



INCORPORAÇÃO DE CRITÉRIOS SOCIOAMBIENTAIS NA FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DE LONGO PRAZO DA EXPANSÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Adhara Ginaid

Universidade Federal do Rio de Janeiro
Av. Athos da Silveira Ramos, 149 - Rio de Janeiro - RJ
ginaid@poli.ufrj.br

Luiz Guilherme Barbosa Marzano

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
Avenida Horácio Macedo, 354 - Rio de Janeiro - RJ
marzano@cepel.br

Carlos Henrique Medeiros de Sabóia

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
Avenida Horácio Macedo, 354 - Rio de Janeiro - RJ
saboia@cepel.br

RESUMO

O planejamento sustentável do setor elétrico brasileiro é uma tarefa muito complexa devido a necessidade de garantir o suprimento futuro do mercado de energia considerando objetivos conflitantes e diversas incertezas inerentes de um sistema hidrotérmico. O objetivo deste trabalho é propor uma metodologia multiobjetivo de modo a incorporar critérios socioambientais na formulação do problema de planejamento de longo prazo da expansão da geração de energia elétrica. Os critérios selecionados para o estudo de caso foram: uso do solo, modos de vida, populações tradicionais e ribeirinhas, aversão ao risco, poluição sonora, qualidade da água, qualidade do ar, resíduos sólidos radioativos, contaminação por radiação e aquecimento global. Os resultados apontam uma alteração do mix de expansão das fontes de geração de energia elétrica, com aumento a participação de fontes com menor impacto socioambiental como gás natural, biomassa, eólica e biogás.

**PALAVRAS CHAVE. Planejamento da Expansão de Longo Prazo, Impacto Socioambiental, Multiobjetivo.
EN – PO na Área de Energia**

ABSTRACT

The sustainable planning of the Brazilian electricity sector is a very complex task due to the need to guarantee the future supply of the energy market considering the conflicting objectives and diverse inherent uncertainties of a hydrothermal system. The objective of this work is to propose a multiobjective methodology to incorporate socio-environmental criteria in the formulation of the long-term planning problem of the expansion of electric power generation. The criteria selected for analysis were: land use, livelihoods, traditional and riverine populations, risk aversion, noise pollution, water quality, air quality, radioactive solid waste, radiation contamination and global warming. The results of the case study point to a change in the mix of sources of electric power generation, with an increase in the share of sources with lower social and environmental impacts such as natural gas, biomass, wind and biogas.

**KEYWORDS. Long-Term Expansion Planning, Socio-environmental Impact, Multi-objective
EN – OR in Energy**



1. Introdução

A energia elétrica é essencial para o crescimento econômico bem como para atender as necessidades da população. Dessa forma, suprir o crescimento da demanda de energia elétrica é um problema recorrente em vários países, principalmente naqueles em desenvolvimento, como o Brasil. Nesse cenário, a realização de um planejamento da expansão de longo prazo é importante para um sistema hidrotérmico, visto que o tempo de construção das usinas geradoras pode ser longo, como é o caso das usinas hidrelétricas.

Apesar de alguns documentos do PNE2050 já terem sido publicados, tal plano ainda não foi concluído. Sendo assim, o último plano de longo prazo efetivamente publicado pelo governo brasileiro foi o Plano Nacional de Energia 2030 - PNE2030 [Brasil 2007]. Em tal plano, o modelo matemático de otimização adotado se caracteriza como um modelo monoobjetivo, isto é, avalia apenas a dimensão econômica. No PNE2030 os aspectos socioambientais são considerados de forma exógena e indireta como uma condicionante para a expansão da rede, que prevê o atraso de certos projetos em função da dificuldade de obtenção das licenças ambientais. Nesta abordagem ainda não há a incorporação de forma explícita dos critérios socioambientais na formulação do problema de planejamento da expansão, sendo o critério econômico o fator mais relevante para a determinação do mix de expansão.

Como a geração de energia elétrica utiliza recursos naturais como insumos e gera necessariamente impactos sobre o meio ambiente, a melhoria de condições de vida da geração atual sem o comprometimento dos recursos a serem disponibilizados para as gerações futuras exige a adoção de estratégias sustentáveis [Castro et al. 2011]. Dessa forma, devido a crescente preocupação com os impactos socioambientais relativos a exploração dos recursos naturais, pesquisadores estudam metodologias para incorporar a variável socioambiental na tomada de decisão em um mundo onde a decisão econômica prevalece.

A redução dos impactos socioambientais é uma necessidade imediata tendo em vista a grande preocupação em atingir o desenvolvimento sustentável, pautado em minimizar a poluição, a escassez de recursos naturais e reduzir os impactos sociais. A literatura reforça que o planejamento pautado na minimização de custos não é mais apropriado e deve ser reformulado, pois a tomada de decisão deve considerar múltiplos objetivos como critérios sociais, econômicos, tecnológicos e ambientais [San Cristóbal 2011].

As políticas baseadas no desenvolvimento sustentável para o setor elétrico devem promover um maior uso de fontes de energia limpas e renováveis [Heirich et al. 2007, Santoyo-Castelazo e Azapagic 2014], sob o ponto de vista da oferta, e sistemas mais eficientes, sob o ponto de vista da demanda. Nesse contexto, onde há uma crescente preocupação com o meio ambiente, vários pesquisadores buscam maneiras de incorporar a dimensão socioambiental nos estudos da expansão do setor elétrico. Alguns estudos hierarquizam as fontes de geração de energia sob critérios sustentáveis [Afgan e Carvalho 2002, San Cristóbal 2011, La Rovere et al. 2010], outros criam cenários de expansão para selecionar o mais sustentável [Santoyo-Castelazo e Azapagic 2014, Ribeiro et al. 2013, Heirich et al. 2007] e, por último, alguns pesquisadores utilizam metodologias de otimização [Vila 2009, Dester 2012 e Conde 2013, Linares e Romero 2000, Meza et al. 2007]. As abordagens mais utilizadas para incluir critérios socioambientais na tomada de decisão para o planejamento da expansão de geração são: a definição de custos para os impactos sociais e ambientais (monocritério), também conhecido como custo de externalidade e a análise multicritério (multicritério/multiatributo). Em qualquer abordagem o objetivo é atender aos compromissos com o desenvolvimento sustentável e contribuir para a redução das incertezas e riscos inerentes à questão ambiental associados aos empreendimentos do setor, que pode se traduzir em maiores custos e prazos de implantação de projeto mais longos [Pires et al. 1999].

O planejamento do setor elétrico já foi avaliado por diversos autores, com diferentes propostas e métodos para solucionar esse problema complexo de vários objetivos conflitantes. A maior parte inclui diversos métodos multicritério, em que cada critério tem sua própria unidade, ou em análises custo benefício, em que os demais critérios (sociais, ambientais, técnicos) são expressos em termos econômicos. Em qualquer uma das abordagens, os diferentes grupos de



tomadores de decisão deparam com questões quantitativas e qualitativas, estas podem ser mais difíceis de mensurar e, portanto, mais sujeitas a um julgamento subjetivo.

Dentre as pesquisas em nível nacional, Santos [Santos 2008] aplicou, em um sistema fictício, uma metodologia de valoração ambiental para avaliar o impacto da variável ambiental na decisão do planejamento do setor elétrico. Diferente da metodologia monoobjetivo utilizada por Santos [Santos 2008], outros autores avaliaram a mesma questão com uma metodologia multi-objetivo [Vila 2009, Dester 2012 e Conde 2013] em que as variáveis ambiental e econômica formam duas parcelas distintas. Foi observado que, de forma geral, quando se considera a dimensão socioambiental, o planejamento da expansão prioriza a utilização de fontes de geração de energia renovável e há um maior custo de expansão, pois, em geral, as fontes renováveis têm um custo superior às fontes convencionais, devido, principalmente, ao alto custo de instalação de uma tecnologia ainda não consolidada. No entanto, o desenvolvimento sustentável só é atingido quando se encontra um equilíbrio entre as três dimensões: ambiental, econômica e social. Dessa forma, o quesito econômico continua tendo um papel importante na decisão de quais usinas devem ser selecionadas para a expansão do sistema e, portanto, deve estar dentre as variáveis de decisão.

Apesar dos esforços que vem sendo empreendidos em estudos nacionais acerca do assunto, a incorporação da dimensão socioambiental de modo formal e sistemático no modelo de otimização do planejamento da expansão da geração de longo prazo ainda não foi concretizada.

Neste sentido, o objetivo principal desse trabalho é incorporar os critérios socioambientais na formulação do problema de planejamento da expansão da geração de energia elétrica de longo prazo do setor elétrico brasileiro e analisar os efeitos dessa inclusão.

2. Índices dos Impactos Sócio-Ambientais Considerados neste Trabalho

Um estudo realizado pelo CEPEL [CEPEL 2011], composto de três relatórios técnicos, descreve uma metodologia para definição de um índice de impacto socioambiental de referência para a expansão da capacidade de geração do Sistema Interligado Nacional (SIN) em função do mix de fontes definidos pelo PNE2030. Este estudo é uma ferramenta importante para verificar o impacto gerado fora da bacia hidrográfica decorrente do aproveitamento parcial do potencial máximo da bacia hidrográfica analisada. O objetivo, portanto, é explicitar aos tomadores de decisão e à sociedade como um todo que, ao abrir mão de um potencial hidrelétrico eficiente sob o ponto de vista econômico-energético, está se optando por produzir a mesma energia por meio de outra fonte de geração, ou em outra bacia hidrográfica, o que também produz impactos socioambientais específicos. Para o presente trabalho, serão utilizados os índices de impactos por fonte e não a união deles em um índice global de impacto da expansão, conforme foi o objetivo do estudo do CEPEL [CEPEL 2011].

Na primeira etapa da metodologia empregada em tal estudo, os pesquisadores envolvidos realizaram um levantamento dos impactos mais significativos das fontes de geração de energia elétrica, levando em consideração todas as fases do ciclo de vida. Esse levantamento foi baseado em referências bibliográficas de reconhecimento notório: Plano Nacional de Energia [Brasil 2007], do Projeto ExternE [EC 1995] e do Projeto GABE do Instituto Paul Scherrer (PSI). Os impactos para a fonte hidrelétrica, em particular, foram definidos conforme metodologia do inventário, com a adição da etapa de planejamento. O resultado dessa seleção inicial resulta em uma lista bastante extensa, com 148 impactos socioambientais, o que torna necessário a aplicação de filtros nesta listagem inicial. Foram aplicadas quatro filtragens, com diferentes critérios de exclusão, conforme descritos a seguir pela Figura 1.

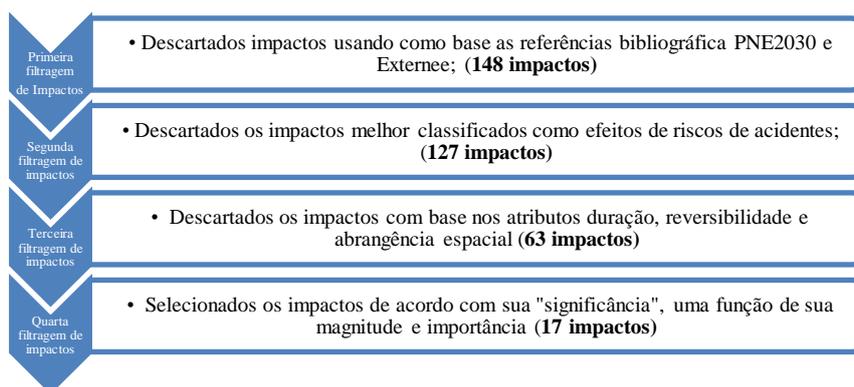


Figura 1. Passos para seleção dos impactos socioambientais. Fonte: [CEPEL 2011].

O resultado das filtrações levou a identificação de 17 impactos-fonte, em que alguns impactos foram selecionados em mais de uma fonte. Desta maneira, os 17 impactos-fonte foram agrupados em 10 tipos de impactos, conforme Tabela 1.

Após a definição dos impactos a serem avaliados, foi estabelecido um conjunto de indicadores para representação dos impactos socioambientais mais significativos associados ao mix de fontes de geração para a expansão, apresentados na Tabela 1. A escolha dos indicadores priorizou aqueles que atendiam a quatro ou cinco dos seguintes atributos citados por Mueller et al. [apud Romero et al. 2005]: simplificação, quantificação, comunicação, validade e pertinência. Com o intuito de se obter graus de impacto entre zero e um foram definidos, também, os valores máximos admissíveis para cada um dos indicadores, de modo que na atribuição da nota do impacto, o grau de impacto igual a zero corresponde à ausência de impacto e o grau de impacto igual a 1 corresponde ao impacto máximo admissível.

Tabela 1. Principais Impactos-fonte explorados em CEPEL [CEPEL 2011].

Impacto	Indicador	Fonte Associada
Interferência na qualidade do ar	Emissão média de SO _x , NO _x e material particulado (PM-10)	TC, TG, BIO
Interferência na qualidade da água	Ph	TC
Contaminação das áreas circunvizinhas com radiação	Critério qualitativo	TN
Geração de Resíduos Sólidos Radioativos	Critério qualitativo	TN
Poluição sonora	Nível de ruído	EOL
Contribuição para o aquecimento global	Fator de Emissão Médio (tCO ₂ /TJ)	TC, TG
Interferência sobre o uso e ocupação do solo	Área média utilizada por GW	UHE, TG, TN, TC, EOL
Interferência sobre os Modos de Vida	Nota do componente-síntese Modos de Vida em Inventários recentes.	UHE
Interferência nas condições etno-ecológicas (populações tradicionais e povos indígenas)	Nota do componente-síntese Povos Indígenas e Populações Tradicionais em Inventários recentes.	UHE
Aversão ao Risco	Critério qualitativo	TN

TC- Térmica à Carvão. TG – Térmica a Gás Natural, BIO – Térmica à Biomassa, TN – Termonuclear, EOL – Eólica, UHE – Usina Hidrelétrica.

Para agregar os “impactos-tipo” de cada fonte foi considerada a importância relativa entre eles, uma vez que não se espera que impactos distintos com importâncias diferentes tenham o mesmo peso (valor) no índice final da fonte. Para tal, foram definidos pesos relativos através do



método AHP [Saaty 1980], cuja soma é igual a 1,0. A Tabela 2 mostra os valores finais do índice de impacto socioambiental para cada fonte e o resultado aponta que a fonte nuclear é a que tem o maior impacto socioambiental, seguida da fonte de carvão mineral e da fonte hidráulica.

Tabela 2. Impacto por fonte final.

Fonte	IF
Hidráulica	0,1684
Nuclear	0,3569
Carvão Mineral	0,2871
Gás Natural	0,1212
Biomassa da Cana	0,0632
Centrais Eólicas	0,0272

Fonte: [CEPEL 2011]

O estudo em questão não definiu um indicador de impacto socioambiental para as linhas de transmissão, nem para geração à biogás, óleo combustível e óleo diesel, cujo valor é relevante para este trabalho. Para preencher essas lacunas, optou-se por escolher índices de fontes já analisadas no estudo em questão que teriam a mesma ordem de grandeza em termos de impactos socioambientais. Para o óleo combustível e para o diesel foi considerado o índice de 0,287 – o mesmo valor da fonte térmica a carvão - e para o biogás atribuiu-se o índice de 0,063 – o mesmo valor da biomassa. No caso do índice para a transmissão de energia elétrica foi necessário avaliar quais dos impactos contemplados no estudo estariam relacionados à atividade. Para o estudo em análise, considerou-se o impacto da área transformada, com a atribuição de valor 1 – o maior valor, visto que as linhas de transmissão impactam longas faixas de terra. Com a atribuição do peso 0,072 referente a esse tipo de impacto, obteve-se o índice 0,072 para o impacto socioambiental das interligações.

A principal vantagem dessa metodologia é a consideração de uma grande quantidade de critérios socioambientais que refletem o conceito de sustentabilidade, superando a abordagem tradicional de considerar apenas o critério do custo. Outra vantagem é o fato de os critérios avaliados serem capazes de expressar o impacto das fontes durante todo o ciclo de vida das mesmas. Dessa forma a comparação dos impactos entre as fontes se torna mais coerente e eficaz.

3. Incorporação dos Impactos Sócio Ambientais na Formulação do Modelo de Planejamento de Longo Prazo da Expansão da Geração

Conforme mencionado nos itens anteriores, o planejamento de longo prazo é fundamental para que o atendimento da demanda seja realizado de forma eficiente, e, devido ao tamanho do parque gerador nacional e a complexidade envolvida na operação do Sistema Interligado Nacional (SIN), são utilizados modelos matemáticos que auxiliam na definição de quais projetos serão implantados [Santos 2008]. Para o último PNE, publicado em 2007 pelo MME, o modelo matemático utilizado de apoio ao planejamento da expansão foi Modelo de Planejamento da Expansão da Geração de Longo Prazo (MELP), desenvolvido pelo CEPEL [Lisboa et al. 2008].

Em linhas gerais, este modelo de otimização permite determinar a solução de expansão da oferta de energia elétrica para atender a demanda futura com a minimização de custos de investimento e do valor esperado dos custos de operação dos sistemas de geração de energia elétrica e dos troncos de interligação, levando em consideração aspectos de variabilidade e incertezas hidrológicas na análise da operação hidrotérmica.

No MELP, o problema do planejamento da expansão da geração tem o horizonte de planejamento dividido em estágios temporais, e caracteriza-se pela existência de dois subproblemas lineares acoplados: investimento e operação, que são modelados por variáveis inteiras (0-não se constrói; 1-constrói-se) e contínuas, respectivamente. Do ponto de vista



matemático, isto resulta em um problema de programação linear inteira mista e que para um sistema elétrico com as dimensões do sistema brasileiro, trata-se de um problema de grande porte que requer elevado esforço computacional para sua solução.

O subproblema de investimento é definido principalmente pelos custos de investimentos de usinas (hidrelétricas, termoeletricas convencionais, eólica, biomassa e etc.) e interligações enquanto subproblema de operação está relacionado com os custos operativos das usinas termoeletricas (custos de combustíveis), manutenção de usinas e custos de déficits.

Para o sistema elétrico brasileiro, com parque gerador predominantemente hidrelétrico, a confiabilidade de atendimento à demanda deve ser analisada considerando as incertezas hidrológicas. A representação destas incertezas é modelada no modelo MELP através da análise da operação para duas condições de hidrologia: crítica e média. Para a condição de hidrologia média, a geração de uma usina hidroelétrica está limitada ao valor médio de geração desta usina para as séries de vazões históricas, isto é. considera as energias firme e secundária. Para a hidrologia crítica, a produção de energia está limitada ao valor da energia firme. No caso das termoeletricas, a geração máxima é definida em função de fatores de participação das usinas nas condições de hidrologia média e crítica.

A representação da característica sazonal de geração de usinas geradoras, notadamente as usinas hidrelétricas situadas na Amazônia, é importante para o cálculo mais preciso da capacidade dos troncos de interligação. No MELP, esta representação se faz através de curvas de geração sazonais típicas. Estas curvas podem ser também aplicadas à geração dos parques eólicos e cogeração a bagaço de cana-de-açúcar.

Os principais dados necessários para execução do modelo MELP são: configuração do parque gerador; capacidade das interligações entre subsistemas; mercado de energia elétrica para cada subsistema e período do horizonte de planejamento; dados técnicos e econômicos de projetos de usinas geradoras e troncos de interligação; custos de combustíveis das usinas termoeletricas; custos fixos e variáveis de operação e manutenção das usinas geradoras; e taxa de desconto.

Na formulação do subproblema de investimento, as usinas e as interligações entre subsistemas são diferenciadas em dois grupos: (i) projetos candidatos, que são os projetos de usinas, ou usinas já existentes, mas com projeto de expansão complementar, e os projetos de interligações entre subsistemas; e (ii) empreendimentos existentes, que são as usinas e interligações já construídas e em operação.

As variáveis de investimento são modeladas por variáveis binárias. As variáveis de operação representam a geração das usinas e os fluxos de energia nas interligações entre os subsistemas, e são modeladas por variáveis contínuas.

A função objetivo do problema de planejamento da expansão da geração corresponde à minimização dos custos totais de investimentos e do valor esperado dos custos de operação, composto pelos custos de combustíveis nas usinas térmicas e custos de racionamentos de energia, ao longo do período de planejamento. Na função objetivo do MELP, o custo de operação considerado é o associado à condição de hidrologia média.

As restrições modeladas no MELP são essencialmente de três tipos: (i) operativas: em termos de potência das usinas são considerados os limites mínimos e máximos operativos. Em termos de disponibilidade de energia, para cada condição hidrológica (média e crítica), são considerados limites mínimos e máximos de produção, especificados para as termoeletricas em função do seu fator de participação, e para as hidroelétricas em função de suas energias firme e secundária. Os fluxos nas interligações são limitados aos seus limites operativos máximos; (ii) atendimento à demanda de energia: para cada estágio de tempo, para ambos os regimes médio e crítico, a geração total do subsistema considerado, acrescentada do déficit e intercâmbios, deve satisfazer a demanda (dada por patamares e subsistemas); e (iii) déficit nulo para condição de hidrologia crítica: o plano de expansão ótimo deve atender os requisitos de demanda de energia em condições críticas.

A aplicação do MELP ao sistema brasileiro, de forma similar ao que será utilizado neste trabalho, resulta em um problema de programação inteira mista de grande porte, com cerca de



8.000 variáveis de decisão inteiras (referentes aos investimentos), 90.000 variáveis de decisão contínuas (referentes à operação do sistema) e 170.000 restrições [Sabóia et al. 2012]. Dessa forma, a solução do problema exige elevado esforço computacional, o que impõe desafios à incorporação de múltiplos objetivos. Por esse motivo, para solucionar o problema do planejamento da expansão de geração de energia elétrica de longo prazo com consideração de critérios socioambientais, optou-se por seguir a metodologia proposta em [Sabóia et al. 2012] com a incorporação dos critérios socioambientais por meio de um método a posteriori das restrições. Nessa abordagem o objetivo de minimizar os impactos sócio-ambientais causados pelo setor elétrico é representado como restrição. Essa abordagem foi selecionada por apresentar uma maior simplicidade e menor demanda computacional para um sistema grande e complexo como o Sistema Interligado Nacional brasileiro. Dessa forma, contribui-se para explicitação da incorporação da dimensão socioambiental na formulação do problema de planejamento da expansão da geração de energia elétrica de longo prazo do setor elétrico brasileiro.

Segundo Sabóia [Sabóia et al. 2012], o método a posteriori das restrições consiste no tratamento da segunda função objetivo como uma restrição, que nesta aplicação será denominada de restrição socioambiental. O método a posteriori das restrições consiste de duas etapas. Na primeira define-se a curva eficiente para a relaxação linear do problema variando-se os valores da restrição ambiental em um dado intervalo. Na segunda etapa, o decisor, com base na curva de eficiência construída, seleciona a solução de compromisso mais próxima de suas preferências, para posterior solução do problema de programação inteira mista considerando o valor da restrição ambiental escolhido. O processo de decisão com base da curva de eficiência foge ao escopo deste trabalho, mas como sugerido em [Meza et al. 2007], pode-se recorrer a técnicas de agregação e hierarquização das soluções lineares para encontrar aquela que melhor atenda as duas funções objetivo. Neste trabalho serão avaliadas diversas soluções de compromisso para a solução inteiro mista.

Neste sentido, o objetivo socioambiental é representado por uma restrição que representa o aumento da preocupação com impactos causados por todo ciclo de vida das fontes de geração de energia. A Formulação dessa restrição é descrita a seguir:

$$IA_{total} = \sum_{k=1}^K \sum_{j \in J^{HP}} Cap_j \times xh_j^k \times IA_j + \sum_{j \in J^{TP}} Cap_j \times xt_j^k \times IA_j + \sum_{j \in J^{ZP}} Cap_{inter_j} \times xz_j^k \times IA_j$$

$$IA_{total} \leq IA_{lim}$$

Em que:

k	Índice do estágio no tempo, que será definido em alguma unidade, tais como meses ou anos
j	Índice do empreendimento
J^{HP}	Subconjunto projetos de usinas hidrelétricas
J^{TP}	Subconjunto de projetos de usinas termelétricas
J^{ZP}	Subconjunto de projetos de troncos de interligação
K	Horizonte de planejamento: número de anos
xh_j^k	Construção da usina hidrelétrica j no estágio k
xt_j^k	Construção da usina termelétrica j no estágio k
xz_j^k	Construção da interligação j no estágio k
Cap_j	Capacidade da usina j
Cap_{inter_j}	Capacidade da interligação j
IA_j	Índice de impacto socioambiental da usina j
IA_{total}	Impacto socioambiental do SIN para a simulação
IA_{lim}	Impacto socioambiental limite

Note que na restrição acima aparecem apenas variáveis associadas a decisão de investimento. Apesar de não aparecerem explicitamente variáveis associadas à decisão de operação, os impactos socioambientais da operação são considerados implicitamente, uma vez



que os índices de impacto socioambiental dos empreendimentos foram definidos a partir de uma análise do ciclo de vida.

De posse do valor de impacto socioambiental calculado para o SIN, calcula-se o índice de impacto socioambiental unitário para o mix da expansão da geração (IAEXP) conforme a equação a seguir. O IAEXP é o resultado da divisão do IA_{total} pela capacidade das usinas e interligações definidas para a expansão da oferta de energia elétrica no horizonte modelado.

$$IAEXP = \frac{IA_{total}}{\sum_{k=1}^K \sum_{j \in J^{HP}} Cap_j + \sum_{j \in J^{TP}} Cap_j + \sum_{j \in J^{ZP}} Cap_{inter_j}}$$

4. Estudo de Caso

Com o objetivo de testar a aplicabilidade da metodologia desenvolvida ao longo desse trabalho, foi realizado um estudo de caso. Os dados de entrada e premissas utilizados no modelo são baseados em um caso derivado do PNE2030 [BRASIL 2007], com o intuito de reproduzir a realidade do sistema elétrico brasileiro. O horizonte de planejamento é de 25 anos, de 2006 a 2030, dividido em estágios anuais. A taxa anual de desconto é igual a 8% e apenas 1 patamar de carga.

Até o ano de 2015, a expansão é considerada obrigatória de forma a simular o que ocorre no PNE2030, seguindo o cronograma de expansão do plano decenal PDE 2006-2015 [BRASIL 2006]. Como consequência, as usinas com entrada anterior a 2016 não possuem um índice ambiental associado. A partir de 2016, toda expansão, usinas e troncos de interligação, é considerada opcional. Essa decisão permite que o modelo leve em conta o indicador ambiental de cada fonte geradora/tronco de transmissão para a tomada de decisão e, portanto, verificar a funcionalidade do modelo multiobjetivo.

Os dados para demanda de energia foram retirados do PNE2030 [BRASIL 2007]. A demanda para o estudo utilizado é referente ao cenário B1 do PNE2030.

O portfólio de projetos definido para esse estudo de caso engloba as mesmas fontes analisadas no PNE2030: hidrelétrica, gás natural, nuclear, carvão, eólica, biomassa, biogás e óleo combustível. As características dessas usinas, como fator de capacidade e vida útil, também foram obtidas do PNE2030. Apesar da fonte solar ser vantajosa em termos socioambientais, esta não será abordada neste estudo uma vez que esta fonte não é mencionada no PNE2030. Os custos de investimento e de operação dos projetos foram baseados no estudo do PNE2030 e atualizados conforme os valores no estudo de Sabóia [Sabóia et al. 2012].

Além disso, o portfólio de projetos foi modificado, com base na previsão do PDE2024 [BRASIL,2015], mas também de forma arbitrária, com adição de usinas candidatas, principalmente com relação às fontes renováveis. Como o estudo prevê o aumento da participação de fontes com menor impacto ambiental (eólica, biogás e biomassa) na matriz elétrica, o portfólio candidato definido no PNE2030 foi modificado de forma a evitar escassez de projetos com baixo impacto socioambiental para expansão. O aumento de capacidade do portfólio candidato para expansão em relação ao proposto pelo PNE2030 foi de 30900 MW para eólica, 1700MW para o biogás, 2750 MW para a biomassa, 4000 MW para a nuclear e 4000 MW para o carvão. O conjunto de projetos de investimentos para o horizonte 2016 a 2030 inclui 273 usinas hidrelétricas, 16 usinas termelétricas a carvão, 24 usinas termelétricas a óleo combustível, 60 usinas termelétricas a gás natural, 39 usinas termelétricas a biomassa, 8 usinas nucleares e 84 usinas eólicas.

Os valores do índice de cada fonte são aqueles determinados no estudo do CEPEL [CEPEL 2011], e descritos na seção 2.

5. Resultados numéricos

Com base no estudo de caso descrito na seção anterior, foram feitas diversas simulações com o modelo MELP utilizando sua relaxação linear, variando-se o limite de impactos



socioambientais de 17739,70 (associado a solução de mínimo viável econômico) a 8515,06 (associado a solução de mínimo viável socioambiental), em intervalos de percentuais de 10% sobre o limite superior de impacto socioambiental, representando seis cenários. Posteriormente, utilizando os mesmos valores, repetiu-se a simulação utilizando o algoritmo de solução baseado na decomposição de Dantzig-Wolfe [Sabóia 2013] para programação inteira. A partir dos resultados das simulações pôde-se construir a curva de eficiência ilustrada na Figura 2, onde os custos totais de investimento e operação crescem à medida que se restringem os impactos socioambientais. O aumento de custos ocorreu devido à necessidade de investir em tecnologias mais limpas, principalmente em projetos eólicos, que apresentam fatores de capacidade baixos, da ordem de 30%, implicando na necessidade de construção de várias usinas para contribuir efetivamente para um aumento da capacidade de geração.

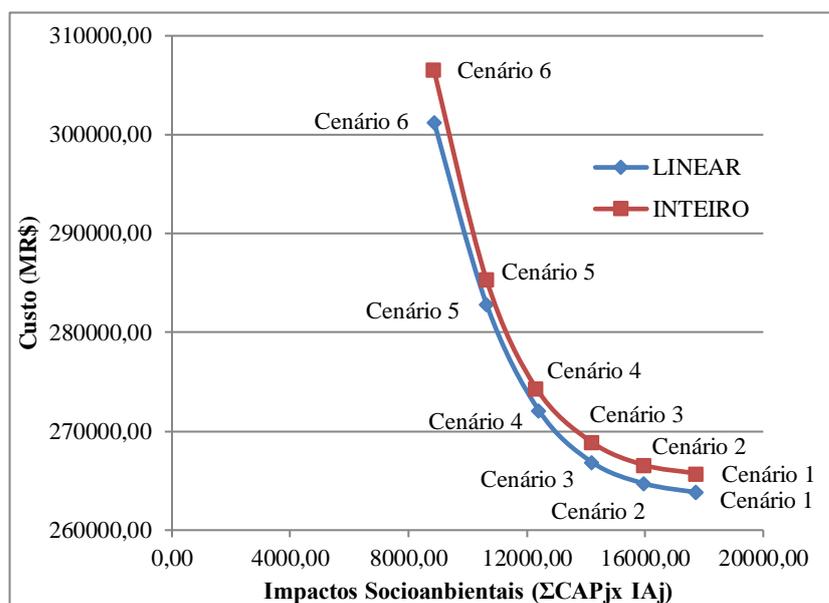


Figura 2. Curva de eficiência

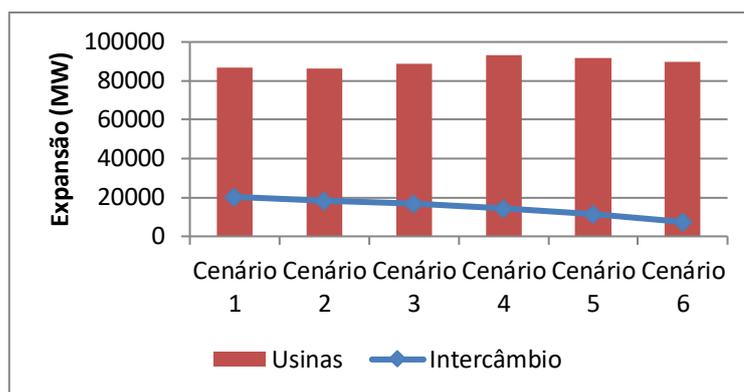


Figura 3. Expansão da capacidade de geração total para cada cenário avaliado de 2016-2030.

Para o problema sem restrição ambiental (cenário 1) a solução foi obtida com um custo total de MR\$ 263827,26 e um índice de impacto socioambiental (IAEXP) de 0,166. Comparativamente ao cenário 1, o cenário 6 (mínimo socioambiental viável) representa uma redução de cerca de 46% dos impactos socioambientais a um custo total 14% superior.

Em relação aos cenários avaliados, foi possível observar que a expansão dos intercâmbios no período de 2016-2030 se mostrou decrescente à medida que se reduz os impactos socioambientais, conforme Figura 3, com uma redução de 63% para a capacidade de intercâmbio do cenário 1 para o cenário 6. A redução da evolução da capacidade de transmissão pode ser



explicada como uma transição de um sistema no qual as usinas hidrelétricas de um subsistema atendiam a demanda de outros subsistemas, para um sistema em que as usinas implantadas atendem a demanda do subsistema em que estão inseridas. Com isso, reduz-se a necessidade das extensas linhas de transmissão.

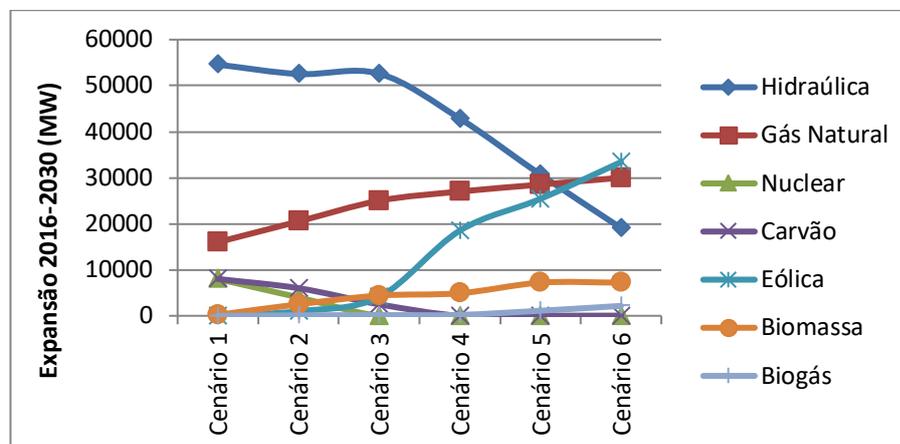


Figura 4. Expansão da capacidade de geração por fonte para cada cenário avaliado de 2016-2030.

Para uma visão mais detalhada do que ocorre com a expansão da capacidade instalada de 2016 a 2030, a mesma foi avaliada por fonte, para os diversos cenários considerados, conforme a Figura 4. Não foi observada a expansão das fontes óleo combustível e diesel para nenhum dos cenários. Pela Figura 4, percebe-se que a medida que se restringem os impactos socioambientais (do cenário 1 para o cenário 6), as usinas classificadas no estudo de CEPEL [Cepel 2011] como mais impactantes, ou seja, as termelétricas nucleares e à carvão e a fonte hidráulica, tem suas expansões reduzidas. Por outro lado, as usinas que têm o menor impacto socioambiental, como eólica, biogás e gás natural, aumentam sua participação na matriz elétrica. Do cenário 1 para o 6, as expansões em projetos eólicos aumentam em 33400 MW, os de gás natural em 14000 MW, os de biomassa em 7000MW e os de biogás em 2150 MW. Por outro lado, as expansões em termelétricas à carvão, nuclear e a fonte hidráulica, reduzem cerca de 8000 MW, 8000 MW e 35500 MW, respectivamente.

Devido a avaliação criteriosa na definição do índice de impacto socioambiental proposto pelo CEPEL [Cepel 2011], os impactos sociais para as usinas hidrelétricas se tornam relevantes e a fonte hidráulica, apesar de renovável, é penalizada. Esse fato leva a uma redução significativa da expansão da fonte hidráulica do cenário 1 para o cenário 6: de 62,89% para 20,77%. A redução da expansão desta fonte também é explicada pela consideração do impacto socioambiental das interligações, uma vez que muitas hidrelétricas são instaladas em locais afastados dos centros consumidores. Dessa forma, os impactos socioambientais das interligações estão associados as usinas hidráulicas e prejudicam a sua expansão em cenários com maior restrição ambiental.

4. Conclusões

A metodologia proposta neste trabalho se caracteriza como a incorporação de uma modelagem multiobjetivo no modelo MELP, utilizando o tradicional método a posteriori das restrições, com o intuito de torná-lo mais adequado para estudos de planejamento da expansão com consideração de critérios socioambientais. O objetivo incluído na formulação do MELP consiste em minimizar os impactos socioambientais de todas as fontes disponíveis no portfólio candidato para expansão (previamente definidos e representados por meio de índices), ao longo do horizonte de planejamento de longo prazo. Esse objetivo foi tratado como uma restrição, devido ao problema de grande porte que o SIN representa. Assim, os critérios socioambientais



foram considerados de forma sistemática na formulação do problema de planejamento de longo prazo da expansão de geração de energia elétrica.

Através do estudo de caso constatou-se a sensibilidade e a mudança de decisão no planejamento da expansão quando os critérios socioambientais são considerados. Ainda, confirmou a aplicabilidade do modelo e o seu potencial para auxiliar a tomada de decisão pautada no desenvolvimento sustentável, com a consideração de critérios socioambientais. A curva de eficiência definida com base na metodologia proposta oferece ao decisor a possibilidade de analisar diretamente o impacto da restrição ambiental nos custos totais de expansão e operação do sistema elétrico.

Ao evidenciar a importância dessa abordagem, este trabalho pretende motivar a consideração das questões socioambientais na formulação do problema de planejamento de longo prazo da expansão da geração elétrica, deixando de ser apenas um fator de atraso na implantação das usinas.

Ressalta-se que os índices de impacto por fonte apresentados na seção 2 deste artigo foram definidos para utilização em estudos de inventário hidrelétricos de bacias hidrográficas, e como o foco deste trabalho está no planejamento da expansão de longo prazo da geração, estes índices podem não ser adequados. Neste sentido considera-se importante a revisão de tais índices com o objetivo de serem utilizados em estudos de planejamento da expansão. Em adição a isso, considera-se importante a definição de um índice para a fonte solar, que vem aumentando sua participação na matriz elétrica brasileira.

Referências

Afgan, N.H. e Carvalho, M.G. (2002). Multi-criteria assessment of new and renewable energy power plants. *Energy*, 27:739-755.

Brasil-Ministério de Minas e Energia. (2006). Plano Decenal de Expansão de energia 2006-2015, Brasília, 2006.

Brasil -Ministério de Minas e Energia. (2007). Plano Nacional de Energia 2030 – Documento Final, Brasília.

Brasil -Ministério de Minas e Energia. (2015). Plano Decenal de Expansão de energia 2024 – Documento Final, Brasília.

Castro, N.J., Dantas, G.A. e Timpon, R.R. (2011). A construção de Centrais Hidroelétricas e o Desenvolvimento Sustentável. *Economia e Energia*, ano XV, n. 8.

CEPEL – CENTRO DE PESQUISA DE ENERGIA ELÉTRICA (2011). Levantamento Bibliográfico como Subsídio para Construção de Metodologia para Definição de Índice de Impactos Socioambiental Negativo do Não-Aproveitamento de Potenciais Hidroelétricos em Estudos de Inventário de Bacias Hidrográfica. Relatório Técnico no. 39240/2011. Departamento de Otimização Energética e Meio Ambiente – DEA.

Conde, M. R. (2013). Incorporação da Dimensão Ambiental no Planejamento de Longo Prazo da Expansão da Geração de Energia Elétrica por meio de Técnicas Multicritério de Apoio a Tomada de Decisão. Dissertação M.Sc, COPPE/PPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

Dester, M. (2012). Propostas para a construção da matriz de energia elétrica brasileira com foco na sustentabilidade do processo de expansão da oferta e segurança no suprimento da carga. Tese D.Sc, Unicamp, Campinas, SP.

EC – European Commission (1995). *ExternE, Externalities of Energy*, Vol. 2 – Methodology, 1 ed., Bruxelas e Luxemburgo, Publications of the European Commission, pp.571.



Haimes, Y. Y., Lasdon, L. S. e Wismer, D. A. (1971). On a bicriterion formulation of the problems of integrated system identification and system optimization. *IEEE Transactions on Systems*, 3:296–297.

Heinrich, G., Bassonc, L., Cohena, B., Howellsd, M. ePetriea, J. (2007). Ranking and selection of power expansion alternatives for multiple objectives under uncertainty. *Energy*, 32:2350-2369.

La Rovere, E. L., Soares, J. B., Oliveira, L. B., Lauria, T. (2010). Sustainable expansion of electricity sector: Sustainability indicators as an instrument to support decision making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14:422-429.

Linares, P. e Romero, C. (2000). A multiple criteria decision making approach for electricity planning in Spain: economic versus environmental objectives. *Journal of Operational Research Society*, 51:736-743.

Lisboa, M. L. V., Marzano, L. G. B., Sabóia, C. H. M. e Maceira, M. E. P. (2008). A mixed-integer Programming Model for Long Term Generation Expansion Planning of the Brazilian system. In *16th PSCC*, Glasgow, Escócia, 2008.

Meza, J. L. C., Yildirim, M. B. e Masud ,A. S. M. (2007). A model for the multiperiod multiobjective power generation expansion problem. *IEEE Transaction on Power Systems*, 22:871 – 878.

Pires, S. H. M., Nutti, M. R., Lacorte, A. C., Farah, P. M. K.,Serran, F.P. e Menezes, P.C. (1999) Avaliação Ambiental no Planejamento da Expansão de Sistemas de Energia Elétrica. In *XV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, p. 1-6, Foz do Iguaçu.

Ribeiro, F., Ferreira, P. e Araújo, M. (2013).Evaluating future scenarios for the power generation sector using a multi-criteria decision analysis (MCDA) tool: The Portuguese case.*Energy*, 52:126-136.

Romero, M., Andrade, L., Guia, G, Silveira, A.L. e Morais, V. (2005). Construindo um sistema de indicadores de sustentabilidade intra urbana. In *XI Encontro Nacional da Associação Nacional de Pós Graduação e Pesquisa em Planejamento Urbano e Regional – ANPUR*, Salvador.

Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*, N. York, USA: MacGraw-Hill.

Sabóia, C. H. M. (2013). Um algoritmo branch-and-price para instâncias de grande porte do modelo brasileiro de planejamento da expansão da geração de energia elétrica a longo prazo. Tese D.Sc, COPPE/PSC/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Sabóia, C. H. M., Lisboa, M. L. V., Marzano, L. G. B., Maceira, M. E. P. (2012). Modelo de Planejamento da Expansão da Geração de Longo Prazo do Sistema Elétrico Brasileiro Considerando Restrições Ambientais. In *XII Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica*, Rio de Janeiro.

San Cristóbal, J.R. (2011). Multi-criteria decision-making in the selection of a renewable energy project in Spain: The Vikor method. *Renewable Energy*, 36: 498–502.

Santos, H.L. (2008) Inserção dos Custos Ambientais em um Modelo de Expansão da Geração a Longo Prazo. Dissertação de M.Sc, COPPE/PPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Santoyo-castelazo, E. e Azapagic, A. (2014). Sustainability assessment of energy systems: integrating environmental, economic and social aspects. *Journal of Cleaner Production*, 80:119-138.

Vila, C. U. (2009). Planejamento Integrado da Expansão de Sistemas Elétricos e Gás Natural com Critérios de Desenvolvimento Energético Sustentável. Tese D.Sc, IFI, Itajubá, MG.