

**Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics**

---

## Otimização na Contratação de Energia: Uma Análise de Sensibilidade Sobre a Demanda

Danielle de Freitas<sup>1</sup>

Setor de Tecnologia, PPGMNE, UFPR, Curitiba, PR

Neida Maria Patias Volpi<sup>2</sup>

Setor de Tecnologia, PPGMNE, UFPR, Curitiba, PR

Ana Paula Oening<sup>3</sup>

Institutos LACTEC, Curitiba, PR

Débora Cintia Marcilio<sup>4</sup>

Institutos LACTEC, Curitiba, PR

Daniel Henrique Marco Detzel<sup>5</sup>

Institutos LACTEC, Curitiba, PR

Lucio de Medeiros<sup>6</sup>

Institutos LACTEC, Curitiba, PR

**Resumo.** A legislação vigente no setor elétrico brasileiro, impõe que as distribuidoras contratem energia através de leilões, sendo obrigadas a atender a totalidade de suas demandas, e em caso de descumprimento são penalizadas financeiramente. Como as demandas são incertas, as distribuidoras encontram grandes dificuldades em realizar uma estratégia de contratação de energia eficiente. À vista disso, foi proposto um modelo de otimização linear determinístico para modelar o problema de contratação de energia, no curto e longo prazo. Dessa maneira, foi realizado uma análise de sensibilidade dos prejuízos advindos da não realização da demanda prevista por uma distribuidora fictícia, sendo que para 1000 cenários de demanda simulados, conclui-se que a quantificação do prejuízo médio que a distribuidora pode estar exposta é inversamente proporcional ao custo de compra em leilões.

**Palavras-chave.** Otimização, Contratação de Energia, Demanda, Leilões de Energia, Distribuidoras

### 1 Introdução e Justificativas

As Leis n. 10.847 e n. 10.848 de 15 de março de 2004, e o Decreto n. 5.163 de 30 de julho de 2004 definem a comercialização de energia elétrica no Brasil. A principal imposição

---

<sup>1</sup>danielle.freitas@lactec.org.br

<sup>2</sup>neida@ufpr.br

<sup>3</sup>ana.oening@lactec.org.br

<sup>4</sup>debora@lactec.org.br

<sup>5</sup>daniel@lactec.org.br

<sup>6</sup>lucio.medeiros@lactec.org.br

para as distribuidoras, trazida por esta legislação é a obrigação de atendimento de 100% de suas demandas, conforme o Art. 2º, II, do Dec. 5.163/2004 [1]. A mesma lei define um limite máximo de sobrecontratação (excedente) de energia estipulado em até 5% da sua demanda. Por outro lado, este limitante não existe em caso de subcontratação (déficit), que ocorre quando a distribuidora compra menos que sua demanda. Neste caso ela sempre será penalizada e terá que recorrer ao Mercado de Curto Prazo (MCP) para comprar a diferença faltante ao Preço de Liquidação das Diferenças (PLD). Por consequência, as distribuidoras se deparam com um grande problema relacionado à incerteza da sua demanda de energia, bem como a previsão do PLD. Para o tratamento da incerteza envolvida em relação a demanda de energia, na literatura encontram-se trabalhos que utilizam três cenários de demanda (otimista, pessimista e referência) conjuntamente com a otimização do problema, como em [5] e [7], já [11] e [13] fazem o uso de simulações de vários cenários de demanda, e [10] utiliza a lógica *fuzzy* para tratar as variáveis de incerteza.

A legislação também determina que para o atendimento da demanda das distribuidoras, elas devem comprar energia por meio de leilões, sendo os mais comuns os Leilões de Energia Nova (LENs) e Leilões de Energia Existente (LEEs). Os LENs se subdividem-se em Leilões A-3 e A-5, já os LEEs se subdividem em Leilões A e A-1. Além desses, para que as distribuidoras pudessem reparar os possíveis desvios de suas demandas previstas em relação ao comportamento atual do mercado foram criados os Leilões de Ajuste. Sendo que cada uma dessas categorias de leilões possuem limites de compra e repasse as tarifas dos consumidores finais. Somado a isso, cada uma possui duração de contratos e início de suprimento diferenciados, conforme descrito na Tabela 1.

Tabela 1: Tempo para início de suprimento e duração dos contratos dos principais leilões.

Leilão	Início de Suprimento	Duração do Contrato
Ajuste	Imediato até 4 meses após a compra	Até 2 anos
A-1	1 ano após a compra	De 1 a 15 anos
A-3	3 anos após a compra	De 15 a 30 anos
A-5	5 anos após a compra	De 15 a 30 anos

Muitos autores na literatura analisaram este problema de otimização olhando para um horizonte de curto prazo, considerando apenas os leilões de Ajuste e A-1, como [12] que resolveram o problema com lógica *fuzzy*, [7] que utilizaram a técnica de Algoritmos Genéticos, outros autores consideraram um horizonte de longo prazo, como [8] que utilizaram a técnica de Algoritmos Genéticos e Evolução Diferencial e [6] que utilizou técnicas de programação linear.

Além disso, os leilões atuais negociam mais do que um tipo de produto, com durações de contratos diferenciadas, aumentando a dificuldade na contratação de energia, tal problema não foi tratado ainda na literatura. Logo propõem-se no presente trabalho considerar o modelo proposto por [6] para um horizonte de estudo de seis anos, acoplando a ele leilões de multiprodutos, considerando também o horizonte de curto prazo, onde nos dois primeiros anos será considerado o atendimento a demanda mensal e nos demais anos a demanda

anual. A incerteza da demanda, será abordada com simulações de vários cenários, aonde pretende-se analisar os riscos financeiros que a distribuidora está exposta ao prever sua demanda erroneamente.

## 2 Apresentação do modelo

O modelo proposto por [6] com as modificações citadas anteriormente, pode ser representado como um problema de Programação Linear (PL), conforme descrito em [9]:

$$\begin{aligned} \min \quad & f(x) = c^t x \\ \text{s.a.} \quad & Ax = b; \quad b \geq 0; x \geq 0 \end{aligned}$$

Onde  $c$  é o vetor de custos,  $x$  é o vetor de decisões,  $A$  é matriz formada pelos coeficientes das restrições,  $b$  é o vetor de recursos, e  $f(x)$  é a função objetivo.

Algumas das regras que modelam o vetor custo e também as restrições do problema são fornecidas de forma sucinta pela Tabela 2.

Tabela 2: Regras de comercialização de energia para as distribuidoras

Categoria	Regras	
	Limite de Repasse	Limite de contratação
Ajuste	Repasse integral	Compra limitada a 5% do total de contratos da distribuidora.
A-1	A distribuidora deverá contratar no mínimo 96% do Montante de Reposição (MR), sofrendo limite de repasse nos contratos de energia nova da parcela correspondente ao descumprimento do critério de recontração mínima, sendo essa limitada ao Valor de Referência da Energia Existente (VRE).	Compra limitada ao MR acrescido de 0,5% da carga realizada no ano "A-1".
A-3	Repasse integral dos custos de aquisição de energia até o limite de 2% da carga verificada no ano "A-5", e para parcela excedente repasse limita ao menor valor entre VL3 (valor médio do leilão A-3) e VL5 (valor médio do leilão A-5).	–
A-5	Repasse integral	–
Subcontratação	O repasse dos custos de compra de energia, no MCP fica limitado ao Valor de Referência (VR).	–

À vista disso, foi desenvolvido um algoritmo em concordância com o modelo proposto utilizando o software MATLAB e sua ferramenta de otimização *linprog*, conforme a Figura 1 que descreve o fluxograma do algoritmo.

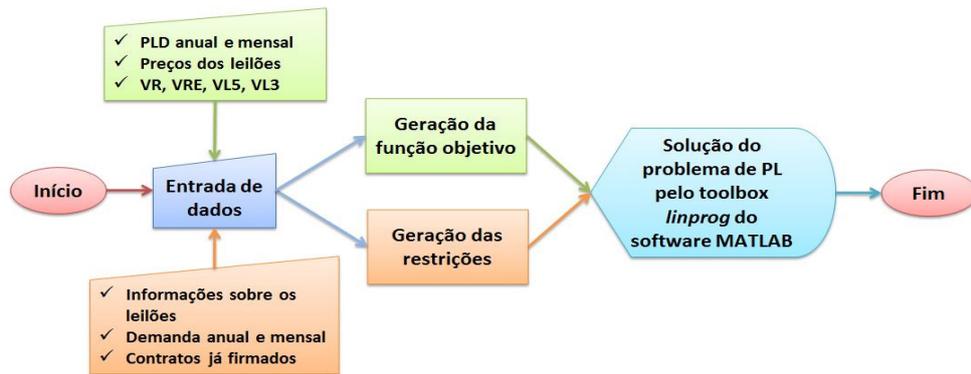


Figura 1: Fluxograma do algoritmo.

### 3 Análise de Sensibilidade Sobre a Demanda

Os dados utilizados na presente análise são provenientes de uma distribuidora fictícia, os preços praticados no mercado de energia e os contratos anteriores são os mesmos utilizados em [6], no qual foram considerados preços deflacionados pelo número índice do IPCA e não normalizados, para a data base de dezembro de 2009. Para o curto prazo o PLD médio mensal para os anos de 2010 e 2011 foram retirados de [2].

As informações do número de leilões ocorridos a cada ano de 2010 a 2015, a quantidade de produtos negociados em cada leilão, durações de contratos e início de suprimento foram retirados de [3]. Os preços de cada leilão foram retirados de [4], tais preços foram deflacionados pelo número índice do IPCA para a data base de dezembro de 2009.

#### 3.1 Cenários de Demanda

Para avaliar o risco financeiro que uma distribuidora está exposta ao prever sua demanda erroneamente, simulou-se cenários de demanda mensais para o curto prazo, e anuais para o longo prazo, com o objetivo de comparar a perda financeira ocorrida pela previsão de um cenário  $i$  e a ocorrência de um cenário  $j$ .

Para a realização da simulação das demandas anuais e mensais, gerou-se números aleatórios com distribuição uniforme entre demandas anuais e mensais otimistas e pessimistas, conforme dados das Tabela 3 e Figura 2.

Tabela 3: Demandas anuais otimistas e pessimistas (em MWh).

Demanda anual	2012	2013	2014	2015
Otimista	5194592	5748489	6179734	6593800
Pessimista	4990882	5413625	5704370	5965819

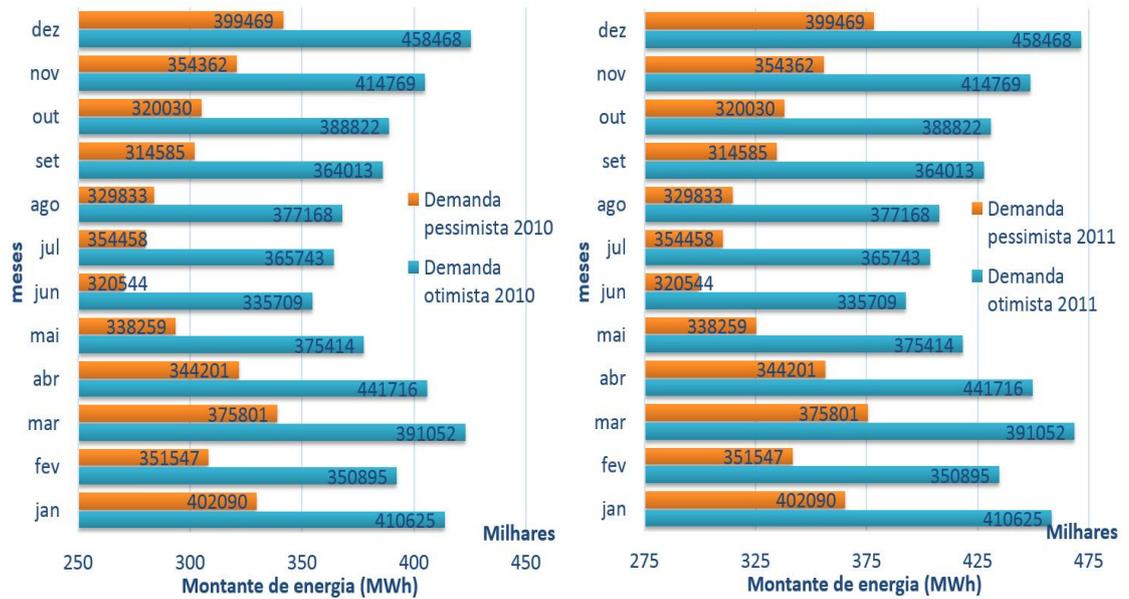


Figura 2: Demandas otimistas e pessimistas para 2010 e 2011.

Simulou-se no total 1000 cenários de demanda, obtendo a seguinte relação entre custo de compra para cada cenário e o prejuízo médio por exposição ao MCP pela não ocorrência do cenário previsto, disposta na Figura 3. Cada ponto contido na figura representa um cenário de demanda, em que suas coordenadas são respectivamente o custo de compra para esse cenário e o prejuízo médio no caso de não ocorrer o cenário previsto e ocorrer um dos outros cenários.

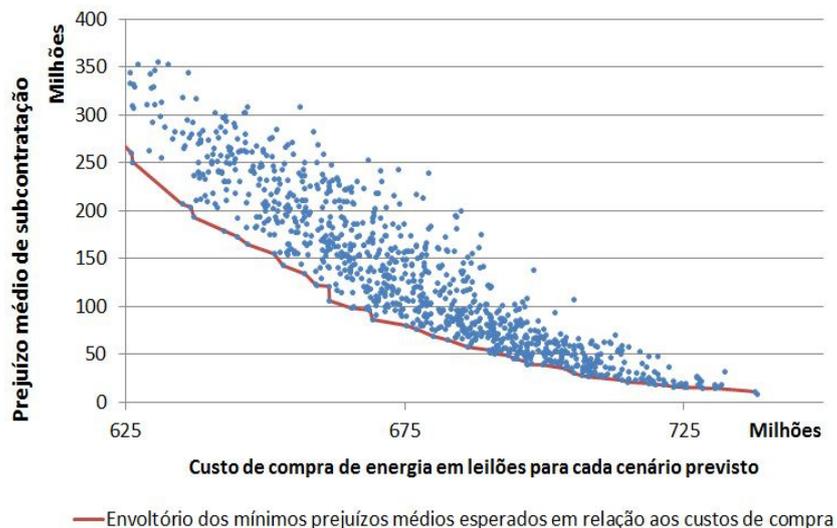


Figura 3: Prejuízo médio versus custo de compra.

Observando a Figura 3, nota-se a que quanto maior o custo de compra menor é o prejuízo médio que a distribuidora pode ter, e vice-versa. Logo, pode-se concluir que o custo de compra é inversamente proporcional ao prejuízo médio que a distribuidora está exposta no caso em que a demanda prevista não é a realizada.

Também a Figura 3 mostra um envoltório dos mínimos prejuízos médios esperados em relação ao custo de compra, que foi obtido escolhendo os cenários de demanda que possuem os menores prejuízos médios para cada custo de compra. Logo, a distribuidora segundo o seu grau de aversão ao risco pode se beneficiar deste envoltório analisando qual a melhor opção de demanda prevista para o atendimento dos seus objetivos.

## Conclusões

Este trabalho descreveu o problema de otimização na contratação de energia no curto e longo prazo, como um problema de programação linear. No qual foi desenvolvido um algoritmo em concordância com o modelo, para se realizar uma análise de sensibilidade sobre a demanda, sendo simulados 1000 cenários de demanda que foram utilizados um a um como dados de entrada do algoritmo. Após, isto foi realizada uma análise da perda financeira da distribuidora ao prever um dos cenários simulados e ocorrer os demais, tal análise concluiu que o prejuízo médio que a distribuidora está exposta ao prever sua demanda erroneamente é inversamente proporcional ao custo de compra do cenário para o cenário de demanda previsto. Também esta análise gerou um envoltório dos mínimos prejuízos médios esperados em relação aos custos de compra, que pode ser utilizado como ferramenta de análise, em que a distribuidora segundo o seu grau de aversão ao risco, analisa qual a melhor opção de demanda prevista para o atendimento dos seus objetivos.

## Agradecimentos

Este trabalho foi possível graças ao financiamento da COPEL Distribuição através do Projeto Pesquisa e Desenvolvimento – ANEEL PD-2866-0396/2014, “Previsão de Preços de Energia e Sazonalização da Carga para Leilões”.

## Referências

- [1] Brasil. Agência Nacional de Energia Elétrica. Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 4 ago. de 2004.
- [2] CCEE. O que fazemos: preços médios. 2017. Disponível em: (<https://www.ccee.org.br/>). Acesso em: 31 mar. 2017.
- [3] CCEE. O que fazemos: leilões. 2017. Disponível em: (<https://www.ccee.org.br/>). Acesso em: 31 mar. 2017.

- [4] CCEE. O que fazemos: informações ao mercado. 2017. Disponível em: (<https://www.ccee.org.br/>). Acesso em: 31 mar. 2017.
- [5] I. V. Dias, Estratégias de gestão de compra de energia elétrica para as distribuidoras no Brasil. Dissertação de Mestrado, Curitiba, 2007.
- [6] D. Freitas, N. M. P. Volpi, A. P. Oening, D. C. Marcilio, D. H. M. Detzel, and L. Medeiros. Otimização na contratação de energia sob a ótica das distribuidoras. In *Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO XLVIII)*, Vitória, Espírito Santo, Brasil, 2016.
- [7] J. G. L. Lazo, D. A. Lima, and K. Figueiredo. Análise de um modelo inteligente de contratação de energia elétrica no curto prazo para distribuidoras. *Revista Controle & Automação*, v.23, n.6, p. 711-725, dez. 2012.
- [8] P. B. Lopes, L. Martinez, and H. X. Araujo. Estratégia robusta de contratação de energia elétrica para distribuidoras. *Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática*, Belo Horizonte, Minas Gerais, p. 3483-3490, set. 2014.
- [9] K. G. Murty. *Linear Programming*.. John Wiley & Sons, New York, 1983.
- [10] G. Perondi. Metodologia de contratação de energia elétrica por agentes de distribuição no longo e curtos prazos. Dissertação de mestrado, Curitiba, 2012.
- [11] A. Pessanha, and M. A. Caldas. Estratégia de contratação de energia em leilões regulados: um modelo de otimização e simulação. In *Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO XXXIX)*, Fortaleza, Ceará, 2007.
- [12] F. F. C. Rodrigues, C. L. T. Borges, and D. M. Falcão. Programação da contratação de energia considerando geração distribuída e incertezas na previsão de demanda. *Revista Controle & Automação*, v. 18, n.3, p. 361-371, set. 2007.
- [13] L. B. Silva. Metodologia para otimização da contratação de uma distribuidora através de leilões de energia. Dissertação de Mestrado, Rio de Janeiro, 2008.