

X SEPOPE

21 a 25 de maio de 2006
May – 21st to 25th – 2006

FLORIANÓPOLIS (SC) – BRASIL

**X SIMPÓSIO DE ESPECIALISTAS EM PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO
E EXPANSÃO ELÉTRICA**

**X SYMPOSIUM OF SPECIALISTS IN ELECTRIC OPERATIONAL
AND EXPANSION PLANNING**

MODELO DE DESPACHO ECONÔMICO DO SISTEMA ELÉTRICO COLOMBIANO

Juan C. Morales Ruiz Silvia Elena Cossio Mesa

XM Companhia de Especialistas em Mercados S.A E.S.P.

Colômbia

RESUMO

Um aplicativo, chamado de Despacho e Redespacho Programado (ou DRP, das iniciais em espanhol), baseado em técnicas de programação inteira mista tem sido desenvolvido. O DRP foi implementado para solucionar o problema de despacho econômico do Mercado Elétrico Colombiano. Esse aplicativo está sendo utilizado para melhorar o processo do despacho de energia, executado pelo Operador do Sistema do Mercado Elétrico Colombiano, chamado de XM, atendendo à demanda de energia, de acordo com as regras do Mercado Colombiano de Eletricidade. Os objetivos desse artigo são: mostrar as principais características do sistema elétrico colombiano, uma descrição geral do processo de despacho, os aspectos mais relevantes do modelo matemático do despacho econômico e as principais características do aplicativo DRP e sua utilização no Mercado Regional Atacadista de Eletricidade.

PALAVRAS-CHAVE: DRP, MIP (programação inteira mista), XM, TIE (interligações) , Mercado, Despacho econômico.

Juan Carlos Morales Ruiz
e-mail: jcmorales@isa.com.co
fax: (57) 4 3170833
tel.: (57) 4 3157809
Calle 12 Sur, 18-168 (XM)
Medellín-Colombia

1. Introdução

A Colômbia é um dos países em que tem ocorrido um processo de reestruturação da indústria de energia elétrica. O novo esquema de mercado entrou em funcionamento no dia 20 de julho de 1995, com a entrada da Bolsa de Energia. A partir de então, mudou-se de um despacho centralizado, determinado pela otimização do uso dos recursos energéticos, para um despacho econômico de geração, utilizando preços de oferta e declaração de disponibilidade, fornecida diariamente pelos agentes geradores.

Para realizar o despacho econômico de geração, o Operador e Administrador do Sistema Elétrico Colombiano (chamado de XM), dadas as dificuldades da adequação de uma ferramenta comercial às novas exigências do mercado elétrico colombiano, identificou a necessidade de substituí-la por uma aplicação própria, suficientemente robusta, confiável, rápida e flexível que se adaptasse facilmente às mudanças do Mercado e que minimizasse os riscos inerentes aos cálculos diário e horário do programa de despacho e redespacho.

Por tais motivos, no início do ano de 2003, entra em operação comercial a ferramenta computacional Despacho e Reprogramação – DRP, para se obter o programa ótimo de geração dos recursos de geração e das Transações Internacionais de Eletricidade de Curto Prazo (TIE). O programa DRP é resultado de vários anos de pesquisa do Operador do Sistema, em que foram aplicadas técnicas avançadas de otimização e desenvolvimento de soluções de informática ao problema de despacho e operação do sistema elétrico colombiano.

Nas seguintes seções deste documento, serão apresentados os aspectos mais relevantes do sistema elétrico colombiano, a descrição geral do esquema de despacho na Colômbia em que se descreverá o modelo matemático do DRP, a metodologia da solução do problema de otimização e a forma como se usa o DRP para o cálculo dos preços de exportação e importação de energia e para a programação das TIE com outros sistemas despachados economicamente. Finalmente, são apresentados os resultados obtidos com a ferramenta.

2. Sistema Elétrico Colombiano

2.1. A Colômbia no contexto Latino-Americano

A Colômbia está localizada no noroeste da América do Sul, em que a costa é banhada por dois oceanos, Atlântico e Pacífico (veja Figura 1)

População	44,5 milhões
Área	1,1 milhão km ²
Cidades população > 1 milhão	Bogotá, Medellín, Cali, Barranquilla (8 cidades acima de 500.000 hab.)
PIB	94,5 bilhões de dólares
PIB per capita	US\$ 2123
Economia	Sétima economia na América e a quinta da América Latina

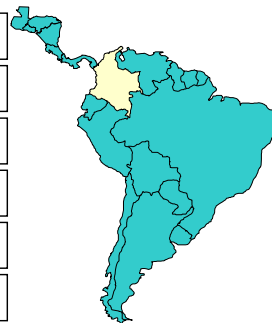


Figura 1. Situação da Colômbia

2.2. Características do Sistema Elétrico Colombiano (SE)

O sistema elétrico colombiano consiste em uma rede interconectada simples que atende aproximadamente 99% da demanda. A demanda restante, um pouco mais de 1% do total, é suprido por

geração local. Em 2005, o pico de carga foi 8.639 MW. A demanda de energia registrada foi de 48,829 GWh, com um aumento de 4,14% em relação a 2004. O consumo é distribuído em diferentes setores: 43,0% residencial, 34% industrial e 23% nos seguintes setores: comercial, órgãos do governo, iluminação pública e outros consumos.

A capacidade instalada total é 13.365,7 MW composta por 64% de usinas hidrelétricas e 36% de usinas térmicas. A Figura 2 mostra a característica do Sistema Elétrico e a distribuição geográfica da capacidade instalada e demanda na Colômbia.

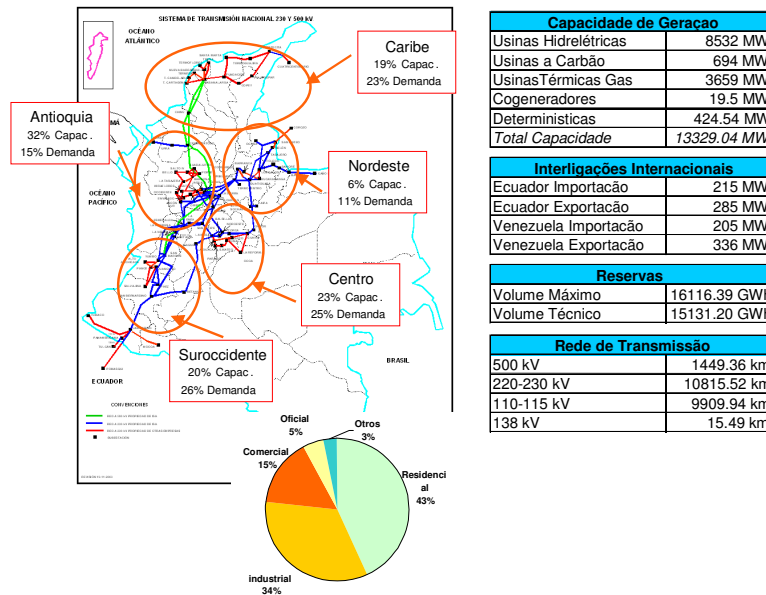


Figura 2. Características do SE - Capacidade Instalada e Demanda

2.3. Descrição geral do Mercado Elétrico Colombiano

No início da década de 90, a Colômbia modernizou o setor elétrico, abrindo-o à participação do investimento privado, e seguindo um esquema similar a dos países pioneiros nesse desenvolvimento, em especial o Reino Unido. Essa reestruturação se realizou com as leis 142 (Lei de Serviços Públicos) e 143 (Lei Elétrica) de 1994, que definiram o marco regulatório para estabelecer as condições que permitissem que seu desenvolvimento fosse determinado pela competição. Essas leis criaram o Mercado Atacadista de Energia Elétrica. A regulamentação desse mercado foi desenvolvida pela Comissão de Regulação de Energia e Gás – CREG.

A nova estrutura do mercado que começou a operar em 20 de julho de 1995, introduziu mudanças radicais no setor elétrico ao incentivar a competição, permitir o investimento privado, eliminar a verticalização e deixar o Estado somente com o papel de regulador. A Figura 3 mostra as principais atividades da cadeia produtiva do Mercado Elétrico Colombiano.

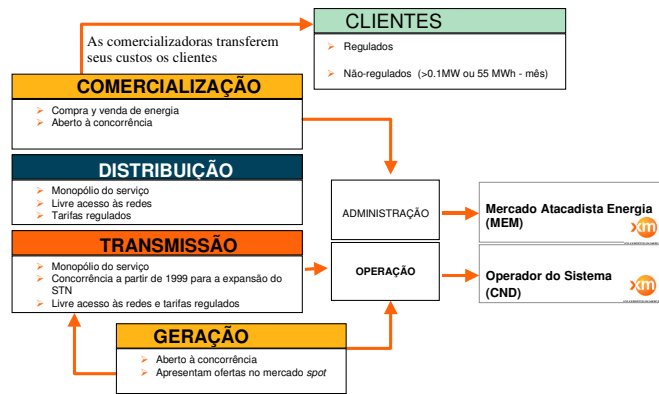


Figura 3. Cadeia Produtiva

3. Despacho Econômico de Energia na Colômbia

3.1. Descrição geral do esquema do despacho nacional

A energia é comercializada em dois mercados competitivos: a) mercado de curto prazo, em que a energia é comercializada em base horária para o dia seguinte; e b) mercado de longo prazo, em que a energia também é comercializada em base horária, mas para períodos mais longos através de contratos financeiros bilaterais.

Bolsa de Energia: Somente preços de oferta de geradores (\$/MW) e disponibilidade declarada (MW) neste mercado para cada uma das fontes de geração. Preços e disponibilidade são submetidos ao Operador Nacional do Sistema (CND) para cada hora do dia de operação. A demanda não é flexível, isto é, não existe licitação nem para os consumidores nem para as comercializadoras, e é definida através uma previsão de demanda que é acordada entre o CND e os operadores da rede.

Usando a oferta de preços, disponibilidade declarada, restrições de transmissão (representadas pelos limites de intercâmbios ou modelo de transmissão DC), restrições locais e regionais (representadas pela confiabilidade de geração "must run") reserva de AGC, características das unidades geradoras e previsão da demanda, o CND determina a relação de despacho ótimo para cada unidade térmica e hidráulica para as próximas 24h do dia seguinte.

3.2. Descrição Geral do Esquema de Despacho Coordenado (Transações Internacionais de Eletricidade TIE)

A Colômbia e o Equador têm seus sistemas interligados desde março de 2003. A interligação desses dois diferentes sistemas elétricos tem trazido vantagens para ambos os países. A principal vantagem são os custos operacionais evitados. Para um determinado momento, a energia pode ser transferida de um sistema para outro através da interligação pelo país que tem o menor custo de energia. Outra vantagem é o aumento da disponibilidade de energia como resultado da otimização da utilização das fontes dos dois países ao mesmo tempo.

Atualmente, existem duas interligações que conectam os sistemas elétricos da Colômbia e Equador. O primeiro em 220 kV tem uma capacidade de 250 MW e o segundo em 138 kV, com uma capacidade de 35 MW. Em janeiro de 2007, entrará em operação um novo circuito em 220 kV, com uma capacidade de 250 MW.

3.3. Descrição Geral do Esquema de Reprogramação do Despacho durante a Operação do Sistema

Durante a operação diária, os geradores são permitidos em re-declarar a disponibilidade de uma determinada fonte devido a indisponibilidades. Por outro lado, desde que o CND é responsável pela segurança do sistema e manter a frequência dentro de uma faixa aceitável (60 +/- 0,2 Hz), também é permitido, a qualquer instante, em ligar ou desligar unidades, redefinir a ordem de mérito dos geradores e restringir qualquer transferência.

A re-declaração de disponibilidade, modificação das restrições local, regional e sistêmicas, altas e baixas reservas AGC, intervenção de preço numa usina hidrelétrica e desvios da previsão de demanda acima de 20 MW são aceitas até uma hora e meia antes, para reprogramar a geração para a próxima hora de operação. Essa reprogramação é chamada de Programação Final, também em termos de MW médios, e deve ser enviada aos geradores pelo menos meia antes da hora de operação.

3.4. Tabela Diária para o Dia antes da Operação Coordenada

Na Colômbia, a operação coordenada da tabela diária para o dia seguinte acontece da seguinte maneira:

- Hora 08:00. As geradoras submetem preços de oferta e disponibilidade declarada pra cada uma de suas fontes
- Hora 13:00 O CND tem até essa hora para calcular e publicar os preços de oferta em cada nó de fronteira para exportação (PONE) e o máximo preço de importação em US/MWh. Para o caso colombiano, o PONE é calculado por componentes, que mostradas na Figura 4.

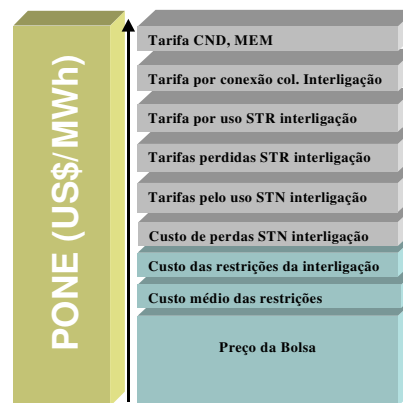


Figura 4. Componentes do PONE colombiano

Em geral, o DRP é utilizado para calcular as componentes do preço marginal da bolsa, o custo médio de restrições e as restrições das interligações, as outras componentes, são fixas e fornecidas pelo Administrador do Mercado Atacadista de Energia (MEM).

- Hora 13:05 Entre as 13h00 e as 13h05 o CND realiza um procedimento automático que determina a ativação ou não de uma TIE, comparando com o preço máximo para a importação e a curva de preços de oferta no nó de fronteira para exportação de cada um das interligações internacionais fornecidos por cada país. A Figura 5 mostra o processo de "settlement" de uma TIE.

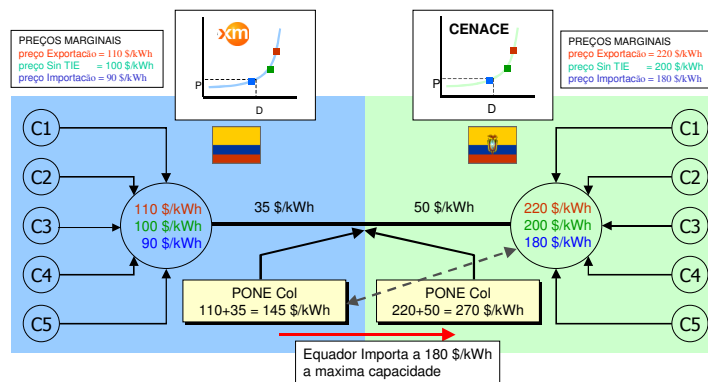


Figura 5. Esquema de Preços TIE

- Hora 13:35 Entre as 13h05 e as 13h35 cada país importador realiza um despacho programado adicionando a oferta do país exportador como um recurso próprio com o objetivo de definir o nível de importação a programar para atender a demanda nacional. Às 13h35 o país importador informará sua disposição de importação (MWh) para cada uma das interligações (na Colômbia é calculado usando o DRP).
- Hora 14:05 Entre as 13h35 e as 14h05, utilizando as declarações de preços e quantidades programadas, conclui-se o despacho programado usando o DRP.
- Hora 14:15 Entre as 14h05 e as 14h15, o CND deverá informar aos demais operadores e recebe desses, os programas de importação e exportação respectivamente, que deverão ser confirmados, modificados ou recusados antes de finalizar esse período.
- Hora 14:45 Se, como resultado do passo anterior, apresentam-se variações nos programas das transações, o CND realiza um novo despacho programado com tais ajustes.

3.5. Modelo de Despacho

3.5.1. Características gerais

Para se obter o programa ótimo de geração dos recursos de geração e das transações internacionais de eletricidade de curto prazo (TIE), o CND desenvolveu uma aplicação, chamada de DRP, que permite encontrar o despacho ótimo para atender a demanda de energia no horizonte determinado e administrar o esquema das TIEs.

As características básicas do DRP são as seguintes:

- Formulação matemática usando a programação inteira mista.
- DRP está desenvolvido em componentes, permitindo maior flexibilidade de uso.
- Tempos de execução extremamente rápidos, asseguram soluções ótimas em poucos segundos.
- Módulo de processamento de fórmulas matemáticas que permite modificar o problema matemático de despacho (função objetivo e restrições) através de interfaces gráficas sem necessidade de se alterar o código fonte do programa de despacho.
- A matriz gerada como resultado do modelamento matemático do problema a resolver pode ser lida por qualquer programa comercial de otimização.
- Conta com uma interface gráfica que facilita a representação dos elementos do sistema de potência, a entrada e consulta de informações, diminuindo enormemente a possibilidade de erros humanos na administração e interpretação dos resultados.
- Alto desempenho de processamento.

- DRP permite o modelamento de diferentes cenários (simulações, casos de estudo e casos de prova), facilitando a administração dos mesmos.
- DRP modela a rede de transmissão com níveis de tensão igual ou superior a 110 kV. Atualmente, o problema de despacho com a rede é composto por 212 unidades de geração, 599 linhas de transmissão e 438 nós.

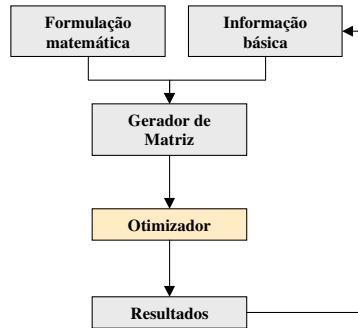


Figura 6. Arquitetura DRP

3.5.2. *Formulação matemática do despacho*

O problema do despacho é resolvido utilizando técnicas de otimização de Programação Inteira Mista (MIP, em inglês) minimizando o custo operativo do sistema sujeito às características técnicas das unidades de geração, a reserva secundária de frequência e as restrições da rede elétrica em regime permanente.

Em geral, o problema matemático é o seguinte:

$$\text{minimizar} \quad \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I p_{i,t} * G_{i,t}$$

Onde:

$P_{i,t}$ Preço de oferta do recurso i em \$/MWh, período de otimização t
 $G_{i,t}$ Variável de decisão do nível de geração i , período de otimização t

Sujeito a:

- restrições características técnicas de unidades de geração

Limites de geração.

$$g_{i,t}^{min} \leq G_{i,t} \leq g_{i,t}^{max}$$

tempos mínimos em operação e fora de operação

$$u_{i,t} = \begin{cases} 1 & \text{si } 1 \leq x_{i,t} \leq t_i^{on} \\ 0 & \text{si } -1 \geq x_{i,t} \geq -t_i^{off} \\ 1,0 & \text{em_outro_caso} \end{cases}$$

onde:

$g_{i,t}^{min}$ capacidade mínima de geração da unidade i , período de otimização t
 $g_{i,t}^{max}$ capacidade máxima de geração da unidade i , período de otimização t
 $x_{i,t}$ variável de estado da unidade i , período t (tempo em que a unidade tem estado em operação ou fora)

- $u_{i,t}$ variável de decisão binária que indica o estado da unidade para o período t
- t_i^{on} tempo mínimo que a unidade tem que permanecer em operação da unidade i
- t_i^{off} tempo mínimo que a unidade tem que permanecer fora de operação da unidade i

- Rampas de subidas e descidas
- Restrições de reserva secundária de frequência

$$\sum_{i=1}^I G_{i,t} - g_{i,t}^{min} \geq r_t^{down} \quad \forall \quad u_{i,t} = 1$$

$$\sum_{i=1}^I -G_{i,t} + g_{i,t}^{max} \geq r_t^{up} \quad \forall \quad u_{i,t} = 1$$

onde:

- r_t^{up} valor de reserva secundária para acima, requerida no período t
- r_t^{down} valor de reserva secundária para baixo, requerida no período t

- Restrições de limites de áreas elétricas

$$\sum_{i \in a}^{I_a} G_{i \in a,t} + I_{a,t} \leq d_{a,t}$$

$$-I_{a,t}^{exp} \leq I_{a,t} \leq I_{a,t}^{imp}$$

onde:

- $I_{a,t}$ variável de estado de intercâmbio em MWh da área elétrica a no período t
- $I_{a,t}^{exp}$ valor da capacidade máxima de exportação em MWh da área elétrica a no período t
- $I_{a,t}^{imp}$ valor da capacidade máxima de importação em MWh da área elétrica a no período t
- $d_{a,t}$ valor da demanda em MWh da área elétrica a no período t
- $i \in a$ índice das unidades de geração i que estão dentro da área elétrica a

- Restrições de balanço demanda-geração:

$$\sum_{i=1}^I G_{i,t} = d_{it}^{sistema}$$

onde:

- $d_{it}^{sistema}$ valor da demanda total do sistema em MWh do período t

- Restrições da rede elétrica (modelo DC)

É utilizado um fluxo de potência DC para modelar a rede elétrica, através das seguintes premissas:

- Todas as tensões nodais são 1,0 p.u.
- A resistência é baixa em comparação à reatância da linha de transmissão.
- A diferença angular através de uma linha de transmissão é pequena.
- Não se calcula a potência reativa do sistema

O fluxo de potência ativa através de uma linha de transmissão é calculado como:

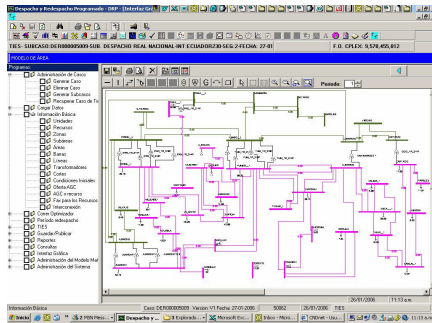
$$P_{kl} = \frac{(\theta_k - \theta_l)}{x_{kl}}$$

onde:

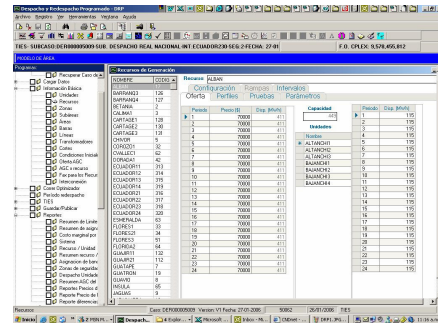
- P_{kl} Fluxo de potência ativa na linha de transmissão entre os nós k,l
- θ_k Ângulo da tensão no nó k
- x_{kl} Valor da reatância da linha de transmissão

4. Resultados obtidos com o DRP

- DRP começou a operar oficialmente em 1º de março de 2003. A partir de então, tornou-se a ferramenta oficial do CND para o cálculo de despacho coordenado, redespacho e cálculo dos preços PONE do Sistema Elétrico da Colômbia (SE). Apesar da grande quantidade de despachos, do grau da complexidade que esses implicam e do curto espaço de tempo que se dispõe para o cálculo e publicação, o DRP tem permitido manter índices de oportunidade próximo de 100% na entrega do despacho programado final.
- O DRP, que em resumo é unidade de compromisso com restrições de fluxo de potência DC, garante soluções superiores aos padrões de qualidade impostos pela resolução colombiana para o algoritmo de otimização do despacho e redespacho. Adicionalmente, obtém o programa ótimo de geração do SE considerando todas as regras do Mercado Elétrico Colombiano.
- Entre outros, o DRP fornece os seguintes resultados: programa de despacho para cada planta do sistema em MW, preços marginais nodais, preço marginal do sistema, intercâmbios entre áreas em MW, fluxo em MW nas linhas de transmissão, unidades de geração despachadas para atender a segurança do sistema, alocação do AGC, demanda não atendida, preços PONE para as TIE.
- A interface gráfica do usuário do DRP é de última geração, desenvolvida em ambiente Windows. As consultas e relatórios são gerados de forma gráfica e tabular para facilitar a análise dos resultados pelos analistas de despacho e redespacho.



Interface gráfica Rede Elétrica



Interface tabular de dados

Figura 7. Interface gráfica DRP

- O módulo de formulação matemática do DRP permite gerar matrizes em formato LP ou MPS a partir da informação armazenada na base de dados. A entrada da formulação do problema de otimização é realizada através de uma interface amigável, introduzindo expressões matemáticas que se relacionam com as variáveis e dados armazenados na base de dados.
- Aproveitando a flexibilidade do Módulo de Formulação Matemática, XM tem desenvolvido um protótipo de despachos hidrotérmicos modificando a estrutura do DRP para introduzir o conceito de etapas de otimização e blocos de demanda. O protótipo modela as restrições de balanço hídrico

e restrições operativas das usinas hidráulicas do sistema, permitindo resolver problemas hidrotérmicos determinísticos para j etapas e k blocos de demanda

5. Conclusões

- Esse artigo apresentou o modelo de despacho e redespacho do mercado elétrico colombiano, baseado em programação inteira mista e desenvolvido pela Companhia XM para obter o programa ótimo de geração dos recursos de geração nacional, calcular os preços de exportação das TIEs e realizar o despacho coordenado com outros países que fazem parte do esquema de transações internacionais com a Colômbia.
- Diante das exigências condicionantes, o DRP é uma ferramenta que tem tornado factível a implantação de novas regras ao despacho econômico, ajustando-se à dinâmica de mercado elétrico colombiano e aos aspectos relacionados com as TIEs.
- As interfaces gráficas do usuário para a entrada e consulta de informações têm se desenvolvido seguindo as especificações e necessidades do processo de despacho e redespacho. Tais desenvolvimentos têm contribuído a diminuir o número de erros humanos na administração e interpretação de informações durante o cálculo do despacho econômico e das TIEs.
- Finalmente, o método de solução do problema de otimização resolve o problema de despacho integrando todas as restrições e regras do mercado elétrico colombiano, obtendo soluções ótimas que superam os padrões de qualidade impostos pela regulação colombiana com altos índices de oportunidade na entrega do programa de geração dos recursos de geração.

BIBLIOGRAFIA

- [1] J. C. Morales, S.E Cossio “Modelo de despacho económico”, III Reunion Internacional de Generación & Transmision y Operadores y Administradores de Mercados “Riesgo & Productividad”, Medellín, 11 - 14 septiembre de 2005.
- [2] P.H. Corredor, A.M Fonseca, "Columbian electricity market", Power Engineering Review, IEEE, volume: 19 9 , page(s): 4 -12, September 1999.
- [2] A. J. Svoboda, Chung-Li Tseng, Chao-an Li, Raymond B. Johnson, “Short-Term Resource Scheduling with Ramp Constraints”, IEEE Transactions on Power Systems., vol 12 No. 1 , February 1997.
- [3] Ma, H.; Shahidehpour, S.M., “Unit commitment with transmission security and voltage constraints”, IEEE Transactions on Power Systems, vol 14 No. 2 , May 1999.
- [4] A. J. Wood, B. F. Wollenberg, Power Generation, Operation, and Control. 2nd Edition. January 1996.
- [5] A. J. Monticelli, Fluxo de Carga em Redes de Energia Eléctrica. Sao Paulo: Edgar Blucher, 1983.
- [6] CREG Comisión de Regulación de Energía y Gas (www.creg.gov.co). Resoluciones 1995 – 2005.