



**XXI SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
23 a 26 de Outubro de 2011
Florianópolis - SC

GRUPO -VII

GRUPO DE ESTUDO DE PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ELÉTRICOS- GPL

**UM MODELO PARA A EXPANSÃO ÓTIMA MULTIOBJETIVO:
CONCILIANDO ASPECTOS ECONÔMICOS E AMBIENTAIS**

Leontina Pinto(*)

**Paula Leite
ENGENHO**

Luiz Macêdo

RESUMO

Este trabalho apresenta um modelo completo para o planejamento integrado da operação/expansão capaz de considerar simultaneamente os aspectos técnicos, econômicos e ambientais. É possível, assim, planejar o sistema segundo critérios baseado em economia (mínimo custo), segurança (mínimo risco ou arrependimento) e ambiental (mínimas emissões de CO₂). Mais do que a busca da solução ótima, desejamos analisar corretamente todas as consequências das possíveis decisões: custo, risco e impacto ambiental. Casos-exemplo realistas comparam expansões sob os diversos critérios. Merece especial atenção a análise do impacto ambiental causado pela geração térmica consequente da redução da capacidade de regularização da usina Belo Monte.

PALAVRAS-CHAVE

Planejamento integrado, Critérios multiobjetivo, Perda de Regularização, Restrições Ambientais

1.0 - INTRODUÇÃO

O Brasil é um país que quer crescer, e precisa de energia para isso. A expansão da oferta é necessária e urgente. Entretanto, esta necessidade e urgência não são claramente percebidas pela sociedade. A construção de novas usinas é vista, muitas vezes, como uma agressão ambiental - e sofre pesadas restrições. Um exemplo emblemático é a usina de Belo Monte: apesar de ser, em princípio, uma energia "limpa", a consequente inundação em região protegida levou à pesada redução do seu reservatório. A aparente proteção ambiental leva a usina a perder uma importante capacidade de regulação que leva à necessidade de maior complementação térmica, e portanto ao aumento de emissões - exatamente o contrário do objetivo inicial.

O objetivo deste trabalho é propor uma ferramenta integrada, capaz de tratar simultaneamente os problemas de planejamento e operação, acomodando restrições econômicas, sistêmicas e ambientais. A modelagem multi-objetivo permite a consideração (eventualmente ponderada) de vários objetivos conflitantes. Mais ainda, é possível avaliar qualitativamente e quantitativamente o impacto de cada meta ou restrição sob qualquer ponto de vista desejado.

2.0 - O PROBLEMA INTEGRADO

O problema de planejamento integrado deve

- ser formulado em termos das reais variáveis de controle: expansão e operação
- considerar os possíveis cenários futuros de sistema/mercado, incluindo incertezas em oferta, preços e demanda
- acomodar as distintas classes de restrições: sistêmicas, econômicas, riscos e ambientais

(*) Av. Cândido Portinari, 400 – CEP 22 793-312 Rio de Janeiro, RJ – Brasil
Tel/fax (+55 21) 3329-3662 –Email: leontina@engenh.com

2.1 Formulação clássica

A referência [1] apresenta uma plataforma completa e integrada para o planejamento da operação/expansão. Para maior clareza, optamos por apresentar neste trabalho a formulação resumida; maiores detalhes podem ser obtidos no relatório mencionado.

O planejamento ótimo de um sistema hidrotérmico busca o cronograma dos novos recursos (geração e transmissão, por exemplo) capaz de minimizar o valor esperado do custo conjunto operação + expansão ao longo do tempo e de todos os possíveis cenários futuros, como na formulação a seguir:

$$\text{Min } \sum_t E_c(COP(x_{t,c}) + CEXP(y_t)) \quad (1)$$

s/a

$$AEN_{t,c}(x_{t,c}) \leq ben_{t,c} \quad (2)$$

$$AET_{t,c}(x_{t,c}) \leq bet_{t,c} \quad (3)$$

$$ADEM_{t,c}(x_{t,c}) \leq bd_{t,c} \quad (4)$$

$$F_{t,c}(x_{t,c}) \leq G_c(y_t) \quad (5)$$

onde

$x_{t,c}$ são as variáveis de operação associadas ao cenário c no instante de tempo t . Correspondem às grandezas energéticas (volumes nos reservatórios, gerações de várias fontes, etc.) e elétricas (fluxos nas linhas de intercâmbio, por exemplo); são distintas para cada instante e cada possível cenário futuro.

y_t são as variáveis de expansão y (novas linhas, usinas, etc.) no instante de tempo t , configurando o cronograma de obras. É interessante notar que, enquanto as variáveis de operação dependem dos cenários futuros, as variáveis de expansão são decididas com a antecedência necessária para a construção da obra - antes, portanto, que os cenários futuros ocorram. Valem portanto para qualquer cenário. Evidentemente, a otimização do planejamento pode (e deve) ser revista periodicamente (por exemplo, a cada ano), e a expansão pode ser ajustada à medida em que o avanço no tempo delinea melhor os cenários futuros. As variáveis de expansão podem, a critério do usuário, ser discretas (a obra entra ou não) ou contínuas (admite-se amoldar a capacidade de um novo recurso ao sistema).

$E_c COP(x_{t,c})$ é o valor esperado, ao longo dos cenários futuros s , do custo associado às variáveis de operação $x_{t,c}$. Corresponde, dentre outros, aos custos de operação de cada fonte energética, eventualmente complementado por penalizações associadas a restrições específicas. Como no atual modelo brasileiro, o valor da água é calculado pelo próprio modelo de otimização em função dos custos futuros evitados; os custos dos recursos hídricos podem, assim, ser considerados nulos (ou receber valores mais realistas, que reflitam os custos de operação das hidroelétricas). Para maior simplicidade, não representaremos aqui taxas de retorno, fluxos de desembolsos plurianuais ou taxas de depreciação - que podem ser facilmente incluídos na formulação.

$CEXP(y_t)$ é o custo associado às variáveis de expansão construídas no instante de tempo t . Para maior simplicidade, não consideraremos taxas de retorno, fluxos de desembolsos plurianuais ou taxas de depreciação - que podem ser facilmente incluídos na formulação.

$AEN_{t,c}(x_{t,c})$ é o conjunto de restrições associadas à operação energética a cada instante de tempo t e em cada cenário c . Algumas destas restrições devem ser obtidas através de simulações externas. Por exemplo, a função que relaciona a capacidade da usina ao nível do reservatório (para acomodar a perda de capacidade por deplecionamento) deve ser obtida a partir de simulações hidrológicas.

$ben_{t,c}$ são os limites associados às restrições energéticas a cada instante de tempo t e em cada cenário c , como balanço hídrico, disponibilidades hidráulicas (afluências e armazenamentos), capacidades de reservatórios, limites em turbinamentos, etc.

$AET_{t,c}(x_{t,c})$ é o conjunto de restrições associadas à transmissão, a cada instante de tempo t e em cada cenário c , restritas pelos correspondentes limites $bet_{t,c}$. Uma modelagem mais abrangente pode incluir restrições elétricas de distribuição de fluxos nas linhas (Leis de Kirchhoff).

$ADEM_{t,c}(x_{t,c})$ é o conjunto de restrições associadas ao atendimento à demanda $bd_{t,c}$ no instante de tempo t e em cada cenário c .

$F_{t,c}(x_{t,c}) \leq G_c(y_t)$ é o conjunto de restrições que conjuga as variáveis de controle $x_{t,c}$ às variáveis de expansão y_t . Correspondem normalmente aos limites (geração, armazenamento, transmissão) alterados por expansões. Por exemplo, o limite de uma linha não construída é nulo; o limite de uma linha construída corresponde à sua capacidade física de transmissão.

2.2 Extensão para o Problema Multi-objetivo

A extensão para o problema multi-objetivo é imediata. Basta agregar à formulação básica o "custo ambiental":

$$COP(x_{t,c}) = \sum_u \alpha(c_{t,c,u} G_{t,c,u}) + \beta(e_{t,c,u} G_{t,c,u}) \quad (6)$$

onde

α e β são os "pesos" atribuídos às classes de objetivos - neste caso, econômicas e ambientais

$c_{t,c,u}$ são os custos incrementais (econômicos) associados a cada usina u , no instante de tempo t , cenário c

$e_{t,c,u}$ são as emissões incrementais associadas a cada usina u , no instante de tempo t , cenário c

$G_{t,c,u}$ é a geração da usina u , no instante de tempo t , cenário c

uma extensão semelhante pode ser aplicada ao custo da expansão CEXP(y), de modo a incluir também as emissões associadas à construção das usinas.

2.3 A quantificação do impacto ambiental

O impacto ambiental associado à construção e operação de uma usina dependerá, evidentemente, de suas características específicas, e é normalmente quantificado através de metodologias próprias. Não há, ainda (ao menos no conhecimento dos autores) uma única metodologia de consenso entre todos os especialistas e instituições.

Uma forma razoavelmente simples e transparente de quantificar o impacto ambiental da geração é o cálculo das emissões de gases atmosféricos causada pelo processo. Normalmente, o impacto dos diversos gases é "normalizado" em termos de seu "equivalente" CO₂ - por exemplo, o equivalente CO₂ do gás metano é igual a 21, já que se acredita que potencial de aquecimento global do gás **metano** é 21 vezes maior do que o potencial do CO₂. Adotamos, neste trabalho, a norma estabelecida pelo Ministério de Minas e Energia e pelo Ministério da Ciência e Tecnologia [2,3], que especifica o equivalente em emissões CO₂ por fonte de energia.

2.4 Solução Computacional

O modelo descrito foi implementado através de um protótipo para o planejamento do sistema brasileiro, descrita no Anexo 1. O programa foi desenvolvido no ambiente Matlab e utiliza o otimizador Cplex. A integração com planilhas compatíveis com o Excel permitem a importação/exportação de informações de forma simples e imediata. Interfaces amigáveis desenhadas especialmente para o sistema brasileiro auxiliam o usuário, que pode, de acordo com seus objetivos e necessidades, controlar facilmente o programa e direcionar as análises desejadas.

Dentre outras funcionalidades, é possível:

- ✓ realizar a otimização da operação do sistema integrado - simulando, por exemplo, o modelo Newave - calculando todas as variáveis de operação e custos marginais associados
- ✓ realizar a otimização da expansão do sistema integrado, avaliando inclusive a operação por cenários, calculando os custos marginais associados (operação e expansão, por cenário, subsistema, instante de tempo ou patamar)
- ✓ realizar a análise de sensibilidade do sistema a novos investimentos, restrições ou diretrizes de operação
- ✓ realizar simulações que permitam uma análise mais detalhada (por cenário, subsistema, instante de tempo ou patamar dos resultados de investimento e operação).

Todas as análises, simulações e execuções são realizadas rápida e eficientemente, em tempo quase-real. O usuário pode, assim, realizar análises/sínteses de forma interativa, precisa e confiável.

3.0 - APLICAÇÃO 1: OBJETIVO ECONÔMICO X AMBIENTAL

3.1 O Estudo Realizado

A meta do primeiro estudo é a comparação entre as soluções ótimas vistas por objetivos conflitantes: o econômico (Mínimo custo) e o ambiental (Mínimas emissões). O ponto de partida do estudo corresponde à configuração básica compatível com o plano de expansão brasileiro - incluindo as obras estruturantes hidroelétricas.

O estudo realiza a gestão ótima da expansão para o plano decenal 2008-2017 confeccionado pela EPE [4] detalhando a operação ao longo de dez anos. Para maior simplicidade, as incertezas futuras restringem-se às hidrologias, embora não exista qualquer problema em considerar outras incertezas (demandas, preços de combustível, etc;)

3.2 Os objetivos conflitantes: economia x ambiente

A Figura 1 e a Figura 2 apresentam os montantes médios de geração térmica por fonte para o planejamento baseado no critério econômico e ambiental. É possível notar que as usinas a carvão (mais baratas, mas mais poluentes) são substituídas por usinas a gás (mais caras, mas mais limpas).

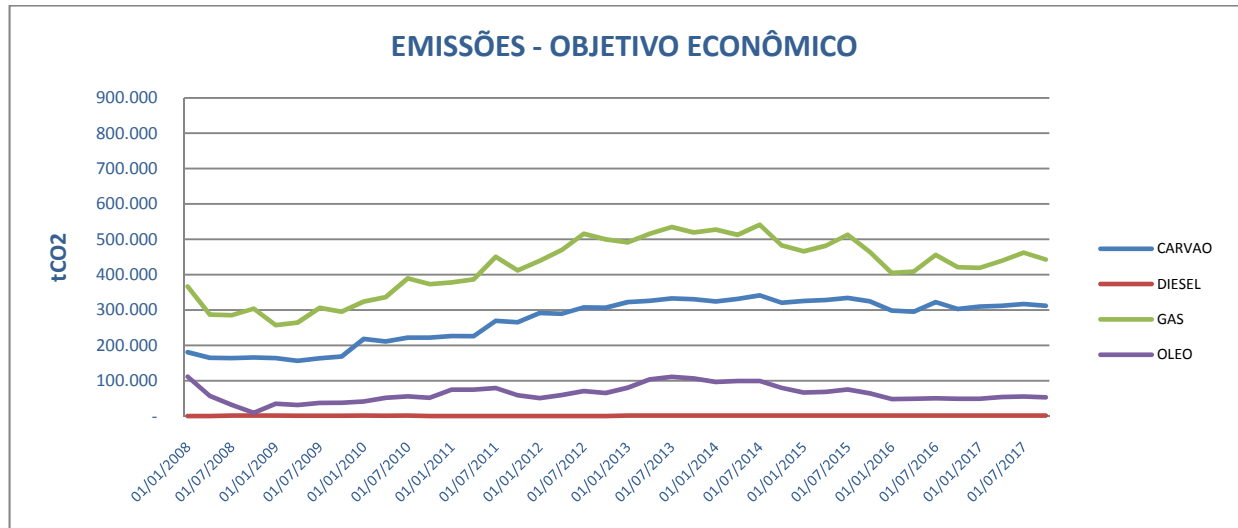


Figura 1 – Resultados do planejamento/operação visando o mínimo custo

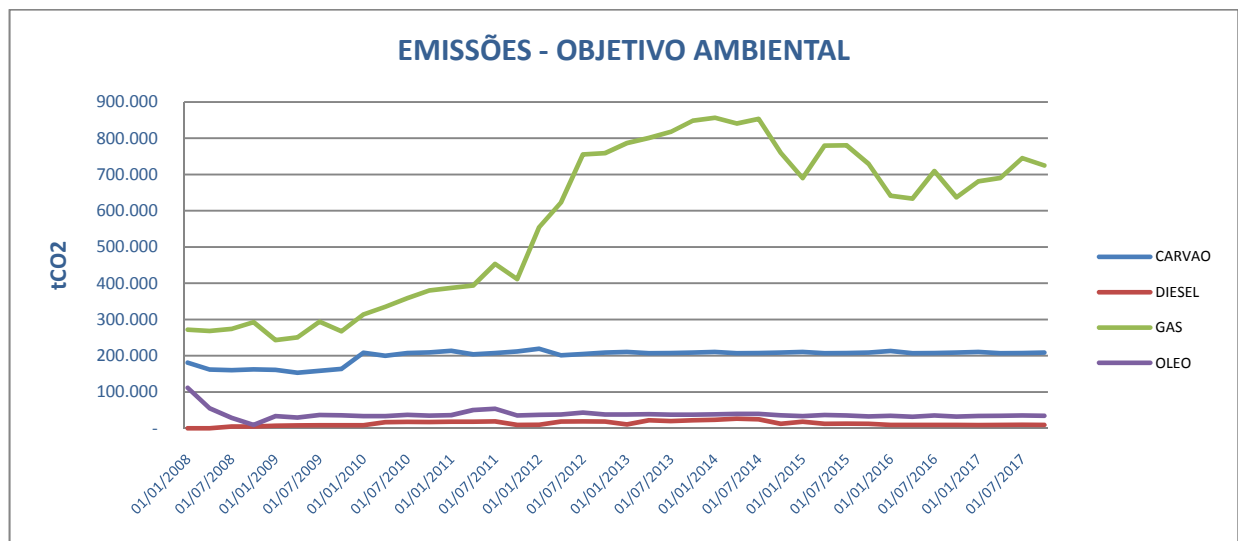


Figura 2 – Resultados do planejamento/operação visando as mínimas emissões

Uma análise mais profunda mostra ainda que:

- ✓ o custo ambiental da meta econômica: a expectativa de emissões associadas à solução de mínimo custo é de 19 milhões de toneladas de CO₂ ao longo de dez anos - o que equivale, aproximadamente às emissões que seriam geradas **pelo desmatamento de 650 Km² na Amazônia**.
- ✓ o custo econômico da meta ambiental: a expansão ambiental utiliza usinas mais "limpas" - porém mais caras. A opção ambiental gera um custo esperado de aproximadamente **R\$ 6.5 bilhões** - um valor expressivo, principalmente em um país que ainda enfrenta desafios em áreas básicas.

3.3 A Análise de Riscos

Sabe-se que o cálculo baseado em expectativas (médias ponderadas) pode levar a distorções, já que não explicita os piores casos (riscos). Para isso, será necessário conhecer a distribuição de probabilidades associadas aos diversos possíveis cenários futuros. A Figura 3 apresenta a distribuição de probabilidades acumuladas do custo ambiental relativo à opção econômica: é possível notar o risco de emissões atmosféricas da ordem de até 45 milhões de tCO₂ em dez anos, equivalentes ao desmatamento de uma área de 1500 Km² na Amazônia.

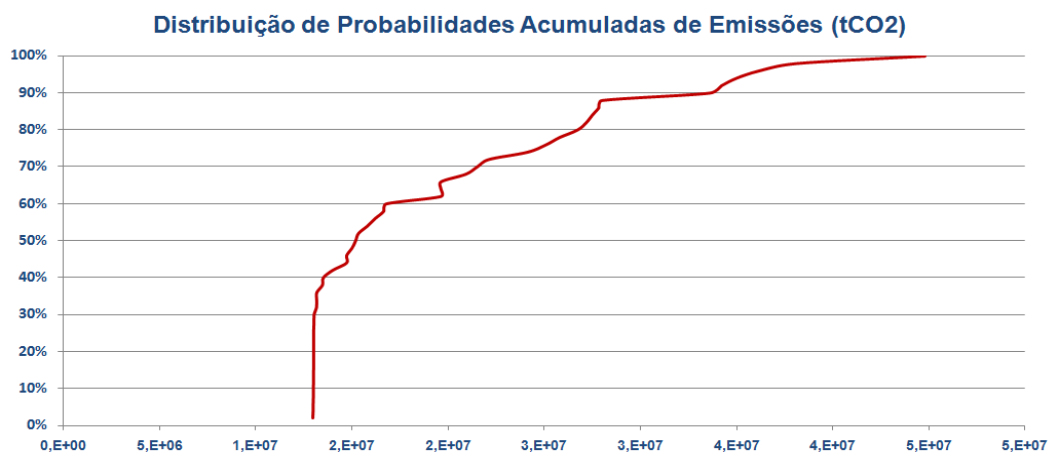


Figura 3 – Probabilidades acumuladas do custo ambiental associado à opção econômica

Analogamente, a Figura 4 apresenta a distribuição de probabilidades acumuladas do custo econômico da opção ambiental. Há risco de custos da ordem de até 17 bilhões (ao longo de dez anos) - um preço considerável, principalmente em um país ainda com necessidades sociais prementes a solucionar.

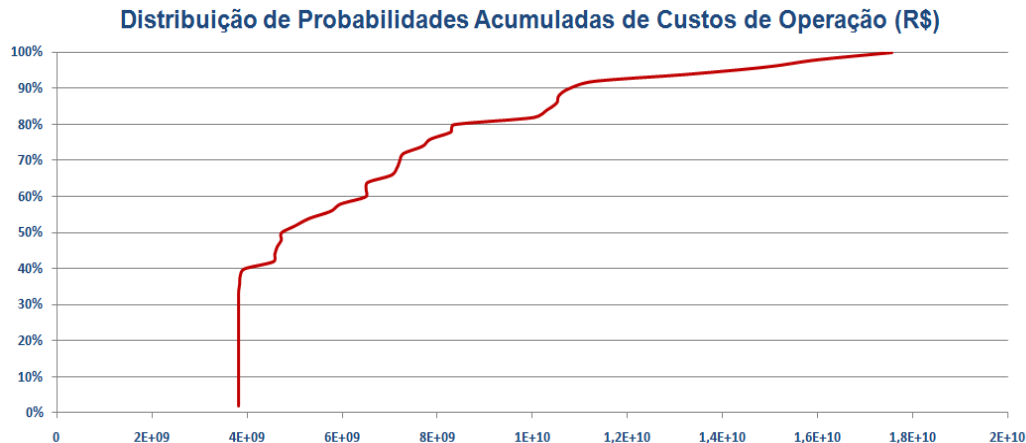


Figura 4 – Probabilidades acumuladas do custo econômico associado à opção ambiental

4.0 - APLICAÇÃO 2: CUSTO AMBIENTAL DA REDUÇÃO DE REGULARIZAÇÃO DE BELO MONTE

4.1 O Estudo Realizado

A usina de Belo Monte é um projeto polêmico e um exemplo clássico de planejamento sob objetivos conflitantes. A solução de compromisso encontrada foi a redução na área que seria alagada pelo complexo gerador: dos 1225 Km² inicialmente previstos, apenas 516 Km² serão utilizados no novo projeto (teoricamente, apenas a área que já é naturalmente alagada em épocas de cheias). A economia em área desmatada (709 Km²) reduziu significativamente a capacidade de armazenamento da usina e conseqüentemente sua capacidade de regulação.

Uma pergunta que paira no meio técnico é a real vantagem desta redução em termos ambientais, uma vez que a redução na capacidade de regulação pode levar ao desperdício de água - que não pode ser armazenada para a geração em períodos de seca e à possível necessidade de aumento da geração térmica complementar (que, por sua vez, gera emissões atmosféricas).

Realizamos um estudo que simula a operação brasileira considerando duas configurações alternativas: a primeira considera o projeto inicial da usina de Belo Monte e o volume inicialmente previsto; a segunda contempla a usina tal qual será construída, com a regulação restrita [5].

As diferenças entre as emissões térmicas associadas ao projeto original e atual de Belo Monte podem ser observadas na Figura 5. Se adotado o projeto inicial, a economia em geração térmica levaria a uma redução de emissões igual a 1,1 Milhão tCO₂, equivalente a uma área amazônica desmatada igual a aproximadamente 37Km² em dez anos. Em outras palavras, a opção ambiental de Belo Monte parece eficiente: mantidos estes números, seriam necessários quase dois séculos em operação para que as emissões térmicas igualassem a emissão evitada pelo desmatamento.

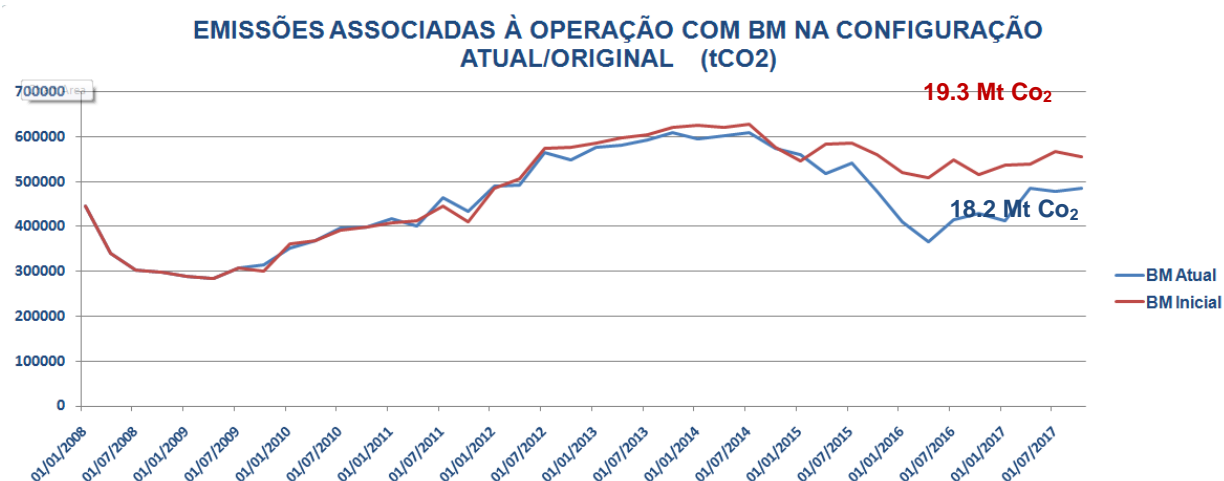


Figura 5 – Emissões esperadas associadas à operação: Belo Monte na configuração inicial e atual

Por outro lado, o custo econômico da opção ambiental, ilustrado na Figura 6, é expressivo: R\$ 285 milhões.

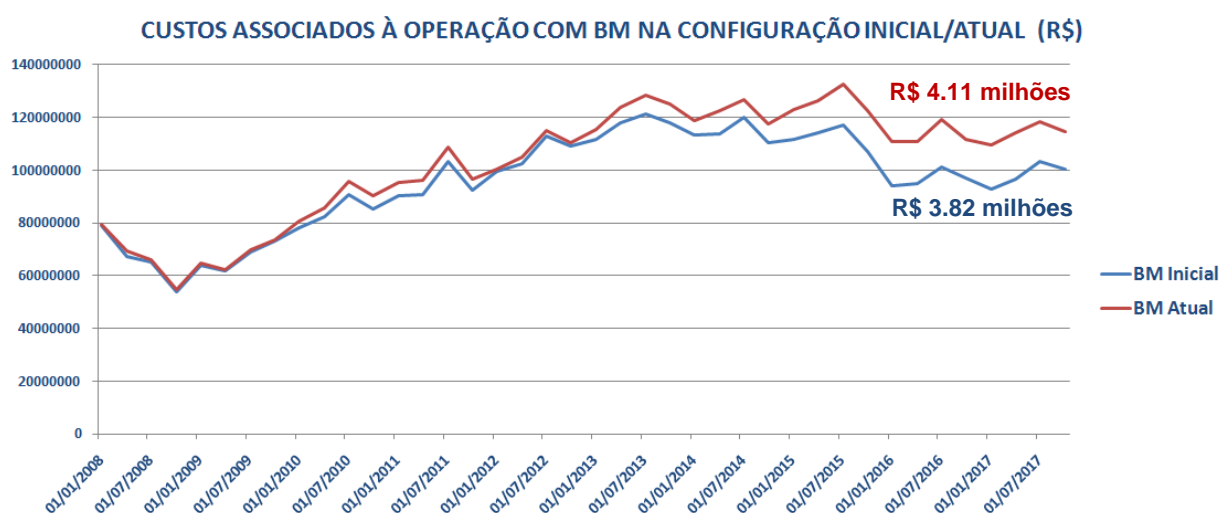


Figura 6 – Custos esperados associados à operação: Belo Monte na configuração inicial e atual

5.0 - O CUSTO MARGINAL DA DEMANDA

O problema de expansão/operação visando as mínimas emissões ambientais produz, como subproduto, uma informação bastante interessante: o custo marginal da demanda πd associado à restrição (4) - ou, em outras palavras, o incremento das emissões atmosféricas associado ao crescimento da demanda.

$$\pi d_{t,c} = \frac{\partial(\sum_t E_c(COP(x_{t,c}) + CEXP(y_t)))}{\partial(bd_{t,c})} \quad (7)$$

Esta informação, que chamaremos aqui "custo ambiental marginal", é bastante relevante, já que é capaz de informar as consequências, o quão "limpo" é o consumo de energia - ou, em outras palavras, as emissões atmosféricas associadas ao consumo. O monitoramento deste índice torna transparente à sociedade as consequências ambientais de seus hábitos e pode ser, inclusive, o primeiro passo para o estabelecimento de ações na direção de um consumo consciente.

A Figura 7 apresenta o valor esperado do custo ambiental marginal (em termos de emissões) ao longo do tempo para a configuração de referência (Belo Monte em sua capacidade atual).

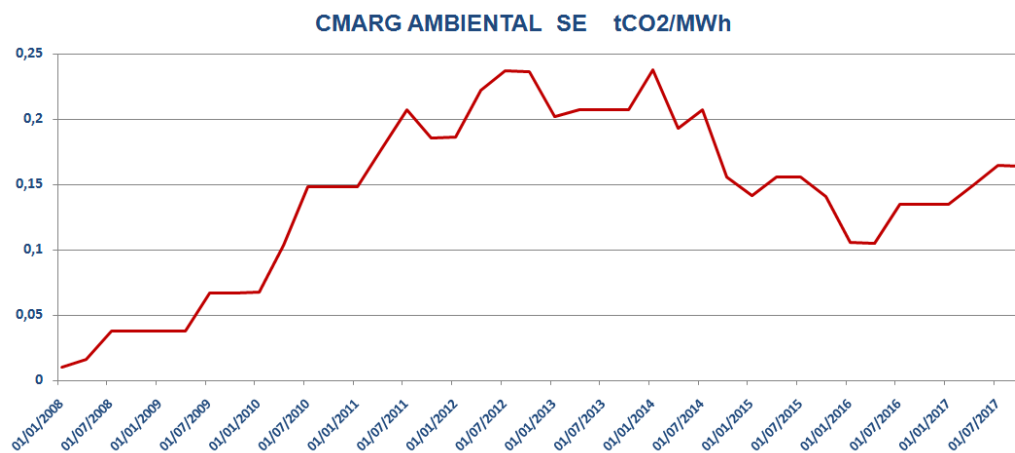


Figura 7 - Custo ambiental marginal

6.0 - CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta um modelo integrado capaz de otimizar simultaneamente a expansão e a operação do sistema brasileiro, administrando o conjunto de possíveis objetivos conflitantes (econômico, segurança e ambiental) e todas as restrições a eles associadas.

É possível, assim, manejar a otimização de objetivos conflitantes, calculando o preço das duas opções: a econômica e ambiental. Os estudos realizados identificaram alguns pontos para a reflexão:

- ✓ A solução econômica tem um custo ambiental que pode ser completamente identificado e quantificado. Este custo tem-se mostrado significativo e, em alguns casos, comparável ao eterno vilão do desmatamento.
- ✓ Por outro lado, a solução ambientalmente adequada é bastante mais cara. Este fato não chega a ser surpreendente: ações ambientais são normalmente onerosas, e requerem um financiamento expressivo. Não é nosso objetivo avaliar possibilidades de mitigação de custos (como por exemplo o mercado de créditos de carbono). Desejamos apenas evidenciar que a sociedade deve estar consciente do preço de suas opções.

O caso da usina de Belo Monte, por exemplo, mostra que a opção ambientalmente correta é efetivamente a redução da capacidade de regularização. No entanto, esta opção leva a um custo econômico considerável, que - novamente - deve ser calculado e divulgado de forma transparente.

Uma forma interessante de engajar a sociedade na questão do impacto ambiental é oferecer a possibilidade de gestão da demanda a partir do impacto ambiental associado. Propomos, neste trabalho, propor o cálculo de um novo custo marginal, capaz de medir o impacto ambiental do consumo de energia. Este indicador - **o custo marginal ambiental** - poderá ser amplamente utilizado em ações de conservação e evoluir para a gestão da demanda (incluindo a auto-gestão) na direção da energia limpa.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Relatório Engenho/Apine, "Planejamento Integrado do Sistema Brasileiro: uma nova visão", junho de 2010
- (2) Ministério de Ciência e Tecnologia, disponível no momento deste trabalho através do link http://www.mct.gov.br/upd_blob/0027/27596.pdf
- (3) Segundo Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa - Relatórios de Referência - Emissões de Gases de Efeito Estufa no Setor Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Florestas - Emissões de CO₂ Pelo Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Florestas. Ministério da Ciência e Tecnologia, 2010
- (4) EPE, Plano Decenal 2008-17, no momento deste trabalho descrito no link <http://www.epe.gov.br/PDEE/Forms/EPEEstudo.aspx>
- (5) EPE, descrição do Projeto Belo Monte, no momento deste trabalho descrito no link <http://www.epe.gov.br/leiloes/Documents/Leil%C3%A3o%20Belo%20Monte/Belo%20Monte%20-%20Fatos%20e%20Dados%20-%20POR.pdf>

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Leontina Pinto é engenheira eletricista pela UFRJ (1979), mestre em ciências em Engenharia de Sistemas pela COPPE/UFRJ (1981) e doutora em Matemática Aplicada pelo IM/UFRJ (1986). Foi pesquisadora do CEPEL, professora da COPPE/UFRJ e PUC-RIO e é atualmente diretora-executiva da Engenho Pesquisa, Desenvolvimento e Consultoria Ltda. Seus interesses incluem o planejamento/operação de sistemas de energia, a comercialização e gestão de riscos em mercados de energia, a projeção de cenários futuros de mercados e preços.

Paula Leite é engenheira eletricista pela PUC-Rio (2006), mestre em ciências em Engenharia Elétrica pela PUC-Rio (1981) e doutoranda em Engenharia de Sistemas pela COPPE/UFRJ. Trabalha atualmente na Engenho Pesquisa, Desenvolvimento e Consultoria Ltda. Seus interesses incluem o planejamento/operação de sistemas de energia e a comercialização e gestão de riscos em mercados de energia.

Luiz Henrique Macêdo é engenheiro eletricista pela UFG (1999), mestre em Telecomunicações pela PUC-Rio (2001) e doutor em Processamento de Sinais pela PUC-Rio (2006). Desde 2006 é Gestor de Pesquisa da Engenho Pesquisa, Desenvolvimento e Consultoria Ltda. Seus interesses incluem a projeção de cenários climatológicos e de consumo para estudos energéticos, a análise e a simulação regulatória, e o desenvolvimento de plataformas de apoio à decisão voltadas para o setor.