



**Simpósio de Métodos  
Numéricos em Engenharia**

**25 a 27 de outubro, 2017**

## *Otimização na Contratação de Energia Considerando a Sazonalização da Carga*

Danielle de Freitas e Neida Maria  
Patias Volpi

Programa de Pós-graduação em  
Métodos Numéricos em Engenharia  
Universidade Federal do Paraná  
(UFPR)

Curitiba, Brasil

[daniellefreitas@ufpr.br](mailto:daniellefreitas@ufpr.br);

[neida@ufpr.br](mailto:neida@ufpr.br)

Ana Paula Oening, Débora Cintia  
Marcilio, Daniel Henrique Marco

Detzel e Lúcio de Medeiros

Divisão de Sistemas Elétricos -

Institutos LACTEC

Curitiba, Brasil

[ana.oening@lactec.org.br](mailto:ana.oening@lactec.org.br) ;

[debora@lactec.org.br](mailto:debora@lactec.org.br);

[daniel@lactec.org.br](mailto:daniel@lactec.org.br);

[lucio.medeiros@lactec.org.br](mailto:lucio.medeiros@lactec.org.br)

Frank Toshioka

Companhia Paranaense de Energia

(COPEL)

Curitiba, Brasil

[frank.toshioka@copel.com](mailto:frank.toshioka@copel.com);

**Resumo**— A legislação vigente no setor elétrico brasileiro impõe que as distribuidoras contratem energia através de leilões, sendo obrigadas a atender 100% de suas demandas, e em caso de descumprimento dessa obrigação são penalizadas financeiramente. Além disso, a cada ano as distribuidoras devem discretizar suas cargas anuais pelos meses que compõem o ano, sendo este processo chamado de sazonalização. Para tal, foi proposto um modelo de otimização linear para modelar o problema de contratação de energia, acoplado a este modelo a sazonalização de carga nos dois primeiros anos de um período de estudo arbitrário. A validação da importância de acoplar a sazonalização conjuntamente com a decisão de compras em leilões foi avaliada através de um estudo de caso, sendo que para diferentes cenários de Preço de Liquidação das Diferenças (PLD) o modelo proposto mostrou resultados superiores ao processo que realiza a sazonalização somente após a decisão de compras.

**Palavras-chave**—Otimização; Sazonalização; Contratação de Energia Elétrica;

### I. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS

A comercialização de energia no Brasil é definida pelo Decreto nº 5.163 de 30 de julho de 2004. A principal imposição para as distribuidoras, trazida por esta legislação é a obrigação de atendimento de 100% de suas demandas, sendo penalizadas em caso de descumprimento dessa regra.

No caso de não atendimento a totalidade de suas cargas as distribuidoras liquidam as sobras ou déficits de energia no Mercado de Curto Prazo (MCP) ao valor do PLD.

Para atender este requisito, as distribuidoras devem comprar energia por meio de leilões, sendo mais comuns os Leilões de Energia Nova (LENs) e Leilões de Energia Existente (LEEs), os LENs subdividem-se em Leilões A-3 e A-5, já os LEEs subdividem-se em Leilões A e A-1. Além desses, para que se pudessem reparar os possíveis desvios no curto prazo das demandas previstas pelas distribuidoras, foram criados os Leilões de Ajuste. Sendo esta diversidade de leilões um dos fatores, que acaba dificultando o planejamento estratégico, visto que eles possuem duração de contratos e início de suprimento ambos diferenciados, conforme disposto na Tabela 1. Atualmente cada leilão costuma negociar mais de um tipo de produto com durações de contratos distintas. Somado a isso, cada categoria de leilão possui limites de compra e de repasse dos custos as tarifas dos consumidores finais, aumentando a dificuldade no planejamento estratégico.

Para tratar o problema da contratação em leilões, alguns autores na literatura analisaram-no como um problema de otimização no curto prazo, considerando apenas os leilões de Ajuste e A-1, como em [6] que resolveram o problema com lógica fuzzy, em [4] utilizaram a técnica de Algoritmos Genéticos, outros autores consideraram-no no horizonte de

longo prazo, como em [5] que utilizaram a técnica de Algoritmos Genéticos e Evolução Diferencial e como em [3] que utilizaram técnicas de programação linear. No entanto, até o momento não existem trabalhos que abordam o tema da contratação adotando leilões que negociam mais do que um tipo de produto.

TABELA I: DURAÇÃO DOS CONTRATOS DE 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

Fonte: Os autores (2017).

Ainda, as distribuidoras precisam, a cada ano, discretizar as suas cargas de energia anuais pelos meses que compõem o ano, sendo tal processo chamado de sazonalização. Contudo, mesmo que as distribuidoras contratem 100% das suas cargas realizadas anualmente, mas possuam exposições mensais (déficit ou superávit de energia), essas sofrerão limite de repasse a tarifa dos consumidores finais, auferindo prejuízo às distribuidoras. Sendo assim, as distribuidoras precisam realizar uma ótima sazonalização para não terem perdas financeiras. O problema decorrente da sazonalização de carga é pouco tratado na literatura, alguns dos trabalhos que abordaram o tema foram: [8] que tiveram como foco a alocação ótima das quantidades de energia de contratos existentes e a definição das opções de leilões que minimizam a despesa total de compra, a modelagem considerou o curto e o longo prazo, realizando a sazonalização em todo o período de estudo, [7] apresentou um modelo de sazonalização de contratos de energia já firmados, que teve o objetivo de fornecer perfis de alocação mensal de contratos minimizando as perdas com a sazonalização.

Este trabalho propõe considerar o modelo de otimização determinístico proposto por [3], para um horizonte de estudo arbitrário, acoplado ao modelo leilões de multiprodutos e a sazonalização da carga nos dois primeiros anos do período de estudo. Ainda, nos dois primeiros anos é tomada a duração dos contratos de Ajuste mensais, sendo que este tópico nunca foi abordado na literatura no contexto de contratação de energia. Por fim, é realizado um estudo de caso, validando a importância de realizar a sazonalização de cargas, conjuntamente com a otimização das compras em leilões.

## II. MODELAGEM DO PROBLEMA

Em geral, as distribuidoras buscam otimizar o problema de contratação de energia sem se importar, em primeira instância, com a sazonalização da carga. Este tipo de acontecimento pode ser descrito através de um fluxograma, ilustrado na Figura 1 e será denominado por modelo I.

A otimização na contratação de energia representada no modelo I, foi tratada como em [3], com algumas modificações, considerando um horizonte de estudo arbitrário e leilões de multiprodutos. A otimização para a sazonalização de carga nos dois primeiros anos, consiste em otimizar a alocação de carga da melhor forma possível evitando prejuízos financeiros por exposições mensais ao MCP. Já a formulação proposta neste trabalho, denominada por modelo II, acopla a sazonalização conjuntamente com a otimização das compras de energia, conforme Figura 2.

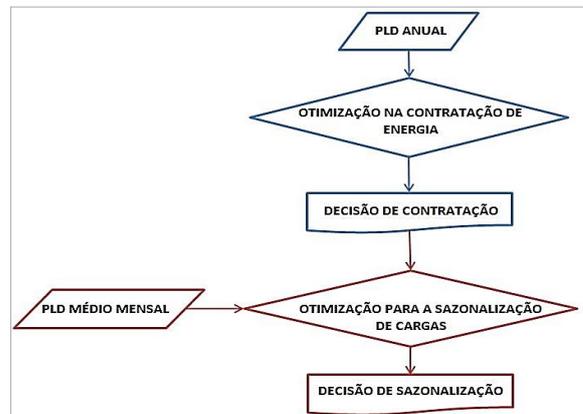


Figura 1. Fluxograma do modelo I.

Fonte: Os autores (2017).



Figura 2. Fluxograma do modelo II.

Fonte: Os autores (2017).

Sendo que este modelo consiste na minimização dos custos advindos dos montantes contratados e dos prejuízos decorrentes do não cumprimento das regras impostas pela legislação, levando em consideração as limitações de compra e de repasse as tarifas, e a obrigatoriedade de contratação de 100% da demanda anual e mensal (nos dois primeiros anos correspondentes ao período de sazonalização). As categorias contratuais consideradas na aquisição de energia foram: Ajuste, A-1, A-3 e A-5. Os índices adotados neste modelo foram:  $t = 0, 1, \dots, h$ , referente a um ano pertencente ao horizonte de estudo, onde  $h$  é o ano de fim deste horizonte;  $a = 0, 1$ , se refere ao ano pertencente ao período de sazonalização;  $m = 1, 2, \dots, 12$ , se refere ao mês pertencente ao período de tempo em que será realizada a sazonalização; e  $c = 1, 2, 3, 4$ , referente à categoria de aquisição contratual dos leilões de Ajuste, A-1, A-3 e A-5, respectivamente. O horizonte de estudo adotado compreende um período em que os contratos nele adquiridos de A-3 e A-5 nunca serão descontratados. Nos dois primeiros anos de planejamento é considerado o horizonte mensal para a realização da sazonalização e nos demais anos um horizonte anual.

As variáveis de decisão do modelo estão listadas a seguir:

- $x_{p,l,t,c}$ : representa o montante total adquirido no  $p$ -ésimo produto do  $l$ -ésimo leilão do ano  $t$  na categoria  $c$ , sendo que nos dois primeiros anos para categoria Ajuste, a variável é dada em MWh, e para o restante dos anos e demais categorias é dada em MWh por ano.
- $SUB_t$ : montante subcontratado (energia faltante) no ano  $t$ , em MWh.
- $SOB_t$ : montante sobrecontratado no ano  $t$ , até 5% da demanda, em MWh.
- $SOB_5t$ : montante sobrecontratado no ano  $t$ , acima de 5% da demanda, em MWh.

- $sxa0_{p,l,a,m,t}$ : montante distribuído pela sazonalização para o mês  $m$  do ano  $t$ , referente à quantidade adquirida no  $p$ -ésimo produto do  $l$ -ésimo leilão do ano  $a$  de Ajuste, em MWh.
- $sxa1_{p,l,0,m,1}$ : montante distribuído pela sazonalização para o mês  $m$  do ano 1, referente a quantidade adquirida no  $p$ -ésimo produto do  $l$ -ésimo leilão do ano 0 de A-1, em MWh.
- $qtde\_sxa0_{p,l,a}$ : montante de energia excedente oriunda da sazonalização realizada no  $p$ -ésimo produto do  $l$ -ésimo leilão de Ajuste ocorrido no ano  $a$ , em MWh.
- $sub_{m,a}$ : montante subcontratado no mês  $m$  do ano  $a$ , em MWh.
- $sob_{m,a}$ : montante sobrecontratado até 5% da demanda mensal, no mês  $m$  do ano  $a$ , em MWh.
- $sob5_{m,a}$ : montante sobrecontratado acima de 5% da demanda mensal, no mês  $m$  do ano  $a$ , em MWh.
- $sca_{m,a}$ : montante de energia contratada antes do período de estudos, que pelo processo de sazonalização foi alocada no mês  $m$  do ano  $a$ .

Abaixo é fornecido o modelo matemático geral para o problema. Nas subseções a seguir serão apresentados detalhadamente os custos, penalidades, prejuízos e restrições deste modelo.

$$\min f(x) = \lambda_1 \overbrace{(DC1 + DC2)}^{\text{custo de compra}} + \lambda_2 \overbrace{(DPSUB + DPRSUB + DPRSOB5 + DPRen + DPRa3)}^{\text{perdas financeiras}}$$

Sujeito a:

Restrições de balanço anual e mensal:

$$\sum_{c=1}^4 Q_{t,c} + SUB_t - SOB_t - SOB5_t = D_t - CA_t; \quad (1)$$

$$t = 0, 1, \dots, h.$$

$$0 \leq SOB_t \leq 0,05 * D_t; t = 0, 1, \dots, h. \quad (2)$$

$$0 \leq sob_{m,t} \leq 0,05 * d_{m,t}; m = 1, 2, \dots, 12; t = 0, 1. \quad (3)$$

$$qa0_{m,a} + sub_{m,a} - sob_{m,a} - sob5_{m,a} =$$

$$d_{m,a} - sca_{m,a}; a = 0; m = 1, 2, \dots, 12. \quad (4)$$

$$qa0_{m,a} + qa1_{m,a} + sub_{m,a} - sob_{m,a} - sob5_{m,a} =$$

$$d_{m,a} - sca_{m,a}; a = 1; m = 1, 2, \dots, 12. \quad (5)$$

Restrições para o cálculo da carga acumulada anual e mensal:

$$Q_{t,1} = \sum_{m=1}^{12} qa0_{m,t}; t = 0, 1. \quad (6)$$

$$Q_{t,1} = \sum_{l=1}^{nl_{t,1}} \sum_{p=1}^{np_{l,t,1}} x_{p,l,t,1} + \left( Q_{(t-1),1} - \sum_{(\bar{p}, \bar{l}, \bar{t}) \in I} x_{\bar{p}, \bar{l}, \bar{t}, 1} \right) \quad (7)$$

$$+ \sum_{l=1}^{nl_{a,1}} \sum_{p=1}^{np_{l,a,1}} \sum_{a=0}^1 qtde\_sxa0_{p,l,a}; t = 2.$$

$$Q_{t,1} = \sum_{l=1}^{nl_{t,1}} \sum_{p=1}^{np_{l,t,1}} x_{p,l,t,1} + \left( Q_{(t-1),1} - \sum_{(\bar{p}, \bar{l}, \bar{t}) \in I} x_{\bar{p}, \bar{l}, \bar{t}, 1} \right); \quad (8)$$

$$t = 3, 4, \dots, h. \quad (9)$$

$$Q_{t,2} = 0; t = 0.$$

$$Q_{t,2} = \sum_{m=1}^{12} qa1_{m,t}; t = 1. \quad (10)$$

$$Q_{t,2} = \sum_{l=1}^{nl_{(t-1),2}} \sum_{p=1}^{np_{l,(t-1),2}} x_{p,l,(t-1),2} + \quad (11)$$

$$\left( Q_{(t-1),2} - \sum_{(\bar{p}, \bar{l}, \bar{t}) \in K} x_{\bar{p}, \bar{l}, \bar{t}, 2} \right); t = 2, 3, \dots, h.$$

$$Q_{t,3} = 0; t = 0, 1, 2. \quad (12)$$

$$Q_{t,3} = Q_{(t-1),3} + \sum_{l=1}^{nl_{(t-3),3}} \sum_{p=1}^{np_{l,(t-3),3}} x_{p,l,(t-3),3}; \quad (13)$$

$$t = 3, 4, \dots, h. \quad (14)$$

$$Q_{t,4} = Q_{(t-1),4} + \sum_{l=1}^{nl_{(t-5),4}} \sum_{p=1}^{np_{l,(t-5),4}} x_{p,l,(t-5),4}; \quad (15)$$

$$t = 5, 6, \dots, h. \quad (16)$$

$$qa0_{m,t} = \sum_{a=0}^1 \sum_{l=1}^{nl_{t,1}} \sum_{p=1}^{np_{l,t,1}} sxa0_{p,l,a,m,t}; t = 0, 1; \quad (17)$$

Restrições relacionadas à sazonalização de contratos:

$$x_{p,l,a,1} = \sum_{t=0}^1 \sum_{m=1}^{12} sxa0_{p,l,a,m,t} + qtde\_sxa0_{p,l,a}; \quad (18)$$

$$p = 1, \dots, np_{l,t,c}; l = 1, \dots, nl_{t,c}; a = 0, 1.$$

$$x_{p,l,0,2} = \sum_{m=1}^{12} sxa1_{j,l,0,m,1}; p = 1, \dots, np_{l,c,t}; \quad (19)$$

$$l = 1, \dots, nl_{c,t}.$$

$$\sum_{m=1}^{12} sca_{m,a} = CA_a; a = 0, 1. \quad (20)$$

$$0,85 * \frac{x_{p,l,t,1}}{d_{p,l,t,1}} \leq sxa0_{p,l,a,m,t} \leq 1,15 * \frac{x_{p,l,t,1}}{d_{p,l,t,1}}; \quad (21)$$

$$p = 1, \dots, np_{l,t,1}; l = 1, \dots, nl_{t,1}; a = 0, 1; t = 0, 1;$$

$$m \in [m_{início\_sazao_{p,l,a,t}}, m_{fim\_sazao_{p,l,a,t}}].$$

$$0,85 * \frac{x_{p,l,t,2}}{12} \leq sxa1_{p,l,a,m,t} \leq 1,15 * \frac{x_{p,l,t,2}}{12}; \quad (22)$$

$$p = 1, \dots, np_{l,t,2}; l = 1, \dots, nl_{t,2}; a = 1;$$

$$m = 1, \dots, 12; t = 0.$$

$$0,85 * \frac{CA_a}{12} \leq sca_{m,a} \leq 1,15 * \frac{CA_a}{12}; a = 0, 1; \quad (23)$$

$$m = 1, \dots, 12.$$

Restrições relacionadas à compra na categoria Ajuste

$$\sum_{l=1}^{nl_{t,1}} \sum_{p=1}^{np_{l,t,1}} x_{p,l,t,1} \leq 0,05 * \left( CA_t + \sum_{c=1}^4 Q_{c,t} \right); \quad (24)$$

$$t = 0, 1, \dots, h.$$

Restrições relacionadas à compra na categoria A-1:

$$MR_t = \sum_{c=2}^4 Q_{c,t} - \left( \sum_{c=2}^4 Q_{c,(t+1)} - \sum_{(p,l,t,c) \in J} x_{p,l,t,c} \right) \quad (25)$$

+CA<sub>t</sub> - (CA<sub>t+1</sub> - CV<sub>t+1</sub>); t = 0,1,2, ..., h - 1.

$$\sum_{l=1}^{nl_{t,2}} \sum_{p=1}^{np_{l,t,2}} x_{p,l,t,2} + q_{2lim_t} \geq 0,96 * MR_t; \quad (26)$$

t = 0,1, ..., h - 1.

$$\sum_{l=1}^{nl_{t,2}} \sum_{p=1}^{np_{l,t,2}} x_{p,l,t,2} \leq MR_t + 0,005 * D_t; \quad (27)$$

t = 0,1, ..., h - 1.

Restrições relacionadas às compras em A-3:

$$\sum_{l=1}^{nl_{t,3}} \sum_{p=1}^{np_{l,t,3}} x_{p,l,t,3} - q_{3lim_t} \leq 0,02 * CV_{A5_t}; \quad (28)$$

t = 0,1, ..., h - 3.

Restrições de não negatividade:

$$0 \leq Q_{t,c}; t = 0,1, ..., h; c = 1,2,3,4. \quad (29)$$

$$0 \leq SUB_t; t = 0,1, ..., h. \quad (30)$$

$$0 \leq SOB5_t; t = 0,1, ..., h. \quad (31)$$

$$0 \leq qa0_{m,t}; m = 1,2, ..., 12; t = 0,1. \quad (32)$$

$$0 \leq x_{p,l,t,c}; p = 1, ..., np_{l,t,c}; l = 1, ..., nl_{t,c}; t = 0,1, ..., h; c = 1,2,3,4. \quad (33)$$

$$0 \leq qtd_{e_{sxa0_{p,l,t}}}; p = 1, ..., np_{l,t,1}; l = 1, ..., nl_{t,1}; t = 2. \quad (34)$$

$$0 \leq qa1_{m,a}; m = 1,2, ..., 12; t = 1. \quad (35)$$

$$0 \leq sxa1_{p,l,0,m,1}; p = 1, ..., np_{l,t,2}; l = 1, ..., nl_{t,1}; m = 1,2, ..., 12. \quad (36)$$

$$0 \leq sub_{m,t}; m = 1,2, ..., 12; t = 0,1. \quad (37)$$

$$0 \leq sob_{m,t}; m = 1,2, ..., 12; t = 0,1. \quad (38)$$

$$0 \leq sca_{m,a}; m = 1,2, ..., 12; a = 0,1. \quad (39)$$

Onde:

$\lambda_1$ : parâmetro de ponderação do custo da energia adquirida.

$\lambda_2$ : parâmetro de ponderação das perdas financeiras.

DC1: custo total deflacionado pelo número Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA), da compra de energia realizada durante o período de estudo via leilões, em R\$/MWh.

DC2: custo total deflacionado pelo IPCA, da energia faltante liquidada no MCP, em R\$/MWh.

DPSUB: penalidade devido a subcontratação anual, deflacionada pelo IPCA, em R\$/MWh.

DPRSUB: prejuízo devido à subcontratação, deflacionado pelo IPCA, em R\$/MWh.

DPRS0B5: prejuízo por sobrecontratação acima dos 5% da demanda, deflacionado pelo IPCA, em R\$/MWh.

DPRen: prejuízo pelo limite de repasse da energia nova, deflacionado pelo IPCA, em R\$/MWh.

DPRa3: prejuízo advindo do limite de repasse de A-3, deflacionado pelo IPCA, em R\$/MWh.

$Q_{t,c}$ : carga acumulada da categoria c adquirida durante o período de estudo, e encontra-se vigente no ano t, em MWh.

$D_t$ : demanda anual da distribuidora no ano t, em MWh.

$CA_t$ : contratos anteriores e pré-definidos acumulados no ano t, em MWh.

$qa0_{m,a}$ : montante de energia vigente adquirida na categoria Ajuste durante os dois primeiros anos, que encontra-se acumulada no mês m do ano a, em MWh.

$d_{m,a}$ : demanda mensal da distribuidora no mês m do ano a, em MWh.

$qa1_{m,a}$ : montante de energia vigente adquirida na categoria Ajuste durante o período de estudo, e encontra-se acumulada no mês m do ano a, em MWh.

I: conjunto de todos os possíveis vetores tridimensionais que retratam todos os produtos negociados na categoria A-1, que irão vencer ao final do ano t - 1, sendo assim cada posição do vetor fornece o produto, o leilão e o ano onde foi adquirida a energia que está a perdurar.

$nl_{t,c}$ : número total de leilões ocorridos no ano t na categoria c.

$np_{l,t,c}$ : número total de produtos negociados no l-ésimo leilão do ano t na categoria c.

K: conjunto de todos os possíveis vetores tridimensionais que retratam todos os produtos negociados, na categoria A-1, que irão vencer ao final do ano t - 1, sendo assim cada posição do vetor fornece o produto, o leilão e o ano onde foi adquirida a energia que está a perdurar.

$m_{inicio\_saza0_{p,l,a,t}}$ : mês de início da sazonalização em Ajuste no ano t do p-ésimo produto adquirido no l-ésimo leilão do ano a.

$m_{fim\_saza0_{p,l,a,t}}$ : mês de fim da sazonalização em Ajuste no ano t do p-ésimo produto adquirido no l-ésimo leilão do ano a.

MR<sub>t</sub>: Montante de Reposição (MR) do ano t, em MWh.

J: conjunto de todos os possíveis vetores quadridimensionais que retratam todos os produtos negociados que irão entrar em vigor no ano t + 1, sendo assim cada posição do vetor fornece o produto, o leilão, o ano e a categoria onde foi adquirida a energia que está a entrar em vigor.

CV<sub>t+1</sub>: montante de energia contratada antes do período de estudo que entra em vigor no ano t + 1, em MWh.

$q_{2lim_t}$ : representa a diferença entre 96% do MR e a quantidade adquirida no leilão A-1 no ano t, em MWh.

$q_{3lim_t}$ : montante adquirido acima de 2% da carga verificada no ano "A-5", ou seja no ano "t - 2", em MWh.

CV<sub>A5\_t</sub>: carga verificada, 5 anos antes do recebimento da energia adquirida em A-3, no ano t, em MWh.

$d_{p,l,t,c}$ : duração do contrato adquirido no p-ésimo produto do l-ésimo leilão do ano t da categoria c, em meses.

#### A. Custo da Energia Contratada em Leilões

É o valor da multiplicação do montante adquirido pelo preço de compra, sendo este montante a própria variável  $x_{p,l,t,c}$  no caso da categoria Ajuste nos dois primeiros anos, e nos demais casos será a variável  $x_{p,l,t,c}$  multiplicado pela sua respectiva duração de contrato. Vale ressaltar que os valores monetários serão deflacionados para uma mesma data base, para que seja possível a comparação entre eles. Para deflacionar tais valores será dividido seu respectivo preço pelo número índice do IPCA correspondente ao ano do cálculo do mesmo e multiplicá-lo pelo IPCA da data base desejável. Utilizando este procedimento, tem-se que o custo da energia contratada no período de estudo é DC1, conforme equação (40).

$$\begin{aligned}
DC1 = & \sum_{c=2}^4 \sum_{t=0}^h \sum_{l=1}^{n_{l,t,c}} \sum_{p=1}^{np_{l,t,c}} d_{p,l,t,c} * p'_{l,t,c} * x_{p,l,t,c} \\
& + \sum_{t=0}^1 \sum_{l=1}^{n_{l,t,1}} \sum_{p=1}^{np_{l,t,1}} p'_{l,t,1} * x_{p,l,t,1} \\
& + \sum_{t=2}^h \sum_{l=1}^{n_{l,t,1}} \sum_{p=1}^{np_{l,t,1}} d_{p,l,t,1} * p'_{l,t,1} * x_{p,l,t,1}
\end{aligned} \quad (40)$$

Onde:

$p'_{l,t,c}$ : preço da energia do  $l$ -ésimo leilão da categoria  $c$ , deflacionado pelo IPCA, em R\$/MWh.

#### B. Custo da Energia Faltante liquidada no MCP

No caso de subcontratação (déficit de energia), a energia faltante deve ser liquidada no MCP a PLD. Sendo o custo total da energia faltante liquidada o produto entre a quantidade faltante e o PLD. Como premissa deste trabalho será considerada a contabilização no MCP com base mensal nos dois primeiros anos, e nos demais anos a base anual, conforme detalhado na equação (41).

$$DC2 = \sum_{t=0}^1 pld'_{m,t} * sub_{m,t} + \sum_{t=0}^h PLD'_t * SUB_t \quad (41)$$

Onde:

$pld'_{m,t}$ : é o PLD médio mensal para o mês  $m$ , do ano  $t$ , deflacionado pelo IPCA, em R\$/MWh.

$PLD'_t$ : é o PLD médio anual do ano  $t$ , deflacionado pelo IPCA, em R\$/MWh.

#### C. Penalização por Subcontratação Anual

A distribuidora será penalizada por insuficiência de lastro, cujo valor é dado pelo máximo entre o Valor Anual de Referência (VR) e o PLD, conforme descrito na equação (42).

$$DPSUB = \sum_{t=0}^h \max\{VR'_t, PLD'_t\} * SUB_t \quad (42)$$

Onde:

$VR'_t$ : é o VR para o ano  $t$ , deflacionado pelo IPCA, em R\$/MWh.

#### D. Prejuízo por Subcontratação Anual e Mensal

A distribuidora além de liquidar a energia faltante no MCP a PLD e ser penalizada por falta de lastro, sofrerá ainda prejuízo devido a limitação no repasse do custo da energia liquidada no MCP, sendo que a concessionária poderá somente repassar para a tarifa o menor valor entre o PLD e o VR, sendo seu prejuízo a diferença entre o montante pago a PLD e o menor valor entre PLD e VR. Porém esta limitação de repasse se dá mensalmente a montantes subcontratados em cada mês de forma proporcional ao déficit anual, esta proporcionalidade torna essa regra não linear, sendo assim por premissa será considerado que toda quantidade subcontratada mensalmente sofra limite de repasse ao VR. Portanto nos dois primeiros anos do período de estudo será considerado um prejuízo mensal, nos demais anos anual, conforme a equação (43).

$$DPRSUB = \sum_{t=0}^1 \sum_{m=1}^{12} [pld'_{m,t} - \min\{VR'_t, pld'_{m,t}\}] * sub_{m,t} \quad (43)$$

$$+ \sum_{t=2}^h [PLD'_t - \min\{VR'_t, PLD'_t\}] * SUB_t$$

#### E. Prejuízo Devido a Sobrecontratação Acima dos 5% da Demanda Anual

No caso de a distribuidora adquirir energia além dos 5% da sua demanda, ela não poderá repassar os custos dessa energia aos seus consumidores finais, mas poderá liquidar a energia remanescente no MCP a PLD. No caso de PLD abaixo do valor pago pela energia a distribuidora irá auferir prejuízo, em caso contrário irá auferir lucro. No modelo proposto, não será considerado o lucro que a distribuidora poderá ter, pois o objetivo da otimização é a minimização de prejuízos e custos. Logo o prejuízo causado na sobrecontratação será a diferença entre o valor pago pela energia e o valor da liquidação. Da mesma forma que a subcontratação foi tratada anteriormente, o mesmo ocorre na sobrecontratação acima de 5% da demanda, logo como discutido anteriormente, será considerado nos dois primeiros anos os prejuízos que a distribuidora possa auferir com a liquidação mensal, já nos demais anos será considerado o prejuízo advindo da liquidação anual. Por premissa, será considerado o valor pago pela energia, como sendo o valor máximo dos possíveis contratos a serem contratados no horizonte de estudo, vigentes no ano  $t$ . Essa premissa foi adotada para manter a linearidade do problema conjuntamente com a minimização dos possíveis riscos financeiros advindos de uma exposição ao MCP, optando-se por simular o pior caso possível do prejuízo decorrente da sobrecontratação acima dos 5% da demanda, conforme equação (44).

$$\begin{aligned}
DPRSOB5 = & \sum_{t=0}^1 \max\{pMAX'_t - pld'_{m,t}, 0\} * sob5_{m,t} \\
& + \sum_{t=2}^h \max\{pMAX'_t - PLD'_t, 0\} * SOB5_t
\end{aligned} \quad (44)$$

Onde:

$pMAX'_t$ : é o preço máximo da energia que poderá ser contratada no horizonte de estudo, vigente no ano  $t$ , deflacionado pelo IPCA, em R\$/MWh.

#### F. Prejuízo Devido ao Limite de Repasse à Tarifa dos Contratos Adquiridos em Energia Nova

As distribuidoras são obrigadas a contratar na categoria A-1, o limite mínimo da quantidade de 96% do MR, no caso de não ser contratado o limite mínimo de 96% do MR da distribuidora, a quantidade equivalente à diferença faltante ( $q\_2lim_t$ ), será penalizada nos contratos de energia nova (contratados celebrados por meio de leilões A-3 e A-5). O repasse as tarifas dos consumidores finais, referente a essa quantidade de energia, será limitado ao Valor de Referência da Energia Existente (VRE), ou seja, a diferença entre o valor pago pela energia nova e o VRE, caso o VRE seja menor que o valor pago, será o prejuízo adquirido pela distribuidora por não poder repassar o valor de compra. Este limite de repasse será aplicado nos três primeiros anos após o leilão A-1. A parcela de energia nova que será penalizada é a adquirida nos leilões que ocorreram, 3 e 5 anos antes do recebimento da energia comprada em A-1, com os contratos de maior preço, conforme equação (45) define.

$$DPRen = 3 * \sum_{t=0}^{h-1} \max\{\max\{p'_{3,(t+1)-3}, p'_{4,(t+1)-5}\} - VRE'_{t+1}, 0\} * q\_2lim_t \quad (45)$$

Onde:

$p'_{3,(t+1)-3}$ : é o preço de compra de energia na categoria A-3 para o ano "A-3", onde "A-1" é o ano do cálculo de  $q\_2lim_t$ , deflacionado pelo IPCA, em R\$/MWh.

$p'_{4,(t+1)-5}$ : é o preço de compra de energia na categoria A-5 para o ano "A-5", onde "A-1" é o ano do cálculo de  $q\_2lim_t$ , deflacionado pelo IPCA em R\$/MWh.

$VRE'_{t+1}$ : é o  $VRE_t$  pelo IPCA, sendo que  $VRE_t$  é o VRE para o ano  $t$ , em R\$/MWh.

#### G. Prejuízo Devido ao Limite de Repasse à Tarifa dos Contratos Adquiridos em A-3

O montante adquirido anualmente, na categoria A-3, acima do limite de 2% da carga da distribuidora verificada no ano "A-5", sofrerá limitação do repasse de energia ao menor valor entre o VL5 e o VL3, ambos corrigidos monetariamente. Em que VL3 e VL5 são os valores médios de aquisição nos leilões de compra de energia proveniente de novos empreendimentos de geração realizados no ano "A-3" e "A-5" respectivamente, ponderados pelas respectivas quantidades adquiridas, onde "A" é o ano de recebimento da energia adquirida, conforme equação (46).

$$DPRa3 = \sum_{t=0}^{h-3} (mp'_{t,3} - \min\{VL5'_t, VL3'_t\}) * q\_3lim_t \quad (46)$$

Onde:

$mp'_{t,3}$ : é o preço médio dos leilões A-3 do ano  $t$ , deflacionados pelo IPCA, em R\$/MWh.

$VL5'_t$ : é o valor médio ponderado dos leilões de energia nova ocorridos no ano "A-5", para início de suprimento no ano  $t$ , deflacionado pelo IPCA, em R\$/MWh.

$VL3'_t$ : é o valor médio ponderado dos leilões de energia nova no ano "A-3", para início de suprimento no ano  $t$ , deflacionado pelo IPCA, em R\$/MWh.

#### H. Restrições de Balanço Anual e Mensal

As distribuidoras devem garantir o atendimento de 100% de sua demanda, e no caso de descumprimento sofrem penalidades, com exceção da sobrecontratação até o limite de 5% da demanda, tal limitação é descrita pelas equações (2) e (3) para o caso anual e mensal. Logo, tem-se que o montante de energia adquirido antes e durante o período de estudo, acrescido dos possíveis desvios do mercado (subcontratação e sobrecontratação) têm que ser igual à demanda da distribuidora, conforme as equações (1), (4) e (5) descrevem para os casos anual e mensal.

#### I. Restrições para o Cálculo da Carga Acumulada Anual e Mensal

A carga acumulada refere-se à quantidade total de energia contratada no período de estudo que estará vigente em determinado ano ou mês de dada categoria. As expressões (6) a (17) descrevem o cálculo para a carga acumulada, onde no caso anual a carga acumulada, se determina para os seguintes casos:

- Carga não vigente: para determinada categoria, se no ano de cálculo da carga acumulada não houver nenhum possível contrato de energia em vigor da categoria, será atribuído o valor zero para a carga acumulada desse ano e dessa categoria em questão, conforme as equações (9), (12) e (14) descrevem.
- Categoria onde não há descontratações: para as categorias A-3 e A-5, que por premissa seus contratos não expiram no período de estudo, a carga acumulada para cada categoria é dada pela carga acumulada do ano anterior mais a carga que entrará em vigor no ano em questão, conforme as equações (13) e (15) descrevem.
- Carga nos dois primeiros anos: para o cálculo da carga nos dois primeiros anos deve-se observar a sazonalização ocorrida, no qual a carga anual será a soma das cargas mensais do ano, conforme explicado nas equações (6) e (10).
- Categorias que possuem descontratações: para as categorias Ajuste e A-1, em que as descontratações de seus contratos são consideradas ao problema, a carga acumulada se dá através da diferença entre a carga acumulada no ano anterior e os contratos que expiraram no final do ano anterior, sendo somada a essa quantidade os contratos que entrarão em vigor no ano em questão, conforme as equações (8) e (11) explicam. Somente para a categoria Ajuste no terceiro ano, é acrescido a esse valor o excedente de sazonalização ocorrido nos dois primeiros anos, conforme a equação (7) relata.

Já o cálculo da carga acumulada mensalmente se dá através da soma dos montantes de energia alocados pela sazonalização no mês de cálculo da carga, conforme as equações (16) e (17) mostram, para as categorias Ajuste e A-1 que são as únicas com possíveis contratos vigentes nos dois primeiros anos.

#### J. Restrições Relacionadas à Sazonalização de Contratos

As equações (18) a (20) descrevem restrições para o cálculo da sazonalização, já as equações (21) a (23) descrevem restrições de limitação para a sazonalização. Para a realização da sazonalização da categoria Ajuste, a restrição (18) descreve que o montante de energia adquirido de um determinado produto, deve ser igual ao somatório da sazonalização realizada para este produto acrescido de um possível excedente dessa sazonalização, este excedente considera o possível caso de um contrato vigente no curto prazo, continuar vigente após os dois primeiros anos onde se realiza a sazonalização, sendo possível alocar a carga desse contrato para o próximo ano (terceiro ano), considerando-o como excedente de sazonalização. Da mesma forma, a equação (19) retrata essa restrição de cálculo para a categoria A-1, com a diferença que nesta categoria não se considerada a variável de excedente, pois a carga contratada é disposta por MWh/ano, sendo a vigência dessa carga durante o inteiro ano, logo não se faz necessário o uso da variável excedente de sazonalização. A equação (20) faz o mesmo, mas em relação a sazonalização dos contratos anteriores e pré-definidos.

Segundo as premissas 3.29 a 3.37 de [1], os montantes referentes à sazonalização dos contratos de Ajuste devem respeitar os limites situados entre 85% a 115% da média anual da energia contratada. Já para as demais categorias esse limite só existe quando a sazonalização é realizada pela CCCE, logo considerando o pior caso possível, foi adotado como premissa deste trabalho os limites de sazonalização

para ambas as categorias, tais limites são descritos pelas equações (21), (22) e (23).

#### K. Restrições Relacionadas à Compra na Categoria Ajuste

O montante total a ser contratado na categoria Ajuste por uma distribuidora deve ser até 5% da carga total contratada por ela, conforme a equação (24) descreve.

#### L. Restrições Relacionadas à Compra na Categoria A-1

O Montante de Reposição (MR) é a quantidade de energia que está a vencer no final de determinado ano, não sendo computadas para seu cálculo as quantidades expiradas da categoria Ajuste. Logo, o MR pode ser calculado fazendo a diferença entre a carga do ano (com exceção de Ajuste) e a quantidade obtida pelo cálculo da diferença entre a carga do próximo ano (com exceção de Ajuste) e os contratos que entram em vigor, conforme descrito na equação (25) para a carga acumulada e os contratos anteriores. A legislação impõe que a distribuidora recontrate na categoria A-1, o mínimo de 96% do seu MR, sob pena de limite de repasse de energia nova, conforme relatado na subseção 2.6, sendo esta restrição descrita pela equação (26). Também, a distribuidora pode recontratar até o limite do seu MR acrescido de 0,5% da carga realizada no ano da compra em A-1, sendo este limite superior descrito pela equação (27).

#### M. Restrições Relacionadas à Compra na Categoria A-3

A compra de energia nos leilões A-3, é limitada a 2% da carga da distribuidora verificada 5 anos antes do recebimento da energia, sob pena de limite de repasse as tarifas, conforme relatado anteriormente, sendo está restrição representada pela equação (28).

#### N. Restrições de Não-negatividade

Os limites de não-negatividade são descritos nas equações (29) a (39), sendo necessários para viabilidade do problema.

### III. ESTUDO DE CASO

Para analisar a importância da sazonalização, foi elaborado um estudo de caso comparativo entre os modelos I e II, para o período de dois anos, onde se realiza a sazonalização, conforme as premissas adotadas neste trabalho.

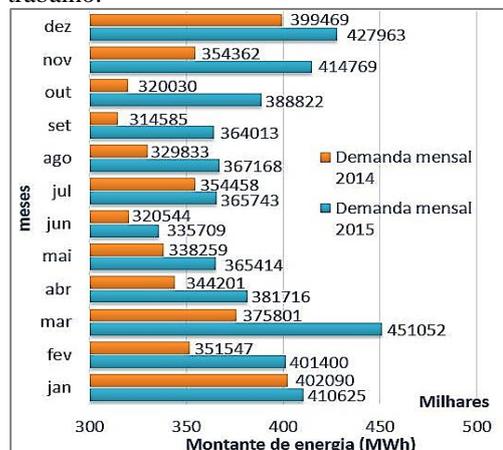


Figura 3. Demanda mensal.

Fonte: Os autores (2017).

Sendo assim, foi escolhido o período histórico de 2014 a 2015. Os dados utilizados para esse período vêm de uma distribuidora fictícia e os preços praticados no mercado de

energia são preços reais, todos deflacionados pelo IPCA, para a data base de dezembro de 2013. As informações da demanda mensal da distribuidora e o PLD médio mensal, para os anos de 2014 a 2015, estão dispostos nas Figura 3 e Figura 4, respectivamente.

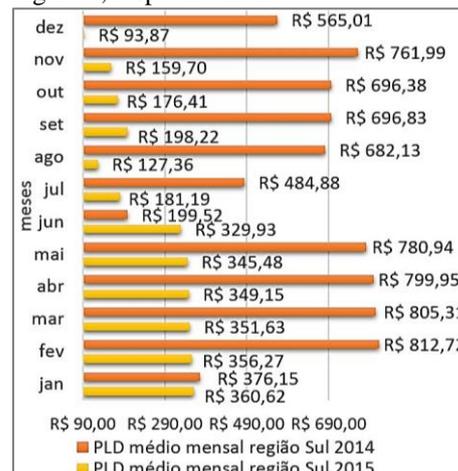


Figura 4. PLD médio mensal da Região Sul

Fonte: Adaptado de (CCEE, 2017b)

As demais informações estão dispostas na Tabela 2, sendo que os preços foram retirados de [2] e deflacionados pelo número índice do IPCA para a data base de dezembro de 2013. Os preços médios anuais de A-3 e A-5 utilizados para o cálculo de limite de repasse em energia nova são  $p'_{3,(2014+1)-3} = p_{3,2012} = R\$121,14$  e  $p'_{4,(2014+1)-5} = p'_{4,2010} = R\$101,18$ , deflacionados pelo IPCA para data base de dezembro de 2013.

TABELA II: DEMAIS INFORMAÇÕES DA DISTRIBUIDORA FICTÍCIA E OUTROS PREÇOS DO MERCADO.

t (ano)	Montante de energia (em MWh)			Preços do mercado de energia (em R\$)		
	$D_t$	$CA_t$	$CV_t$	$PLD_t$	$VR_t$	$VRE_t$
2014	205179	4168369	485000	660,98	111,59	185,22
2015	674395	3997199	-	264,74	96,33	-

Fonte: Os autores (2017) e adaptação de preços de [2].

Visto que o período de estudo adotado é de dois anos, os únicos leilões que poderão ser contratados neste período e ter suas cargas vigentes ainda nele, serão os leilões de Ajuste e A-1, logo a Tabela 3 fornece as informações históricas deles, para os anos de 2014 e 2015. Sendo que os preços dos leilões, foram deflacionados pelo IPCA, para a data de dezembro de 2013.

TABELA III: DADOS DOS LEILÕES UTILIZADOS

Categoria	Leilão	Preços (em R\$)	Produtos	Duração	Tempo para início de suprimento	Mês de ocorrência
Ajuste	1° de 2014*	115,08	1° produto	10 meses	0 mês	Janeiro
	1° de 2015	359,30	1° produto 2° produto	3 meses 6 meses	0 mês	Janeiro
A-1	1° de 2014	185,22	1° produto	1 ano		

Fonte: Adaptado de [2].

\*leilão fictício visto que não houve a ocorrência de nenhum leilão de ajuste em 2014.

#### A. Resultados

Foram criados em MATLAB, com o auxílio da ferramenta linprog, dois solvers para a resolução dos modelos I e II. Utilizando como dados de entrada as informações

descritas anteriormente, foram executados ambos solvers. No ano de 2014 houve a mesma contratação para o atendimento da demanda em ambos os modelos, visto que só havia um produto sendo negociado para suprimento de 2014, para 2015 as contratações sazonalizadas são descritas na Figura 5.

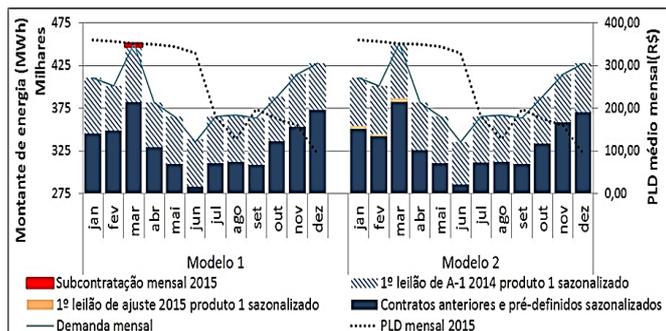


Figura 5. Sazonalização de 2015 para o modelo I e II.

Fonte: Os autores (2017)

O modelo I buscou suprir sua demanda no leilão A-1 que estava mais barato do que o leilão de Ajuste, considerando em primeira instância que a duração do leilão de ajuste se perduraria por todo ano. Quando o modelo I, realiza a sazonalização dos montantes já contratos, ele não consegue suprir a demanda mensal para março, pois mesmo alocando o limite máximo permitido, isto não é o suficiente para suprir sua demanda. Já o modelo II prevendo este fato, pois realiza a sazonalização conjuntamente com a decisão de compras, preferiu comprar um pouco em Ajuste para conseguir suprir o mês de março. O modelo I e II tiveram um custo total de R\$ 131.541.407,64 e R\$ 131.536.977,28, respectivamente. Logo, a utilização neste estudo de caso do modelo II economizou cerca de R\$ 4.430,36 em relação ao modelo I. Pode-se perguntar se está eficaz se mantém para outros valores de PLD médio mensal, sendo assim simulou-se 1000 cenários de PLD médio mensal de 2014 a 2015, entre os limites mínimos e máximos do PLD para os anos de 2014 e 2015, sendo eles: 15,62 e 28,66 para o PLD mínimo e 822,83 e 367,93 para o PLD máximo, respectivamente. Sendo tais valores deflacionados pelo IPCA para dezembro de 2013. Calculando a diferença entre o custo total do modelo I e do modelo II para cada cenário de PLD, obteve-se a seguinte distribuição dos valores, conforme representado na Figura 6.

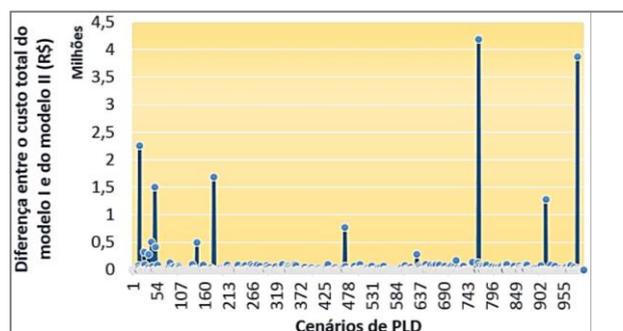


Figura 6. Diferença entre o modelo I e II para diferentes cenários de PLD.

Fonte: Os autores (2017).

Nota-se que a diferença entre ambos modelos chegou a ter um pico máximo em torno dos 4 milhões de reais, sendo que esta diferença em nenhum momento foi negativa, provando a superioridade do modelo II em relação ao modelo I. Em

muitos momentos ambos modelos apresentaram diferença nula, a média das diferenças entre o modelo I e o II, para todos os cenários de PLD, foi de R\$ 26.159,35.

Logo, para diversos cenários de PLD o modelo II se mostrou equivalente e até mesmo superior ao modelo I.

#### IV. CONCLUSÕES

Neste trabalho apresentou-se uma modelagem determinística para a otimização na contratação de energia, acoplado a ela a otimização da sazonalização de carga. Para diferentes cenários de PLD o modelo proposto se mostrou superior ou equivalente ao modelo usual, que realiza a sazonalização da carga somente após a decisão de compras. Vale ressaltar que o modelo apresentado é determinístico, não considerando as possíveis variações da demanda e do PLD. Porém, estas possíveis variações podem ser tratadas através da análise de sensibilidade.

#### 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] CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. (2017a). Submódulo 3.2 – Contratos do Ambiente Regulado.
- [2] CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. (2017b). Informações ao Mercado. Disponível em: <http://www.ccee.org.br>. Acesso em: 07.04.2017.
- [3] Freitas, D., Volpi, N. M. P., Oening, A. P., Marcilio, D. C., Detzel, D. H. M. e Medeiros, L. (2016). Artigo em conferência. In *Anais do XLVIII SBPO*, p. 971–982, Vitória. SOBRAPO.
- [4] Lazo, J. L., Lima, D. A. e Figueiredo, K. (2012). 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.
- [5] Lopes, P. B., Martinez, L. Araujo, H. X. (2014). Estratégia robusta de contratação de energia elétrica para distribuidoras. Artigo em conferência. In *Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática*, p. 3483-3490, Belo Horizonte. SBA.
- [6] Rodrigues, F. F. C., Borges, C. L. T. e Falcão, D. M. (2007). Programação da contratação de energia considerando geração distribuída e incertezas na previsão de demanda. *Revista Controle & Automação*, v. 18, n. 3, p. 361-371.
- [7] Sokei, C. T., Silva Filho, D. e Ramos, D. S. (2008) Minimização de perdas no processo de sazonalização de contratos de energia utilizando algoritmos genéticos. XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica.
- [8] Zanfelic, F. R. e Barbosa, P. S. R. (2004). Modelagem para otimização no planejamento energético de empresas distribuidoras de energia sob enfoque do novo modelo do setor elétrico. XVI Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica.