluating Soft Estrategies for Clean-Air Compliance". IEEE Computer Applications in Power, Abril 1993, páginas 46-50.
- [35] **V. Vickers, W. Hobbs, S. Vemuri, D. Todd**, "Fuel Resource Scheduling with Emission Constraints". IEEE Transactions on Power Systems, vol.9, N°3, Agosto 1994, páginas 1531-1538
- [36] **W. M. Vatavuk**, "Estimating Costs of Air Pollution Control". Lewis Publishers, 1990.
- [37] **W. Strauss, S.J. Mainwaring**, "Contaminación del Aire: Causas, Efectos y Soluciones". Editorial Trillas, 1990.
- [38] **W. Y. Spens, F. N. Lee**, "Interactive Search Approach to Emission Constrained Dispatch". IEEE Transactions on Power Systems, vol.12, N°2, Mayo 1997, páginas 811-817
- [39] **Y. Hu, W. G. Wee**, "A Hierarchical System for Economic Dispatch with Environmental Constraints". IEEE Transactions on Power Systems, vol.9, N°2, Mayo 1994, páginas 1076-1082

ANEXOS

ANEXO 1: Control de la Contaminación Atmosférica

Estrategias Económicas

Idealmente, las estrategias a partir de una propuesta basada en la economía para el control de la contaminación del aire deberían ofrecer incentivos económicos a las fuentes de emisión que consiguieran reducir la contaminación con los medios más rentables. Existe una gran variedad de estrategias económicas para controlar la contaminación del aire. A continuación se describen las más frecuentemente utilizadas [8].

A. Tasas de Emisión

Se basa en exigir a aquellos que contaminan el pago de unas tasas relacionadas con la cantidad de contaminación que cada uno emite, con el propósito de dejar la elección a los contaminadores de disminuir sus emisiones o pagar. Esta estrategia reconoce que las distintas fuentes de contaminación tienen distintos costos marginales de control, que unas pueden ser controladas de una forma más barata que otras y que se obtendría un ahorro para la sociedad si algunas fábricas redujesen las emisiones en mayor grado que otras. Una tasa de emisión adecuada y uniformemente establecida que gravase una unidad de contaminante emitido, podría conseguir un nivel de calidad del aire establecido colectivamente al mínimo costo total para la sociedad. Asumiendo que todas las fuentes desearan minimizar sus costos totales derivados del sistema de tasa de emisión, cada una equilibraría los gastos en control y los pagos de la tasa de emisiones de la manera que cada una estimase más económica. Una propuesta económica de este

tipo ofrece el incentivo a las empresas que encuentren nuevas técnicas y nuevos productos que contribuyan a reducir las emisiones contaminantes.

La calidad del aire resultante de esta estrategia depende de la seguridad de que las tasas se establezcan con precisión en función de cada contaminante. Puede ser necesario ajustar constantemente la tasa de emisión hasta que la calidad del aire que la sociedad considera como aceptable se haya alcanzado. En este sentido, esta estrategia puede considerarse como una táctica empleada en la gestión de la calidad del aire para conseguir los estándares en ese terreno. Sin embargo, podría emplearse en su forma pura y, quizás, emplear las tasas en compensaciones para las víctimas de la contaminación y en subsanar los daños causados por la misma. Las tasas de emisión de cada contaminante deberían ser ajustadas teniendo en cuenta el incremento del número de fuentes emisoras y de manera que reflejasen los aumentos generales de precios.

Las limitaciones de esta estrategia se derivan del hecho de que los contaminadores con unos mercados fuertes podrían limitarse simplemente a ir pagando mientras traspasan dichos pagos a sus consumidores. Además, los equipos para monitorizar continua y precisamente los contaminantes en su fuente no están disponibles en muchos casos. Esta estrategia requiere el control de las emisiones en sus fuentes individuales, por lo que tiende a verse limitada a las grandes fuentes de emisión industriales. La aplicación de ésta a las numerosas fuentes de emisión de pequeña escala tales como calefacciones domésticas y vehículos serían mucho más complejas.

B. Licencias de Contaminación

En este caso, la autoridad competente determina la cantidad total de emisiones que se permiten en un área y emite el número equivalente de permisos o títulos de contaminación, que pueden ser comercializados, subastados o asignados de alguna manera. Aunque el empleo de esta estrategia es posible como tal, suele emplearse con

mayor frecuencia como táctica de reducir las emisiones dentro de la estrategia de gestión de la calidad del aire.

En EE.UU., se ha adoptado una "política comercial de emisiones", lo que representa una acción hacia el sistema de los permisos de contaminación comercializados. La política comercial de emisiones incorpora políticas conocidas como "burbuja", "compensaciones" y "banca". La primera permite a las empresas la colocación de una burbuja imaginaria sobre los múltiples focos de emisión de su fábrica y les es asignada una limitación de emisión global máxima para su burbuja. En el interior de la burbuja, la empresa puede incrementar las emisiones en uno de los focos siempre que se acompañe de una reducción compensatoria mayor o equivalente en otro de los focos de la burbuja. Esta política permite los acuerdos de la empresa sobre reducción de emisiones. La política de "compensaciones" amplía el concepto de burbuja hasta permitir el comercio con los permisos de emisión entre actividades no localizadas en la misma fábrica o que no pertenecen a la misma empresa. Esto requiere una reducción en las emisiones mayor del uno por uno para poder conseguir una mejora en la calidad del aire. Las empresas que reducen las emisiones en mayor cuantía que la exigida por las autoridades de las políticas de burbuja o compensaciones disponen de un crédito en el "banco" de las reducciones de emisión que pueden utilizar para ampliar su fábrica o, incluso, para comercializarlo con otras empresas. Es evidente que debe imponerse unos límites a estas transacciones de créditos de reducción de emisiones para asegurar que este comercio no contribuye a la violación de los estándares de calidad del aire.

Para que esta estrategia pueda tener éxito se requiere un control muy preciso de las emisiones y de la calidad del aire, así como de un sistema de supervisión y aplicación de ella. Con esta estrategia orientada al mercado es posible que una empresa pudiera comprar más permisos de contaminación de los que necesita, con la intención de aventajar a sus competidores, en cuyo caso el mercado dejaría de funcionar.

C. Costo-Beneficio

La estrategia de costo-beneficio pretende, en primer lugar, cuantificar los costos de todos los daños producidos por la contaminación del aire y los costos de todos los medios conocidos de controlar esos contaminantes y adoptar la opción u opciones que minimicen la suma de los daños producidos por contaminación y costos para su control. Si no se realizan gastos en controlar la contaminación, la concentración de contaminación ambiental será elevada y los costos de los daños producidos por la misma, grandes.

Al aumentar los gastos de control, la concentración de la contaminación y los costos por los daños que ésta acarrea, disminuyen. Los gastos de control se elevan vertiginosamente cuando la concentración del medio ambiente se aproxima a cero. La curva de costos por daños producidos, empieza en un valor bajo, y va incrementándose rápidamente para concentraciones más altas. El valor mínimo de la suma de ambos se encuentra en una concentración intermedia. Este mínimo es el óptimo; cualquier gasto por encima o por debajo de este valor se considera un total despilfarro por parte de la sociedad.

Una propuesta de este tipo es excesivamente compleja, dado que es necesario asignar valores a todos los tipos de daños producidos por la contaminación, incluyendo las muertes prematuras, los diversos grados de enfermedad, el deterioro de las propiedades, reducciones de la producción y cantidad de las cosechas, los daños irreparables a monumentos históricos, así como la degradación de la visibilidad. Debe considerarse el efecto de todos los contaminantes tanto a corto como a largo plazo. De forma similar, todos los costos del control de la contaminación deben ser considerados, incluyendo equipos, administración, efectos en los modelos de desarrollo y desempleo.

Comparación de fuentes de contaminación

Cuando se analiza la contaminación del aire que proviene de diferentes fuentes, en particular procesos de combustión, es importante comparar las cantidades relativas de contaminantes del aire producidas. En la tabla se muestran las cantidades promedio de los mayores contaminantes que se producen por tonelada de combustible consumido[37].

Emisiones provenientes de fuentes de combustión (Kg por ton de combustible)

	COMBUSTIÓN INTERNA		COMBUSTIÓN EXTERNA				
	Motores Otto	Motores Diesel	Petróleo combustible Generación de energía	Carbón Comercial doméstica	Generación de energía	Comercial doméstica	
Monóxido de carbono	de	395	9	0,005	0,025	0,25	25
Óxidos de nitrógeno	de	20	33	14	10	10	4
Óxidos de azufre	de	1,55	6	20,8 S	20,8 S	19 S	19 S
Hidrocarburos		34	20	0,42	0,26	0,1	5
Aldehídos y ácidos orgánicos	y	1,4	6,1	0,08	0,25	0,0025	0,0025
Partículas		2 ^a	16	1,3 ^b	1-12 ^b	8 A ^c	2-8 A ^c

S: Para obtener los óxidos de azufre producidos, multiplicar el número por el porcentaje S en el combustible (S = azufre)
A: Para obtener las partículas producidas, multiplicar el número por el porcentaje A en el combustible (A = ceniza)

^b. En su mayoría óxidos metálicos que proceden de impurezas en el petróleo combustible.

^c. Sulfatos y cloruros metálicos (calcio, magnesio, hierro, etc.) procedentes de inclusiones de ceniza en el carbón.

La cifra más significativa es la gran cantidad de monóxido de carbono (una función del método de combustión) que produce el motor Otto en comparación con el motor diesel, y las cantidades diminutas de éste producidas por sistemas de combustión externa. También las emisiones de óxido de nitrógeno son una función del modo de combustión, y se controlan más fácilmente en sistemas de combustión externa. Las emisiones de dióxido de azufre y ceniza no son, por supuesto consecuencia fundamental del tipo de combustión sino del tipo de combustible que se utiliza.

Esta comparación no muestra la importancia ya sea de la cantidad de combustible quemado que producen los contaminantes, o de la dispersión que los diluye y reduce sus efectos. Una central muy grande que genera 1.200 MW quema cerca de 12.000 toneladas de carbón cada día, mientras que un automóvil de tamaño mediano puede recorrer cerca de 7.000 km. con una tonelada de combustible para motor. De nuevo, una suposición razonable es que un automóvil utiliza cerca de dos toneladas de combustible por año. En una ciudad con una población de un millón de habitantes, con tres autos por cada diez personas, o 300.000 vehículos, se consumirían 600.000 toneladas de combustible cada año. A diferencia de una central, los automóviles liberan sus contaminantes a nivel del suelo y tienden a desconcentrar las emisiones durante las horas peak de mañana y tarde durante 300 días cada año, esto produce un impacto relativamente más grande que la generación de electricidad, para la cual la central bien podría estar situada en un lugar alejado del centro de población, con controles de contaminación cuidadosamente verificados y una chimenea alta para auxiliar en la dispersión de contaminantes residuales.

Métodos de control de la contaminación

1. Control de gases

Para que los gases se puedan controlar es necesario removerlos de su ambiente gaseoso ya sea hacia una superficie sólida o líquida, donde se retienen en forma preferencial, o donde reaccionan para sintetizar una especie no contaminante o una especie que se remueve con mayor facilidad que el contaminante original. Los procesos que se utilizan son variaciones de los métodos que se emplean para colectar gases con concentración, es decir, absorción dentro de un líquido (fricción) y adsorción sobre una superficie sólida ya sea con o sin reacción [3][25][36][37][15][23][34].

1.1 Absorción de gas en líquidos

Cuando se trabaja con concentraciones comparativamente elevadas de un gas contaminante (del orden del 1% o más), es práctica frecuente utilizar un sistema de flujo a contracorriente en una unidad tal como una torre de absorción empacada. Esto tiene la ventaja de que la concentración más baja del contaminante en el gas se encuentra en contacto con el líquido más débil, el cual es el líquido absorbente en el cual hay menor concentración del gas contaminante. El líquido más concentrado que se separa de la columna de absorción entra en contacto con la concentración más elevada del contaminante. Entonces el líquido absorbente que se utiliza se puede retirar como desecho o se puede tratar de tal manera que sea posible reciclarlo. En muchos casos, el contaminante, cuando se remueve del líquido absorbente, se puede utilizar como material básico para procesamiento posterior.

Los contaminantes del aire que se encuentran presentes a concentraciones muy bajas se limpian con frecuencia por fricción en un sistema de corriente coordinada, donde el gas sigue la misma dirección que el líquido limpiador.

El tamaño del depurador de gases y su efectividad relativa son una función de una varios parámetros: la superficie de exposición del líquido absorbente, la temperatura, el tiempo disponible y la fuerza de conducción que lleva a las moléculas del gas contaminante hacia la superficie del líquido y afecta su absorción. Esto depende de la naturaleza química del gas contaminante con el líquido. La opción normal para la limpieza de SO_2 por frotamiento no sería agua sino una solución alcalina, tal como amoníaco, en el cual el SO_2 es muy soluble. La fuerza de conducción también es una función de la concentración del gas contaminante en la corriente de gas y en la superficie líquida, y se reduce conforme el líquido se aproxima a la saturación con el gas.

La superficie de exposición a través de la cual se absorbe es una función del tamaño de la gota del líquido (en un depurador de gases de tipo rocío) o de las dimensiones y tipo de empaquetamiento (en una torre empaquetada), así como también de la cantidad de líquido por unidad de volumen de gas que se utiliza y de las dimensiones físicas del sistema.

En general los contaminantes gaseosos presentes a concentraciones moderadas, menos de cerca del 0,1% en volumen, se manejan con efectividad mediante depuradores líquidos de gases siempre y cuando se encuentre disponible un líquido absorbente adecuado. Los líquidos limpiadores para depuradores de gases incluyen agua para amoníaco y ácido clorhídrico en forma de gas, ácido sulfúrico para amoníaco y muchos otros.

1.2 Adsorción sobre sólidos

Las concentraciones de los contaminantes pueden ser mucho menores de 0,1%, es posible que por varios órdenes de magnitud. Si las moléculas son pequeñas y polares, entonces se pueden adsorber sobre sólidos. Los sólidos adsorbentes de éxito como el sílice gelatinoso, aunque de apariencia sólida a simple vista, en realidad consisten en una multiplicidad de poros diminutos, los cuales incrementan de manera considerable la superficie de exposición disponible. Los adsorbentes sólidos de este tipo se pueden reutilizar; el sílice gelatinoso, después de la saturación con vapor de agua, se puede secar por completo y reutilizar durante muchas veces.

Si se trata de moléculas grandes no polares, tales como varios compuestos orgánicos que incluyen a la mayoría de los aromáticos, el adsorbente más adecuado es el carbón activado. Éste es carbón de leña que se prepara mediante destilación destructiva de la madera, cáscara de coco y comprimidos de carbón, el cual se ha tratado luego con vapor y algunos reactivos químicos inorgánicos. El carbón activado puede actuar como adsorbente para olores durante período de semanas o aun meses sin necesidad de reemplazo o regeneración.

La diferencia fundamental entre un adsorbente sólido y uno líquido es que en un sistema de absorción líquida el líquido se remueve de manera continua y la superficie se regenera conforme el líquido fluye dentro del empaquetamiento de la torre u otro aparato. En un sistema adsorbente sólido, el sólido mismo se tiene que renovar cuando se agota, y esto es lo más efectivo en sistemas de repuesto. Cuando se utiliza la renovación continua de sólidos, se tiende hacia la deterioración del sólido adsorbente por rozadura ya que éste se mueve despacio a través del aparato.

La adsorción física se puede acompañar mediante reacción, caso en que por lo común se denomina quimioadsorción. La quimioadsorción es en general un proceso más selectivo que la adsorción física, con enlace mucho más fuerte entre el gas y la superficie del sólido, lo cual hace más difícil la regeneración del adsorbente. En ciertos

casos, el adsorbente sirve como un sitio de reacción entre los dos contaminantes adsorbidos, o entre un contaminante adsorbido y un reactivo químico impregnado sobre el adsorbente. El adsorbente sólido en estas circunstancias puede desempeñar una función catalítica y auxiliar a la reacción, ya que muchas especies son más reactivas en el estado adsorbido que en estado libre.

La descomposición catalítica sobre superficies impregnadas con un catalizador adecuado también se utiliza; aquí, los productos de descomposición pueden no tener alguna afinidad respecto al adsorbente y se reliberan en la corriente del gas. Tal sistema adsorbente puede operar de manera continua y solo se limita por la susceptibilidad del catalizador a la desactivación. Un ejemplo de esto es la degradación de óxidos de nitrógeno, en el escape de los automóviles, en nitrógeno y oxígeno, los cuales entonces se reliberan hacia la corriente del escape. La presencia de plomo procedente de aditivos antidetonantes en la gasolina desactiva tales catalizadores y estos aditivos no se deben utilizar en forma conjunta con los sistemas adsorbentes.

2. Control de partículas

La primera forma ampliamente reconocida de contaminación del aire fue el humo, partículas finas de carbono que se originan de la ignición incompleta de combustibles, y ceniza inorgánica que procede de la materia no combustible que se encuentra dentro del combustible.

En términos más generales, el control de partículas contaminantes del aire implica pasar la corriente de gas que contiene las partículas a través de una cámara y permitir que una fuerza actúe sobre las partículas para sacarlas de la corriente de gas. El método elegido depende de varios factores, incluso la naturaleza de operación de la planta, si la emisión es cíclica o continua, y si es probable que varíe a diferentes horas del día. Esto es importante ya que algunos colectores de polvo son más adecuados para

operación discontinua que otros y algunos colectores son inadecuados para su uso con emisiones variables. También se requiere información acerca de la naturaleza de las partículas, sus dimensiones, forma, densidad, estado (sí es líquido o sólido), composición química y conductividad eléctrica. Para finalizar, es necesario conocer las propiedades del gas en el cual las partículas se encuentran suspendidas, en particular su temperatura y composición química. Por ejemplo, las emisiones de temperatura elevada pueden acarrear cantidades grandes de vapores condensables en fase de gas. Los más importantes de estos son agua y vapores ácidos; su presencia dicta la temperatura a la cual se debe operar el aparato de limpieza de gas y, en algunos casos, la resistencia a la corrosión de los materiales con los cuales se fabrica.

Se debiera comprender que cuanto mayor sea la eficiencia de recolección, superior será el costo tanto del colector como de su operación. En general, esta relación es exponencial, el costo aumenta al doble para un incremento en eficiencia desde el 90% hasta el 99% y se cuadruplica para un incremento del 99,9% al 99,99%. La relación de costo versus eficiencia también se refleja en la elección del método que se pretende utilizar, en donde ciertos sistemas son tanto de gran eficiencia como de costo elevado sin alguna flexibilidad en cuanto a su fabricación para reducir el costo a fin de reducir la eficiencia de manera considerable. Esto sucede con los sistemas de filtro de tela, los cuales, por consiguiente, no se elegirían para su utilización en una situación donde los requerimientos no sean elevados.

2.1 Filtros de Tela

Descrito en los términos más simples, el filtro de tela es una versión a gran escala de una aspiradora; se provoca que el gas efluente fluya a través del material del filtro y que las partículas se remuevan sobre este material. Los mecanismos que intervienen en el filtro de tela son más complejos que el tamizado directo de las partículas para separarlas de la corriente de aire. Esto se prueba por medio de las eficiencias elevadas que se obtienen al coleccionar partículas, las cuales son más pequeñas que los intersticios en la tela del filtro.

La unidad básica de un filtro de tela es la fibra y éstas son generalmente más grandes que las partículas que se van a coleccionar, y la recolección ocurre como resultado de la operación de varios mecanismos. La fibra intercepta directamente las partículas cuando la trayectoria del flujo que contiene la partícula pasa la mitad de la partícula del diámetro del filtro. En su debido curso, se construye una capa de partículas sobre la superficie de la tela y se forma una costra, la cual incrementa la eficiencia de los filtros pero disminuye la velocidad del flujo. La maraña de filtro se tiene que remover a intervalos mediante agitación o al invertir el flujo de aire, o ambos.

La temperatura a la cual pueden funcionar los filtros de tela es en esencia una función de las características de las fibras con las cuales están hechos los tubos o camisas. Las emisiones de gas se pueden enfriar para cumplir con los requerimientos; además, las telas se pueden elegir para trabajar durante períodos prolongados, aun bajo condiciones ácidas o alcalinas.

2.2 Precipitadores Electrostáticos

Los precipitadores electrostáticos son dispositivos de control de partículas que emplean fuerzas eléctricas para remover las partículas de la corriente de gas en placas o alambres colectores. Una partícula cargada repele un alambre o placa de carga similar y es atraída por una carga opuesta, por lo general conectada a tierra, que puede ser un tubo u otra placa. Su uso es casi universal para la recolección de ceniza volátil en las centrales de energía y en la mayor parte de otras situaciones donde se tratan grandes volúmenes de gases y que se deben lograr eficiencias elevadas.

Los procesos en un precipitador electrostático son más bien complejos y se pueden describir como sigue. Cuando un alambre delgado, central en un tubo conectado a tierra o entre dos placas, se carga negativamente a un voltaje muy elevado, el aire o las moléculas de gas que rodean inmediatamente al alambre son bombardeados por electrones liberados a partir del alambre y algunas moléculas adquieren cargas negativas. Dentro del campo electrostático entre el alambre y el tubo o las placas, estas moléculas de gas con carga negativa se mueven hacia las secciones positivas. Si un gas sucio (que contenga partículas) está pasando a través del tubo o entre las placas, los iones se colectan en la superficie de las partículas y les confieren carga. Luego, estas partículas con carga se mueven hacia las superficies conectadas a tierra donde se descargan. Después de cierto tiempo, una capa de partículas de varios milímetros de grosor se colecta. La capa colectada se remueve a intervalos mediante golpes ligeros contra el tubo o las placas.

Debido a la gran escala de estas unidades y a los voltajes muy elevados que se utilizan, todos estos procesos se llevan a cabo en forma automática. En la práctica, los procesos no son tan sencillos como la descripción dada antes. Por ejemplo, la descarga de las partículas que recién llegan a la placa, donde ya existe una costra depositada que actúa como un aislante parcial, puede ser muy lenta.

A pesar de estos problemas, los precipitadores electrostáticos modernos que operan bajo condiciones favorables pueden lograr eficiencias del 99% o superiores en la recolección de partículas finas, menores de $0,01 \mu\text{m}$ de diámetro. Estos precipitadores también se pueden construir de acuerdo con la eficiencia que se requiera, lo cual permite un ahorro considerable en su costo.

2.3 Colectores Húmedos o Scrubbers

La acción de la lluvia respecto a que limpia a fondo el aire se conoce bien; este fenómeno se puede utilizar en un sistema de limpieza de partículas que habitualmente se denomina limpieza por frotamiento. El tipo más sencillo de depurador de gases que limpia por fricción es la torre de rocío, donde discretas gotas al caer colectan partículas de polvo. Este dispositivo sólo es efectivo para partículas bastante grandes, por lo cual, es frecuente su uso como prelimpiador, en particular donde un incremento en humedad y enfriamiento de los gases puede auxiliar al proceso de limpieza subsecuente, como se aplica con los precipitadores electrostáticos.

Las torres empaquetadas también se pueden utilizar para la limpieza de partículas por frotamiento, pero por lo general no son muy eficientes para la captura de partículas de tamaño medio ($0,5$ a $10 \mu\text{m}$ de diámetro).

En los depuradores mecánicos de gas se rocía una película de agua sobre una superficie en movimiento, como las aspas de un ventilador, por ejemplo. En un depurador de rocío centrífugo, los gases se introducen en forma tangencial hacia dentro de un ciclón en donde las gotas se emiten hacia fuera del rociador que se encuentra en el centro. Las gotas adquieren un movimiento en espiral, ya que son relativamente grandes e interceptan las partículas de polvo. En la pared la película húmeda evita la reincorporación de las partículas después de la captura.

Un tipo más efectivo de depurador de gases es el venturi, donde el líquido se pone en contacto con el gas sucio que se mueve a velocidades altas a través del conducto de un venturi. Para funcionar, los depuradores venturi requieren energía considerable debido a la necesidad de empujar los gases a velocidad alta a través del sistema.

Mientras que los depuradores se utilizan ampliamente, se tienen desventajas serias con ellos; una es que el líquido que ya se usó se debe eliminar o reutilizar, en cualquiera de los dos casos se requiere un tratamiento prolongado, el cual es costoso y tal vez difícil. La otra desventaja es que el líquido es sí mismo representa un desembolso aun cuando, como sucede en la mayoría de los casos, es tan sólo agua.

3. Contaminantes Residuales

Se debe comprender que ningún sistema de control removerá todos los contaminantes del aire de una emisión industrial. Alguna fracción, 10%, 1% o 0,1% del material contaminante, permanece en la corriente de gas de desecho y aun esta proporción pequeña puede, en ciertos casos, ser una cantidad absoluta apreciable.

Los contaminantes residuales se liberan hacia la atmósfera, idealmente a niveles que se consideran inofensivos por completo. Esta liberación con frecuencia se realiza mediante dilución al utilizar chimeneas elevadas, las cuales emiten a los contaminantes hacia la atmósfera a una altitud suficiente para asegurar alguna dilución antes de que ocurra un contacto a nivel de la tierra. Los gases efluentes tienen cierta velocidad y, por lo general, son más calientes que la atmósfera. Esta energía cinética y la flotabilidad adicional elevan la emisión a la parte más alta de la chimenea, donde la turbulencia y la difusión la mezclan con la atmósfera. Esto diluye al efluente y disminuye la

concentración máxima probable a nivel de tierra por medio de una cantidad que es aproximadamente proporcional al cuadrado de la altura efectiva⁹ de la chimenea.

La elección de medidas de control en alguna planta particular dependerá de qué requerimientos regulatorios se vayan a cubrir, y de cuál es la manera más eficiente y económica de cumplirlos, al tomar la debida consideración de las concentraciones y la composición del efluente que se pretende limpiar. Con regularidad, las industrias similares que utilizan materiales semejantes no elaborados tienen problemas de control comunes.

⁹ Suma de la altura real, la velocidad de ascensión y la flotabilidad de ascenso de la pluma

ANEXO 2: Programa de Obras Modificado

Este escenario fue diseñado incluyendo los impactos ambientales de las centrales hidroeléctricas [1]. Su mayor diferencia con el entregado por la CNE es que se retrasa la entrada de las centrales hidroeléctricas y se adelantan algunas térmicas de ciclo combinado.

Programa de obras en el SIC modificado

Fecha	Obra	Potencia [MW]
Jun de 1998	PetroPower	48,6
Abr de 1998	Central Nehuenco	351,2
Abr de 1998	Central San Isidro	370
Oct de 2000	Central Rucúe	160
Abr de 2000	Central Peuchén	79
Oct de 2000	Central Mampil	52
Oct de 2003	Central Cortaderal	195
Abr de 2005	Central Ralco	570
Abr de 2002	Central a gas ciclo combinado	332,4
Abr de 2003	Central a gas ciclo combinado	332,4
Abr de 2004	Central a gas ciclo combinado	332,4
Abr de 2005	Central a gas ciclo combinado	332,4
Abr de 2006	Central a gas ciclo combinado	332,4
Abr de 2007	Central a gas ciclo combinado	332,4
Ene de 2008	Central a gas ciclo combinado	332,4

ANEXO 3: Costos marginales entregados por modelo GOL

- Costos marginales trimestrales y precio de nudo Programa de obras original

Trimestre	Caso			
	PObase	POtec1	POtec2	POpbtec2
Abr-Jun 98	16,9	17,4	19,3	18,2
Jul-Sep 98	15,2	15,5	16,6	15,9
Oct-Dic 98	10,7	10,8	11,0	10,9
Ene-Mar 99	14,6	14,9	16,1	15,0
Abr-Jun 99	14,3	14,5	15,5	14,7
Jul-Sep 99	13,8	14,0	14,6	14,1
Oct-Dic 99	13,6	13,7	14,1	13,7
Ene-Mar '00	17,7	18,2	20,2	18,6
Abr-Jun '00	16,8	17,2	18,7	17,5
Jul-Sep '00	15,5	15,8	16,7	16,0
Oct-Dic '00	16,1	16,3	17,2	16,6
Ene-Mar '01	22,0	22,6	25,0	23,7
Abr-Jun '01	19,4	19,9	21,9	20,7
Jul-Sep '01	17,8	18,2	19,5	18,8
Oct-Dic '01	17,1	17,4	18,4	17,9
Ene-Mar '02	27,1	27,6	29,8	28,6
Precio nudo	16,8	17,1	18,4	17,6

- Costos marginales por año hidrológico Programa de obras original

	Caso			
Año	PObase	POtec1	POtec2	POpbtec2
9899	14,4	14,6	15,8	15,0
9900	14,8	15,1	16,1	15,3
10001	17,6	18,0	19,4	18,5
10102	20,3	20,8	22,4	21,5
10203	19,7	20,1	21,6	20,6
10304	23,4	23,8	25,4	24,5
10405	29,6	30,0	31,8	30,6
10506	25,7	26,1	27,9	26,9
10607	27,5	28,0	29,7	28,6
10708	28,1	28,6	30,5	29,4

- Costos marginales trimestrales y precio de nudo Programa de obras modificado

	Caso			
Trimestre	PMbase	PMtec1	PMtec2	PMpbtec2
Abr-Jun 98	14,1	14,4	15,6	14,5
Jul-Sep 98	13,2	13,3	13,9	13,4
Oct-Dic 98	12,8	12,9	13,3	13,1
Ene-Mar 99	15,9	16,3	17,8	16,4
Abr-Jun 99	15,5	15,9	17,3	16,2
Jul-Sep 99	14,8	15,0	15,9	15,2
Oct-Dic 99	15,3	15,6	16,5	15,9
Ene-Mar '00	19,1	19,7	22,0	20,5
Abr-Jun '00	18,1	18,7	20,5	19,3
Jul-Sep '00	17,0	17,4	18,7	17,9
Oct-Dic '00	16,1	16,4	17,4	16,6
Ene-Mar '01	22,4	23,0	25,4	24,2
Abr-Jun '01	20,3	20,9	23,1	22,1
Jul-Sep '01	19,0	19,5	21,1	20,2
Oct-Dic '01	20,6	20,9	22,0	21,4
Ene-Mar '02	40,5	41,4	43,7	41,8
Precio nudo	18,4	18,8	20,3	19,3

- Costos marginales por año hidrológico Programa de obras modificado

Año	Caso			
	PObase	POtec1	POtec2	POpbtec2
9899	14,0	14,2	15,2	14,3
9900	16,2	16,5	17,9	17,0
10001	18,4	18,9	20,5	19,5
10102	25,1	25,7	27,5	26,4
10203	27,6	28,2	30,2	28,9
10304	23,9	24,5	26,4	25,3
10405	26,3	26,9	28,8	27,6
10506	22,0	22,5	24,1	23,1
10607	27,7	28,2	29,9	28,9
10708	28,1	28,6	30,6	29,4