

Multiobjective Linear Programming to Determine the Most Suitable Electrical Energy Matrix for Countries: A Case Study at Brazil

J. Reis, R. Constant, L. Meza, and J. Soares

Abstract—Long-term planning to meet the growth of electricity demand in a country or region is a decision of strategic importance that should aim at maximizing the benefits provided and at minimizing negative impacts on the environment and society. In this sense, the objective of this study is to develop a methodology to determine the most suitable electric energy matrix of a country, that is, the best combination for the use of electricity generation sources. Thus, a multiobjective linear programming model is proposed to calculate the amount of energy that must be generated by each source available in the country, considering its internal demand and capacity constraints. In addition, this article aims to present the results of a case study in Brazil in the determination of its electric energy matrix, considering the use of several sources of electricity generation. The methodology developed was applied for the years 2015, 2020 and 2030 and generated some important reflections when compared with the actual values and current practices. The proposed model proved to be a useful tool to assist in the analysis and planning of the use, and possible extension, of the generation capacity of each electric power source of a given country.

Index Terms—Electrical Power Matrix, Generation Sources, Multiobjective Linear Programming.

I. INTRODUÇÃO

O PLANEJAMENTO e a regulação da oferta de energia devem buscar formas de suprimento compatíveis com as potencialidades energéticas e as necessidades socioeconômicas nacionais e regionais. É preciso que cada fonte ou recurso energético seja estrategicamente aproveitado, visando à maximização dos benefícios proporcionados e à minimização dos impactos negativos ao meio ambiente e à sociedade [1].

As economias que melhor se posicionam quanto ao acesso a recursos energéticos de baixo custo e de baixo impacto ambiental obtêm importantes vantagens comparativas [2].

Este trabalho foi apoiado pelas instituições científicas brasileiras, CAPES e CNPq.

J. C. Reis, estudante de doutorado na Universidade Federal Fluminense (UFF), Niterói, Rio de Janeiro, Brasil (e-mail: juliana.dcreis@gmail.com).

R. S. Constant, estudante de doutorado na Universidade Federal Fluminense (UFF), Niterói, e professora no Departamento de Engenharia de Produção no Centro Universitário Serra dos Órgãos, Teresópolis, Rio de Janeiro, Brasil (e-mail: renata.constant@hotmail.com).

L. A. Meza, Departamento de Engenharia de Produção (TEP) da Universidade Federal Fluminense (UFF), Niterói, Rio de Janeiro, Brasil, (e-mail: lidia.angulo.meza@gmail.com).

J. C. C. B. de Mello, Departamento de Engenharia de Produção (TEP) da Universidade Federal Fluminense (UFF), Niterói, Rio de Janeiro, Brasil, (e-mail: jcsmello@gmail.com).

Além disso, os projetos ligados à infraestrutura, como aqueles destinados ao suprimento de energia elétrica, caracterizam-se por serem de longo prazo, considerando o tempo demandado desde a sua concepção até a finalização. Requerem, portanto, ações bem planejadas para que se possa obter êxito na sua implementação.

A falta de um planejamento eficiente da utilização das fontes de geração de energia elétrica pode fazer o país gastar mais recursos (naturais e financeiros) do que o necessário. Adicionalmente, o país deixa de estar preparado para possíveis períodos de escassez de energia, necessitando de planos de contingência e medidas emergenciais de racionamento, o que causa prejuízos e mal-estar para a população.

Em se tratando especificamente do Brasil nota-se que sua matriz de energia elétrica é fortemente dependente da geração hidrelétrica. De acordo com o Ministério de Minas e Energia, em 2015 58,4% da energia elétrica do país foi gerada via hidrelétricas. Esta dependência é preocupante e merece atenção, visto que é uma fonte de geração sujeita a ocorrência de chuvas para suprir seus reservatórios. Este componente de incerteza torna ainda mais importante que o país invista na sua capacidade de planejamento e de execução das ações planejadas para o setor.

Além disso, historicamente o país já sofreu com crises no setor elétrico, as mais marcantes em 2001 e 2002, que ocasionaram os famosos “apagões” (queda de energia durante longos períodos). Devido à falta de planejamento e investimentos no setor, milhares de residências tiveram o fornecimento de eletricidade interrompido, e ainda foi necessário realizar racionamento forçado de energia elétrica.

Outro dilema muito comum do setor elétrico, também relacionado à utilização das fontes de energia, é o problema do despacho. De acordo com [3] o problema do despacho econômico é complexo e não linear, e tem como objetivo alocar a cada uma das unidades geradoras de energia a quantidade de energia a ser produzida de forma a minimizar os custos de operação, respeitando restrições de igualdade e desigualdade relativas à manutenção do balanço de energia.

Trata-se, então, de um assunto extremamente importante no contexto geopolítico global, onde é fundamental a contribuição das instituições e equipes responsáveis pelo planejamento energético nacional, antecipando as situações, mapeando as alternativas, sugerindo estratégias e norteando as decisões [2].

Nesse sentido, este estudo visa desenvolver uma metodologia para determinar a matriz de energia elétrica – doravante denominada matriz elétrica – mais adequada de um país ou

região, ou seja, a melhor combinação para utilização de suas fontes de geração de energia elétrica. Assim, é proposto um modelo de programação linear multiobjetivo para calcular a quantidade de eletricidade que deve ser gerada por cada fonte disponível no país, considerando sua demanda interna por energia e restrições de capacidade.

Motivado pelas adversidades citadas anteriormente, o objetivo do artigo é apresentar os resultados de um estudo de caso para a determinação da matriz elétrica do Brasil. O modelo proposto é aplicado para os anos de 2015, 2020 e 2030, considerando o uso de diversas fontes de geração de energia. A aplicação do modelo gerou algumas reflexões importantes quando comparadas a valores reais e a práticas atuais.

Assim, como contribuições do trabalho pode-se citar:

- Fornece uma ferramenta para auxiliar no planejamento de longo prazo para o uso, e possível extensão, da capacidade de geração das fontes de energia, visando atender ao crescimento da demanda por eletricidade e identificando quando e em qual fonte de geração é necessário realizar investimentos para sua ampliação;
- Possibilita a análise comparativa entre os resultados sugeridos pelo modelo e os valores reais praticados, sugerindo, por exemplo, que o custo de geração e a emissão de poluentes poderiam ser reduzidos se as fontes de geração fossem utilizadas de forma mais otimizada;
- Pode ser facilmente aplicado para o planejamento energético de qualquer país ou região.

O presente artigo está estruturado da seguinte maneira: na seção 2 são apresentados os conceitos de programação linear multiobjetivo e uma breve revisão da literatura. A seção 3 descreve a formulação matemática do modelo proposto, explicando cada função objetivo e cada restrição. O estudo de caso no Brasil é apresentado na seção 4, que aborda a coleta de dados, as simplificações adotadas e os critérios de seleção definidos. A seção 5 traz a análise dos resultados e, por fim, a seção 6 apresenta as considerações finais do estudo.

II. PROGRAMAÇÃO LINEAR MULTIOBJETIVO

Os problemas do mundo real envolvem muitas variáveis que se correlacionam de maneira complexa, e muitas vezes são reduzidos a modelos mono-objetivos. No entanto, são realmente de natureza multiobjetiva e devem ser modelados desta maneira, surgindo o conceito de Programação Linear Multiobjetivo. A Programação Linear Multiobjetivo (do inglês MOLP – *Multiobjective Linear Programming*) segundo [4] pode ser entendida como uma extensão natural da Programação Linear Objetiva, para situações onde haja mais de uma função objetivo.

MOLP considera situações onde as diversas funções objetivo podem estar em conflito, de tal forma que não será encontrada uma única solução ótima. Obtém-se na verdade um conjunto de soluções eficientes, ou também chamadas de não dominadas, que não são comparáveis entre si em relação ao valor da função objetivo. As soluções deverão ser avaliadas pelo decisor a fim de escolher a melhor solução de acordo com critérios previamente estabelecidos por ele.

Os problemas do tipo MOLP podem ser resolvidos utilizando

uma função de escalarização que transforma o modelo multiobjetivo em um modelo objetivo. De acordo com [4], as três abordagens mais utilizadas são:

- Otimização de uma das funções objetivo transformando as outras em restrições;
- Ponderação das funções objetivo;
- Minimização da distância a um ponto de referência.

Além disso, MOLP também pode ser utilizado em conjunto com diversas outras técnicas. Em [5] são analisados os investimentos a serem realizados no sistema elétrico mexicano através de um modelo que utiliza um modelo multiobjetivo em conjunto com a técnica de Monte Carlo.

Em [6] é feita a comparação entre as principais características das estruturas de preferências dos modelos multiobjetivo propostos por Thanassoulis e Dyson (1992), Zhu (1996), os modelos MORO e MODO-D, com um modelo tradicional DEA-CCR. O estudo prova que as abordagens multiobjetivo fornecem um maior número de projeções/alvos.

Um modelo de previsão de contratação de energia é proposto em [7]. Através de um modelo *fuzzy* não linear é calculado o quanto de energia deve ser contratado em um horizonte de 5 anos para o Brasil. A lógica *fuzzy* permitiu inserir incertezas, tornando o modelo mais real e robusto.

Em [8] é apresentado um modelo para a seleção de usinas de energia renovável considerando o custo de instalação, eficiência do sistema, sustentabilidade, produção de CO₂ e critérios sociais. O objetivo do estudo era definir os principais indicadores a serem utilizados para avaliação e seleção de sistemas energéticos, através de um modelo de programação linear multiobjetivo.

Em [9] é proposto um modelo de programação multiobjetivo promovendo integração econômica, energética e ambiental. O modelo pode ser aplicado a problemas de otimização de produção de energia, auto-geração de energia, emprego e emissão de gases. Este estudo revelou um grande antagonismo entre o crescimento econômico e o bem-estar social.

Outro modelo que auxilia no gerenciamento de sistemas de energia sustentáveis considerando incertezas é apresentado em [10]. O modelo avalia o planejamento de expansão de geração de energia e considera questões relativas a sustentabilidade de sistemas complexos, com incerteza e dinâmicos.

Alguns estudos exploram o impacto das novas tecnologias relativas as energias renováveis, como em [11] onde foram analisados os efeitos sobre emprego, em [12][13][14][15] são analisados os impactos/efeitos sociais e em [16][17][18] são analisados os impactos ambientais.

III. MODELO PROPOSTO

O modelo proposto é baseado no modelo geral desenvolvido por [19] e visa atender à demanda interna por energia elétrica de um país, com a melhor combinação de fontes de geração, levando em consideração quatro objetivos estratégicos. Adicionalmente, foram incorporadas quatro restrições para que o modelo se adeque corretamente as funções e características do setor elétrico.

Foi utilizado um modelo de programação linear multiobjetivo, apresentado abaixo, pois permite a consideração

de múltiplos objetivos, muitas vezes conflitantes, que podem ou não ter as mesmas dimensões ou unidades de medida.

$$\text{Min } \sum_{i=1}^n x_i + \sum_{i=1}^n y_i - (D_T + P) \quad (1)$$

$$\text{Min } \sum_{i=1}^n (I_i * y_i) \quad (2)$$

$$\text{Min } \sum_{i=1}^n (C_{ger_i} * x_i) + \sum_{i=1}^n (C_{ger_i} * y_i) \quad (3)$$

$$\text{Min } \sum_{i=1}^n (E_i * x_i) + \sum_{i=1}^n (E_i * y_i) \quad (4)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^n x_i + \sum_{i=1}^n y_i \geq D_T + P \quad (5)$$

$$x_i \leq C_{inst_i} \quad (6)$$

$$y_i \leq P_{ger_i} \quad (7)$$

$$x_i - y_i \geq 0 \quad (8)$$

$$x_i, y_i \geq 0 \quad (9)$$

Na Tabela I são apresentadas as variáveis do modelo, sua descrição e unidades de medida utilizadas.

TABELA I
VARIÁVEIS, DESCRIÇÃO E UNIDADES DE MEDIDA

Variável	Descrição	Unidade de Medida
i	Fonte de geração	-
x_i	Quantidade de energia elétrica oferecida via fonte de geração i já disponível	MWh
y_i	Quantidade de nova energia produzida via investimentos na fonte de geração i	MW
n	Número de potenciais fontes de geração de energia elétrica distintas	-
D_T	Demanda total do país por energia elétrica	MWh
P	Total de perdas de energia elétrica que podem ocorrer na geração, transmissão e distribuição de eletricidade	MW
I_i	Valor de investimento necessário para ampliação de 1 unidade de energia gerada via fonte i	US\$/MW
C_{ger_i}	Custo de geração de energia elétrica pela fonte i	US\$/MWh
E_i	Total de emissão de CO ₂ na produção de energia elétrica pela fonte i	kg/MWh
C_{inst_i}	Capacidade instalada de geração de energia elétrica pela fonte x_i	GWh
P_{ger_i}	Potencial de geração de energia elétrica do país a explorar via fonte y_i	MW

Em todos os momentos que foi necessário utilizar x_i e y_i em uma mesma equação, variáveis com unidades de medida diferentes, foi utilizado um cálculo para conversão. Considerando que uma fonte de geração de energia produz 1MW (caso essa potência seja gerada 100% constante), em uma hora será aproximadamente 1MWh. Durante todo ano, admitindo a geração 24 horas por dia, sua produção será (365 dias * 24 horas = 8.760 horas) aproximadamente 8.760 MWh em um ano. Este foi o fator utilizado no modelo para transformar MW em MWh.

A. Função Objetivo (1): Minimizar o Excedente de Energia Elétrica

Toda a energia elétrica produzida deve ser consumida em tempo real e simultaneamente. Isto é, em função de suas propriedades, a eletricidade não pode ser armazenada (pelo menos não em grande escala de forma economicamente viável).

Por esse motivo, o primeiro objetivo propõe minimizar o excedente de energia elétrica produzido, com o propósito de evitar desperdícios de energia e, portanto, de recursos naturais e financeiros.

A função objetivo (1) cuida para que a diferença entre o somatório da oferta de energia elétrica das diversas fontes de geração e a demanda total do país por eletricidade (D_T) mais um percentual de perdas (P), seja a menor possível. Vale destacar que, neste momento são consideradas tanto as perdas que ocorrem na geração, quanto as inerentes à transmissão e à distribuição da energia elétrica.

B. Função Objetivo (2): Minimizar Investimentos Necessários

Nos casos em que a demanda por energia elétrica exibe tamanho crescimento a ponto de que não seja mais possível suprir apenas com a capacidade das fontes já instaladas no país, faz-se necessário realizar alguns investimentos para expansão da oferta. Porém, é desejável que este desembolso de capital seja o menor possível, para que gere os benefícios esperados sem afetar de forma negativa a economia de país.

Para o objetivo deste modelo, somente os investimentos no âmbito da geração serão considerados. Estes destinam-se à implantação de novas usinas ou ampliação da capacidade das usinas existentes, e variam conforme a fonte utilizada e a estratégia adotada. Assim, a variável I_i em (2), representa a quantia investida para ampliação de 1 unidade de energia gerada via fonte i , expressa em US\$/MW.

C. Função Objetivo (3): Minimizar os Custos de Geração

Este objetivo diz respeito ao anseio de gerar a maior oferta de energia com o menor custo possível. Os custos de geração abrangem os custos de operação (tecnologia e mão-de-obra utilizada), manutenção e combustível. Vale destacar que estes custos representam os valores gastos para garantir o funcionamento da usina, e não os custos para construí-la; estes últimos estão considerados no custo de investimentos.

Os custos de geração variam conforme a fonte utilizada e a quantidade de energia produzida. Na função objetivo (3), a variável C_{ger_i} indica o custo de geração de energia elétrica pela fonte i , em US\$/MWh.

D. Função Objetivo (4): Minimizar a Emissão de CO₂

Diante da crescente preocupação mundial com as mudanças do clima global — em especial o aquecimento do planeta —, as emissões de gases de efeito estufa se tornam uma questão cada vez mais relevante [2]. Assim, o quarto objetivo expressa a necessidade de geração de energia elétrica com o mínimo de impacto ambiental, neste caso, com o mínimo de emissão de dióxido de carbono, um dos gases que contribuem para o efeito estufa. Assim, em (4), E_i corresponde ao total de emissão de CO₂ na produção de energia elétrica pela fonte i , em kg/MWh.

E. Restrição (5): Atendimento à Demanda

A restrição (5) impõe que a oferta de energia elétrica no país, considerando as fontes de geração já existentes e as novas instalações, deve ser maior ou igual a demanda por energia mais um percentual de perdas. Dessa forma, fica explícito que não é aceitável que o resultado do modelo leve a uma produção de

eletricidade insuficiente.

F. Restrição (6): Capacidade Instalada

A quantidade de energia elétrica oferecida/produzida por cada fonte de geração x_i disponível deve ser menor ou igual a capacidade instalada desta mesma fonte, ou seja, ao máximo que o país pode produzir atualmente, com a infraestrutura existente, sem nenhum investimento adicional. Este fato é representado em (6), onde C_{inst_i} é capacidade instalada de geração de energia elétrica da fonte x_i , em MWh.

G. Restrição (7): Potencial de Geração a Explorar

De forma similar à restrição anterior, a energia elétrica produzida pelas novas instalações, decorrente de investimentos realizados para ampliação da capacidade de geração da fonte y_i , deve ser menor ou igual ao potencial máximo de geração do país para a fonte considerada. Onde, na restrição (7), P_{ger_i} indica o potencial de geração de energia elétrica do país a explorar via fonte y_i , em MW, ou seja, o potencial ainda não explorado, excluindo a capacidade já instalada.

H. Restrição (8): Prioridade de Geração

Esta restrição tem o intuito de tornar mandatório que o modelo, antes de sugerir a aplicação de capital para construção ou ampliação de instalações de uma determinada fonte de energia, representada por y_i , deve utilizar todos os recursos já

existentes desta mesma fonte, representados por x_i .

Isto significa dizer que é preferível utilizar primeiramente toda a capacidade de geração já instalada no país e só depois pensar em realizar investimentos, de forma a evitar gastos desnecessários.

I. Restrição (9): Não Negatividade

Esta restrição indica que a quantidade de energia elétrica oferecida (x_i) e a quantidade da nova energia a ser produzida (y_i) tem que assumir valores iguais ou maiores que zero.

IV. DETERMINAÇÃO DA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA

A. Coleta de Dados

Para o cálculo da matriz elétrica mais adequada ao caso brasileiro foram consideradas as principais fontes de geração de energia elétrica existentes no Brasil, segundo relatório do Plano Nacional de Energia – 2030 [20]. A eletricidade gerada a partir de usinas hidrelétricas está dividida em produção nacional e importação. Na classe das usinas termelétricas de biomassa do Brasil, aparecem como fontes combustíveis: resíduos de madeira, bagaço de cana-de-açúcar, casca de arroz, licor negro (resíduo industrial do processo de produção de papel e celulose) e o biogás, com destaque para o bagaço de cana-de-açúcar.

Na Tabela II estão apresentados os dados das variáveis utilizadas no modelo e suas respectivas unidades de medida.

TABELA II
VALORES E UNIDADES DE MEDIDA DAS VARIÁVEIS UTILIZADAS NO MODELO

	Hidrelétrica			Termelétrica				Eólica	Solar	Unidade
	Nacional	Importação	Derivado petróleo	Gás natural	Carvão	Biomassa	Nuclear			
Custos de geração	5,06	45,31	186,48	58,40	57,35	3,90	16,53	4,00	10,00	US\$/MWh
Custo de nova instalação	1.500	-	1.000	55	1.450	1.495	1.500	1.650	2.600	Mil US\$/MW
Emissão de CO ₂	0	-	660	610	850	1,36	0	0	0	kg/MWh
Capacidade instalada	802.629,5	34.442,0	76.383,3	123.621,6	29.688,1	116.790,7	17.427,5	66.846,4	183,9	GWh
Potencial de geração a explorar	77.104	-	20.000	28.500	41.000	900.000	17.500	143.500	900.000	MW

Devido às características intrínsecas do setor energético, as decisões precisam ser tomadas com bastante antecipação, de modo que as condições adequadas estejam disponíveis para a sociedade no momento em que for preciso. Por isso, mostra-se interessante a aplicação do modelo proposto em períodos distintos, a fim de analisar a matriz elétrica mais adequada para o Brasil em cada um desses momentos, além de verificar como se daria a evolução da utilização da capacidade de cada fonte de energia.

Escolheu-se, então, os anos de 2015, 2020 e 2030 para este estudo de caso. A Tabela III apresenta os dados de projeção de demanda interna do Brasil por energia elétrica para esses anos. Vale ressaltar que o estudo para o ano de 2015, um período passado, foi realizado para fins de comparação. O objetivo é possibilitar uma análise comparativa entre os resultados sugeridos pelo modelo e os valores reais praticados no referido ano, como pode ser observado mais adiante na seção de

“Análise dos Resultados”.

TABELA III
VALORES PREVISTOS PARA A DEMANDA INTERNA DO BRASIL POR ENERGIA ELÉTRICA

Ano	Consumo Previsto	Demanda Interna (Consumo + Perda)	Unidade de Medida
2015	522.833.000	615.909.000	MWh
2020	745.700.000	877.294.117	MWh
2030	1.245.300.000	1.465.006.000	MWh

Todos os dados utilizados na aplicação do modelo proposto foram obtidos a partir de relatórios oficiais divulgados no site do Ministério de Minas e Energia, para os Custos de Geração e de Nova Instalação, valores de Emissão de CO₂ e Potencial de Geração foram utilizados [21] [22] [23] [24] [25] [26] [27]; para Capacidade Instalada, Perdas previstas e Consumo em 2015 [28] e para Consumo previsto em 2020 e 2030 [29].

B. Premissas e Simplificações Adotadas

A fim de tornar possível a aplicação do modelo proposto, algumas premissas e simplificações foram adotadas neste estudo de caso. São elas:

- Para todos os períodos estudados utilizou-se o valor da perda total de energia elétrica, aferida no ano de 2015, divulgado pelo Ministério de Minas e Energia [28], de 15%.

- O Plano Nacional de Energia 2030 [29] apresenta a previsão do consumo interno de energia elétrica do país por meio do estudo de possíveis cenários para a economia nacional e mundial, para o crescimento da população e seus hábitos de consumo. Para aplicação do modelo proposto, foi escolhido o cenário chamado de “Na crista da onda”, por ser o cenário mais extremo e otimista, logo o que resultaria em uma demanda maior e em um maior esforço do país para atendê-la.

- Na função objetivo (4) referente a minimização da emissão de CO₂, foram consideradas as quantidades de emissão do gás apenas durante o processo de geração de energia elétrica, tanto para as fontes já disponíveis, quanto para os casos onde houve a necessidade de construção de novas instalações. Isso significa dizer que o estudo não leva em conta todo o Ciclo do Carbono, ou seja, não considera a emissão de carbono decorrente da construção das novas instalações, desmatamento ou alagamento de áreas, transporte de equipamentos, etc.

- Ainda em relação a (4), por uma questão de simplificação e disponibilidade de dados, optou-se por utilizar apenas a emissão de CO₂ para representar a necessidade de minimização dos impactos ambientais. Porém, a geração de energia elétrica causa outros impactos ambientais igualmente importantes como o impacto na fauna e flora com alagamento de grandes áreas na geração hidrelétrica, a produção e armazenamento de rejeitos radioativos sólidos pela geração termelétrica nuclear, o alto nível de ruído causado pela geração eólica, e a emissão de outros gases como óxidos de enxofre (SO_x) e óxidos de nitrogênio (NO_x) na geração termelétrica com uso de derivados de petróleo.

- Como simplificação, foi considerado que os dados de custo de geração por fonte, valor de investimento e a quantidade de emissão de CO₂ na geração de energia elétrica mantêm-se os mesmos para todos os anos do estudo. Isso nem sempre é verdade dado que as tecnologias utilizadas estão em constante evolução e os preços também sofrem variações devido às condições do mercado e da economia nacional.

- A dependência externa do país exprime a necessidade de comprar eletricidade quando as fontes internas não são suficientes ou economicamente viáveis. É desejável que esta dependência seja a menor possível e que decresça ao longo do tempo. Por isso, através de (6), foi imposto que o modelo deve priorizar a utilização das fontes internas, ou ainda a construção de novas instalações, ao invés de aumentar a quantidade de eletricidade comprada.

- A capacidade de geração das hidrelétricas varia anualmente de acordo com uma maior ou menor ocorrência de chuvas na região. Esta relação não foi considerada no modelo visto que se precisaria de previsões meteorológicas de longo prazo.

- Algumas fontes renováveis apresentam um potencial de

geração a explorar bastante grande, como o caso da biomassa e da energia solar. Para refletir essa situação, foi utilizado um número muito grande como limite superior de (7) para essas fontes de geração, 900.000 MW.

C. Critérios para Seleção da Solução Mais Adequada

Antes de executar o modelo, os critérios para escolha da solução foram definidos e priorizados, como segue:

- 1º - Menor excedente de energia
- 2º - Menor valor de investimento
- 3º - Menor custo de geração
- 4º - Menor emissão de poluentes
- 5º - Menor dependência externa

Assim, seguindo o método lexicográfico, deve ser escolhida a solução que cumprir o primeiro critério. Se houver empate, será escolhida a solução que cumprir o segundo critério e, assim por diante, seguindo a ordem de prioridade dos critérios, até que a solução possa ser escolhida.

Cabe ressaltar que para a realização do estudo foram consultados especialistas do setor de energia elétrica, principalmente no que diz respeito a escolha dos critérios de seleção mais relevantes e validação da coerência e completude das variáveis do modelo, buscando utilizar da melhor maneira os dados disponíveis e obter uma avaliação mais próxima à realidade.

D. Aplicação do Modelo

Foi utilizado o software iMOLPe (*Interactive Multiple Objective Linear Programming Explorer*) para encontrar as soluções não dominadas do problema.

O índice subscrito i para as fontes de geração de energia elétrica seguem a nomenclatura apresentada na Tabela IV, tanto para as fontes já disponíveis no país (x_i), quanto para as novas fontes providas de investimentos realizados (y_i).

TABELA IV
ÍNDICES E NOMENCLATURA DAS FONTES DE GERAÇÃO

i	Fonte de geração relacionada
1	Usinas hidrelétricas de produção nacional
2	Importação
3	Usinas termelétricas de derivados de petróleo
4	Usinas termelétricas de gás natural
5	Usinas termelétricas de carvão
6	Usinas termelétricas de biomassa
7	Usinas termelétricas nucleares
8	Usinas eólicas
9	Usinas solares

V. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Na Tabela V, observa-se que foram encontradas três possíveis soluções para o ano de 2015, com diferentes utilizações de cada fonte de geração. A solução 1 produz energia excedente, o que não é conveniente. Além disso, a solução 1 submeteria o país a realizar investimentos em infraestrutura sem que haja necessidade, uma vez que seria possível atender à demanda por eletricidade no ano de 2015 apenas com a capacidade já instalada das fontes de geração existentes.

Por outro lado, as duas soluções restantes, 2 e 3, oferecem exatamente a energia necessária para suprir a previsão de consumo interno e as perdas. Essas soluções também produzem a energia necessária sem nenhum investimento, ficando empatadas nos 1º e 2º critérios. No entanto, a solução 3, com aproximadamente 432 TWh gerados via hidrelétricas, 117 TWh gerados via termelétricas de biomassa e 67 TWh gerados via usinas Eólicas, apresentou um custo de geração mais baixo (3º critério) e, por isso, é a solução preferida.

TABELA V
SOLUÇÕES ENCONTRADAS PARA O ANO DE 2015

Ano 2015	Solução 1	Solução 2	Solução 3	Unidade
x_1	0	549.062.621	432.271.934	MWh
x_2	0	0	0	MWh
x_3	0	0	0	MWh
x_4	0	0	0	MWh
x_5	0	0	0	MWh
x_6	116.790.687	0	116.790.687	MWh
x_7	0	0	0	MWh
x_8	0	66.846.379	66.846.379	MWh
x_9	0	0	0	MWh
y_1	0	0	0	MW
y_3	0	0	0	MW
y_4	0	0	0	MW
y_5	0	0	0	MW
y_6	56.993	0	0	MW
y_7	0	0	0	MW
y_8	0	0	0	MW
y_9	0	0	0	MW
Oferta de energia	615.909.033	615.909.000	615.909.000	MWh
Excesso	33	0	0	MWh
Custo de geração	2.402.045.230	3.045.642.379	2.910.165.181	US\$
Emissão de poluentes	834.556.740	0	158.251.381	Kg
Investimento	85.204.415.400	0	0	US\$

Analisando o estudo para o ano de 2015 é interessante observar que, para atender a demanda interna desse período, não seria necessário utilizar todas as fontes de geração de energia elétrica existentes (e utilizadas). Além disso, observa-se que o custo de geração e a emissão de poluentes poderiam ser reduzidos se as fontes de geração fossem utilizadas de forma mais otimizada.

No ano de 2020 encontrou-se um cenário semelhante com quatro possíveis soluções. A solução 1 produz um excedente de energia e realiza investimentos em infraestrutura sem que haja necessidade.

As soluções 2, 3, e 4 cumprem, ao mesmo tempo, os objetivos de minimizar o excedente de energia e o investimento necessário, levando esses valores a zero. Dentre essas, a solução 4 foi escolhida por apresentar o menor custo de geração, 4,232 bilhões de dólares. Segundo esta solução, aproximadamente 694 TWh seriam gerados via hidrelétricas e, ainda, seria utilizada toda a capacidade instalada de geração via termelétricas de biomassa e usinas eólicas, aproximadamente 117 TWh e 67 TWh, respectivamente.

Os resultados para o ano de 2030 apresentam uma situação diferente. O somatório da capacidade total instalada de todas as fontes de geração não é capaz de suprir a previsão de demanda por energia elétrica do país. Dessa forma, faz-se necessário a

realização de investimentos para ampliação da capacidade de uma ou mais fontes de geração.

Das quatro soluções encontradas, a solução 1 é a que produz o maior excesso de energia e, por isso, foi descartada. Todas as outras três soluções apresentam o mesmo valor de excedente de energia, 8 MWh.

Segundo os critérios pré-selecionados, a solução 2 deveria ser escolhida por apresentar o menor valor para investimento, aproximadamente 1,2 bilhões de dólares. No entanto, esta solução apresenta o maior valor de custo de geração, que ultrapassa os 41 bilhões de dólares.

Neste caso, a solução 4 é preferida pois, apesar de ter apenas o segundo menor valor de investimento, apresenta um custo de geração quase cinco vezes menor, aproximadamente 8,3 bilhões de dólares. Fazendo uma conta simples, pode-se constatar que essa economia anual de 33 bilhões de dólares com um custo de geração menor, conseguiria pagar a diferença decorrente de um maior investimento em apenas 2,2 anos.

De acordo com a solução 4, 54,8% da energia elétrica necessária para suprir a demanda do país no ano de 2030 seria gerada via hidrelétricas, 37,1% via termelétricas de biomassa, 4,6% via usinas eólicas e, em razões menores, via importações, termelétricas nucleares e usinas solares. Isso só seria possível devido a um investimento de aproximadamente 73 bilhões de dólares para ampliação da capacidade de geração das termelétricas de biomassa.

Observa-se, também, que mesmo para o ano de 2030 não seria interessante utilizar todas as fontes de geração existentes no país. Em alguns casos, torna-se mais vantajoso, considerando custo de geração e emissão de CO₂, optar por investimentos para ampliação da capacidade de fontes mais baratas ou mais limpas. A Tabela VI apresenta as soluções escolhidas para os anos de 2020 e 2030.

TABELA VI
SOLUÇÕES ÓTIMO DE PARETO PARA OS ANOS DE 2020 E 2030

	Ano 2020	Ano 2030	Unidade
x_1	693.657.051	802.629.458	MWh
x_2	0	34.442.000	MWh
x_3	0	0	MWh
x_4	0	0	MWh
x_5	0	0	MWh
x_6	116.790.687	116.790.687	MWh
x_7	0	17.427.525	MWh
x_8	66.846.379	66.846.379	MWh
x_9	0	183.909	MWh
y_1	0	0	MW
y_3	0	0	MW
y_4	0	0	MW
y_5	0	0	MW
y_6	0	48.722	MW
y_7	0	0	MW
y_8	0	0	MW
y_9	0	0	MW
Oferta de energia	877.294.117	1.465.006.008	MWh
Excesso	0	8	MWh
Custo de geração	4.232.773.873	8.298.732.937	US\$
Emissão de poluentes	158.251.381	736.410.981	Kg
Investimento	0	72.839.509.600	US\$

A Fig. 1 exibe a quantidade de eletricidade produzida por cada fonte, de acordo com cada solução selecionada para cada ano que o modelo foi executado. A partir desta figura é possível verificar a evolução da utilização das fontes de geração de energia elétrica no período estudado.

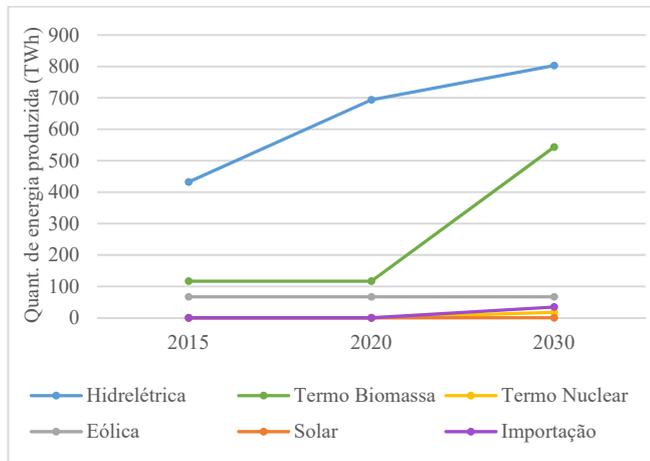


Fig. 1. Utilização das fontes de geração ao longo dos anos.

Um ponto importante deve ser observado: não houve nenhum caso onde a produção de energia elétrica por uma determinada fonte tenha diminuído de um ano para o outro, nem que uma fonte tenha deixado de produzir de um ano para o outro. Isso pode ser considerado um ponto positivo do modelo, uma vez que não haveria sentido prático se ocorresse. Além disso, a mobilização de infraestrutura, equipamentos e mão-de-obra para gerar eletricidade apenas por um curto espaço de tempo para, em seguida, interromper a geração, poderia causar grandes prejuízos financeiros para o país.

VI. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi desenvolvida uma metodologia para determinar a matriz elétrica mais adequada para um país ou região, através da melhor combinação de utilização de suas fontes de geração de energia. O modelo proposto mostrou-se uma ferramenta útil para auxiliar na análise e planejamento da utilização, e possível ampliação, da capacidade de geração de cada fonte de energia elétrica de um país, cumprindo o seu objetivo inicial.

O estudo de caso mostrou que o Brasil teria uma produção de energia elétrica essencialmente hidráulica, termelétrica de biomassa e eólica em 2015 e 2020. Já em 2030, com o crescimento da demanda por eletricidade, a matriz elétrica do país teria 54,8% da energia elétrica gerada via hidrelétricas, 37,1% via termelétricas de biomassa, 4,6% via usinas eólicas e, em razões menores, estariam as importações, termelétricas nucleares e usinas solares. Isso só seria possível devido a um investimento de 73 bilhões de dólares para ampliação da capacidade instalada de geração das termelétricas de biomassa.

A ampliação da capacidade instalada de geração via termelétricas de biomassa mostra-se aderente a nova preocupação mundial de se investir em fontes de energia mais limpas. Além de ser uma fonte de energia renovável abundante no Brasil, é de fácil obtenção, de geração mais barata e contribui

para minimizar os impactos ambientais decorrentes da produção de eletricidade.

Como observado, mesmo no ano de 2030, não seria interessante utilizar todas as fontes de geração existentes no país. Algumas dessas fontes ainda não são atrativas, devido a sua baixa produtividade ou alto custo de geração e, por isso, não foram escolhidas em nenhuma solução. Em alguns casos, mostrou-se mais vantajoso optar por investimentos para ampliação da capacidade de fontes mais baratas ou mais limpas.

Ao criar o gráfico das soluções, foi possível verificar a evolução da utilização das fontes de geração de energia elétrica no período estudado. Um ponto positivo observado foi que ao executar o modelo não houve nenhum caso onde a produção de energia elétrica por uma determinada fonte tenha diminuído de um ano para o outro, nem que uma fonte tenha deixado de produzir de um ano para o outro, evitando, assim, desperdícios de infraestrutura e de recursos financeiros.

Outro ponto positivo é que antes de sugerir a aplicação de capital para construção ou ampliação de instalações de uma determinada fonte de energia, o modelo utilizou os recursos e instalações já existentes desta mesma fonte, de forma a otimizar a geração de energia e evitar gastos desnecessários.

Uma desvantagem identificada é a dependência do julgamento do decisor. As informações do decisor sobre os critérios para a escolha das soluções são determinantes para o resultado. Caso decida modificar a ordem de prioridade dos critérios, é provável que outras soluções sejam selecionadas.

Devido às propriedades determinísticas do modelo proposto, não foi levado em consideração a natureza estocástica dos valores futuros, por exemplo, para a previsão de demanda de energia elétrica e para os custos envolvidos na geração e ampliação das diferentes fontes. Dessa forma, os resultados obtidos não devem ser encarados como uma verdade absoluta, mas como uma ferramenta de auxílio à decisão frente a exploração de possíveis cenários. Neste âmbito, estudos futuros podem ser realizados a fim de propor um modelo que permita incorporar as incertezas dos dados de entrada e a evolução desses valores no tempo.

Também como sugestões de estudos futuros, pode ser interessante elaborar um modelo que vise a diminuição da dependência externa do país, minimizando a quantidade de energia importada com uma nova função objetivo. Outra vertente que se pode seguir é a de priorizar as fontes de energia renováveis, acrescentado uma nova função objetivo para maximizar a quantidade de energia gerada por essas fontes. Ou ainda, considerar outros impactos ambientais causados pela produção de energia elétrica, e não apenas a emissão de CO₂.

AGRADECIMENTO

Os autores gostariam de agradecer às instituições brasileiras de ciências, CAPES e CNPq, pelo apoio financeiro dado à pesquisa apresentada neste artigo, realizada durante o programa de doutorado da UFF, em Niterói, do primeiro e do segundo autores.

REFERÊNCIAS

- [1] Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil), "Atlas de energia elétrica do Brasil", *Agência Nacional de Energia Elétrica – Brasília: ANEEL*, 1ª Edição, 2002. Disponível em http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/livro_atlas.pdf.
- [2] M. T. Tolmasquim, A. Guerreiro, R. Gorini, "Matriz energética brasileira: uma prospectiva", *Novos Estud. - CEBRAP*, no. 79, pp. 47–69, 2007.
- [3] L. S. Coelho, M. V. Cocco, "Combining of chaotic differential evolution and quadratic programming for economic dispatch optimization with valve-point effect"; *IEEE Electric Transactions on Power Systems*, n. 21(2), pp. 989–996, 2006.
- [4] C.H. Antunes, M.J. Alves, J.Climaco, "Multiobjective Linear and Integer Programming", *EURO – The Association of European Operational Research Societies*, Springer, 2016.
- [5] E. A. M. Ceseña, F. R. Dávalos; "Evaluation of Investments in Electricity Infrastructure Using Real Options and Multiobjective Formulation", *IEEE Latin America Transactions*, vol. 9, no. 5, 2011.
- [6] J. Q. Frota Neto, L. Angulo Meza; "Alternative targets for data envelopment analysis through multi-objective linear programming: Rio de Janeiro Odontological Public Health System Case Study"; *Journal of the Operational Research Society*, n. 58, pp. 865–873, 2007.
- [7] C. Unsihuay, G. Perondi; "Energy Purchasing Strategy On The Brazilian Regulated Electricity Market: A Fuzzy Model"; *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 2, 2016.
- [8] N.H. Afgan, M.G. Carvalho. "Multi-criteria assessment of new and renewable energy power plants", *Energy*; no. 27, pp. 739–55, 2002.
- [9] C. Oliveira, C.H. Antunes. "A multiple objective model to deal with economy–energy–environment interactions", *European Journal of Operational Research*; no. 153, pp. 370–85, 2004.
- [10] H. Zhu, W.W. Huang, G.H. Huang. "Planning of regional energy systems: an inexact mixed-intmixed-integer fractional programming model", *Appl Energy*; no. 113, pp.500–14, 2014.
- [11] C. Tourkolias, S. Mirasgedis. "Quantification and monetization of employment benefits associated with renewable energy technologies in Greece". *Renew Sustain Energy Rev* 2011; no. 15, pp. 2876–86, 2011.
- [12] N. Zografakis , E. Sifaki , M. Pagalou , G. Nikitaki , V. Psarakis , K.P. Tsarakakis. "Assessment of public acceptance and willingness to pay for renewable energy sources in Crete". *Renew Sustain Energy Rev* 2010; no. 14, pp.1088–95, 2010.
- [13] J.K. Kaldellis, M. Kapsali, E. Katsanou. "Renewable energy applications in Greece— what is the public attitude?"; *Energy Policy*; no. 42, pp. 37–48, 2012.
- [14] J.K. Kaldellis, M. Kapsali, E. Kaldelli, E. Katsanou. "Comparing recent views of public attitude on wind energy, photovoltaic and small hydro applications." *Renew Energy*; no. 52, pp. 197–208, 2013.
- [15] D. Zafirakis, K. Chalvatzis, J.K. Kaldellis. "Socially just support mechanisms for the promotion of renewable energy sources in Greece." *Renew Sustain Energy Rev* 2013; no. 21, pp. 478–93, 2013.
- [16] D. Agoris, K. Tigas, G. Giannakidis, F. Siakkis, S. Vassos, N. Vassilakos. "An analysis of the Greek energy system in view of the Kyoto commitments." *Energy Policy*; no. 32, pp. 2019–33, 2004.
- [17] T. Tsoutsos, E. Papadopoulou , A. Katsiri , A.M. Papadopoulos. "Supporting schemes for renewable energy sources and their impact on reducing the emissions of greenhouse gases in Greece." *Renew Sustain Energy Rev* 2008; no. 12, pp.1767–88, 2008.
- [18] A.K. Akella , R.P. Saini , M.P. Sharma. "Social, economical and environmental impacts of renewable energy systems." *Renew Energy* 2009; no.34, pp.390–396, 2009.
- [19] J.N. e.C.H. Antunes, M.J.G. Alves. "Programação Linear Multiobjetivo: do modelo de programação linear clássico à consideração explícita de várias funções objetivo." Imprensa da Universidade de Coimbra, 2003.
- [20] Ministério de Minas e Energia (Brasil). "Plano Nacional de Energia 2030", Ministério de Minas e Energia; colaboração Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME: EPE, 2007.
- [21] Ministério de Minas e Energia (Brasil), "Plano Nacional de Energia 2030: Geração Hidrelétrica", Ministério de Minas e Energia; colaboração Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME: EPE, 2007, v. 3.
- [22] Ministério de Minas e Energia (Brasil), "Plano Nacional de Energia 2030: Geração Termelétrica - Petróleo e Derivados", Ministério de Minas e Energia; colaboração Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME: EPE, 2007, v. 4.
- [23] Ministério de Minas e Energia (Brasil), "Plano Nacional de Energia 2030: Geração Termelétrica - Gás Natural", Ministério de Minas e Energia; colaboração Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME: EPE, 2007, v. 5.
- [24] Ministério de Minas e Energia (Brasil), "Plano Nacional de Energia 2030: Geração Termelétrica - Carvão Mineral", Ministério de Minas e Energia; colaboração Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME: EPE, 2007, v. 6.
- [25] Ministério de Minas e Energia (Brasil), "Plano Nacional de Energia 2030: Geração Termelétrica - Biomassa", Ministério de Minas e Energia;
- [26] Ministério de Minas e Energia (Brasil), "Plano Nacional de Energia 2030: Geração Termonuclear", Ministério de Minas e Energia; colaboração Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME: EPE, 2007, v. 7.
- [27] Ministério de Minas e Energia (Brasil), "Plano Nacional de Energia 2030: Outras fontes ", Ministério de Minas e Energia; colaboração Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME: EPE, 2007, v. 9.
- [28] Ministério de Minas e Energia (Brasil), "Resenha Energética Brasileira: Exercício de 2015", Ministério de Minas e Energia – Brasília: MME, 2016
- [29] Ministério de Minas e Energia (Brasil), "Plano Nacional de Energia 2030: Projeções", Ministério de Minas e Energia; colaboração Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME: EPE, 2007, v. 2.



Multiobjetivo.



Engenharia de Produção. Sua principal área de pesquisa é Análise Envolvória de Dados e Programação Linear Multiobjetivo.



Cientista da FAPERj. Atua principalmente nos seguintes temas: Análise Envolvória de Dados, Programação Linear Multiobjetivo, Redes Neurais, Implementações Computacionais e Avaliação Educacional.



Produção da mesma universidade. Tem artigos publicados nas áreas de Análise Envolvória de Dados e Auxílio Multicritério à Decisão e é bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq.

Juliana de Castro Reis nasceu na cidade de Niterói, Brasil. Fez graduação e mestrado em Engenharia de Produção pela Universidade Federal Fluminense (UFF), com conclusão em dezembro de 2011 e julho de 2017, respectivamente. Atualmente é aluna de doutorado em Engenharia de Produção (Pesquisa Operacional) pela mesma instituição. Sua principal área de pesquisa é Análise Envolvória de Dados e Programação Linear

Renata dos Santos Constant nasceu na cidade de Cabo Frio, Brasil. Fez graduação e mestrado em Engenharia de Produção pela Universidade Federal Fluminense (UFF). Especialista em Engenharia de Petróleo e Gás Natural pela mesma instituição em 2016. Atualmente é aluna de doutorado em Engenharia de Produção (Pesquisa Operacional) também pela UFF e Professora do Centro Universitário Serra dos Órgãos (UNIFESO) no Departamento de Engenharia de Produção. Sua principal área de pesquisa é Análise Envolvória de Dados e Programação Linear Multiobjetivo.

Lidia Ângulo Meza fez graduação em Pesquisa Operacional Investigación Operativa, pela Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Fez mestrado e doutorado em Engenharia de Produção na COPPE Universidade Federal do Rio de Janeiro. Atualmente é professor da Universidade Federal Fluminense, no Departamento de Engenharia de Produção, bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq e Jovem

João Carlos Soares de Mello nasceu em Lisboa, Portugal. Fez graduação em Engenharia Mecânica e mestrado em Matemática na Universidade Federal Fluminense, Brasil. Fez doutorado em Engenharia de Produção, área de Pesquisa Operacional, na Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil. Foi chefe do Departamento de Matemática Aplicada na Universidade Federal Fluminense e atualmente é chefe do Departamento de Engenharia de