

## OTIMIZAÇÃO NA CONTRATAÇÃO DE ENERGIA SOB A ÓTICA DAS DISTRIBUIDORAS

**Danielle de Freitas<sup>1</sup>**  
dane-freitas@hotmail.com

**Neida Maria Patias Volpi<sup>1</sup>**  
neida@ufpr.br

**Ana Paula Oening<sup>2</sup>**  
ana.oening@lactec.org.br

**Débora Cíntia Marcilio<sup>2</sup>**  
debora@lactec.org.br

**Daniel Henrique Marco Detzel<sup>2</sup>**  
daniel@lactec.org.br

**Lucio de Medeiros<sup>2</sup>**  
lucio.medeiros@lactec.org.br

<sup>1</sup>UFPR – Universidade Federal do Paraná  
PPGMNE – Programa de Pós-graduação em  
Métodos Numéricos em Engenharia  
Curitiba, Paraná, Brasil

<sup>2</sup>LACTEC – Instituto de Tecnologia para o  
Desenvolvimento  
Divisão de Sistemas Elétricos  
Curitiba, Paraná, Brasil

### RESUMO

Pelo Decreto 5.163/2004 as distribuidoras de energia no Brasil, só podem contratar energia através de leilões e são obrigadas a atender 100% do seu mercado, e em caso de descumprimento dessa obrigação são penalizadas financeiramente. Logo, as distribuidoras necessitam de um bom planejamento de compra de energia para o seu mercado, levando em consideração uma ótima estratégia de contratação nos leilões, aliada de uma boa previsão da demanda do seu mercado. Este trabalho apresenta um modelo de otimização na contratação de energia que busca minimizar os custos e as penalidades advindas da contratação em leilões, considerando um horizonte de estudo de seis anos. Foram utilizados valores fictícios de uma distribuidora de energia para um estudo de caso, os resultados mostraram-se promissores, visto que o modelo captura as informações do mercado e as decisões já tomadas, retornando uma solução de menor custo.

**PALAVRAS CHAVE. Otimização, Leilões de energia, Distribuidoras.**

**Área principal: PO na área de energia.**

### ABSTRACT

By Decree 5.163/2004 the energy distributors in Brazil can only hire energy through energy auctions and be required to meet 100% of your market and in case of noncompliance with this obligation will be penalized financially. Therefore, the distributors need a good energy purchase planning for your market, considering a great contraction strategy in the auctions, allied with a good forecast of the demand of your market. This paper presents an optimization model in hiring energy that search to minimize the costs and penalties stemming from contracting in auctions, considering a six-year study horizon. Fictitious values of a distributor to a case study were used, the results were promising, since the model captures market information and decisions already taken, returning a lower cost solution.

**KEYWORDS. Optimization, Energy auctions, Distributors.**

**Main Area: PO in the energy area.**

## 1. Introdução e Justificativas

A comercialização de energia elétrica no Brasil é definida pelas Leis nº 10.847 e 10.848, de 15 de março de 2004, e pelo Decreto nº 5.163, de 30 de julho de 2004. Dentre outras regras que a legislação impõe sobre as distribuidoras, a principal é de que todos os agentes de distribuição, nos termos do Art. 2º, II, do Dec. nº 5.163/2004, deverão garantir o atendimento a cem por cento de seus mercados de energia. E para que haja atendimento à obrigação prevista no inciso II do art. 2º, o Art. 11 descreve que cada agente de distribuição deverá adquirir energia, por meio de leilões de energia provenientes de (i) empreendimentos de geração existente; e (ii) novos empreendimentos de geração. Esses foram intitulados como Leilões de Energia Existente (LEEs) e Leilões de Energia Nova (LENS). Os LEEs em geral são leilões de custo mais baixo, visto que sua energia provém de usinas já construídas e que estão em operação, cujos investimentos já foram amortizados, e se subdividem em Leilões de Ajuste e Leilões A-1. Já os LENS foram criados para atender a demanda crescente das distribuidoras e a energia negociada por eles vem de usinas que ainda serão construídas, e que entrarão em operação em 3 ou 5 anos após o leilão; subdividem-se em Leilões A-3 e Leilões A-5. Esse leque de leilões acaba aumentando a dificuldade no planejamento estratégico de compra de energia das distribuidoras, visto que possuem ano de suprimento e duração de contratos diferenciados, conforme descrito na Tabela 1, e cada leilão possui suas restrições particulares em relação à limites para compra de energia.

**Tabela 1 - Duração dos contratos de leilões**

Leilão	Início De Suprimento	Duração do Contrato
Ajuste	Imediato até 4 meses após a compra	Até 2 anos <sup>1</sup>
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

No caso de não atendimento da obrigação de contratação de cem por cento da sua demanda, as distribuidoras são penalizadas financeiramente. Esta regulamentação imposta é um grande desafio, visto que são necessárias estratégias para contratação de energia em meio à incerteza de sua demanda. Para minimizar esta exposição financeira, a mesma lei define um limite máximo de sobrecontratação de energia estipulado em até 5% da sua demanda, ou seja, a distribuidora não será penalizada por contratar até o limite de 5% acima do total de energia utilizada. Por outro lado, este limitante não existe em caso de subcontratação, 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).

Segundo Venerose (2013) os dois principais determinantes para o resultado de uma política de contratação ótima seriam a demanda e o PLD. Ele leva em consideração a incerteza dessas duas variáveis, tratando o problema como sendo um problema de programação estocástico linear multiestágio, mas relata que fez simplificações em algumas regras, para manter a linearidade do problema. Foi usado o algoritmo *Progressive Hedging* para a resolução do problema, que utiliza a relaxação de algumas restrições específicas para separar o problema em subproblemas correspondentes aos cenários propostos pelo autor. O autor considera a variação da duração dos contratos na contratação de energia, porém estipula que para cada modalidade as durações escolhidas serão constantes durante todo o período de estudo.

Do ponto de vista de Dias (2007) os principais riscos na estratégia de contratação estão nas penalidades e também no repasse não integral dos custos de energia elétrica aos consumidores, quando se encontram subcontratados. A minimização desses riscos se dá a partir de uma adequada previsão de demanda e uma estratégia de compra de energia em leilões, objetivando a redução das exposições advindas da subcontratação e da sobrecontratação. O autor

<sup>1</sup> Até o momento só existiram leilões de ajuste com duração de contrato de até um ano.

utiliza técnicas de Algoritmos Genéticos (AG) para encontrar uma solução para o problema, por se tratar de um método que trabalha num grande espaço de busca.

Buratti (2008), em seu trabalho, utiliza técnicas de otimização para a resolução do problema, com o auxílio de dois algoritmos evolutivos: Algoritmos Genéticos e Evolução Diferencial. O objetivo é a minimização dos custos da compra de energia e das penalizações por sobre e subcontratação. O autor relata que os mecanismos de contratação e descontração criados pela legislação tornam o problema não-linear, por causa de seus limites e suas peculiaridades. Os dois algoritmos foram submetidos a simulações considerando dois cenários: (i) pessimista, em que o preço do PLD está baixo e (ii) otimista, em que o preço do PLD se encontra alto, e os resultados das simulações se apresentaram semelhantes para os dois algoritmos.

Conforme a Figura 1, na linha de pensamento dos autores citados, neste trabalho é apresentada uma abordagem para resolução do problema de contratação de energia pelas distribuidoras, considerando-o como um problema de otimização linear, sujeito as restrições impostas pela legislação vigente. Tendo como propósito a minimização dos custos da compra de energia e das penalidades advindas dos riscos de subcontratação, sobrecontratação e do não cumprimento das regras impostas.

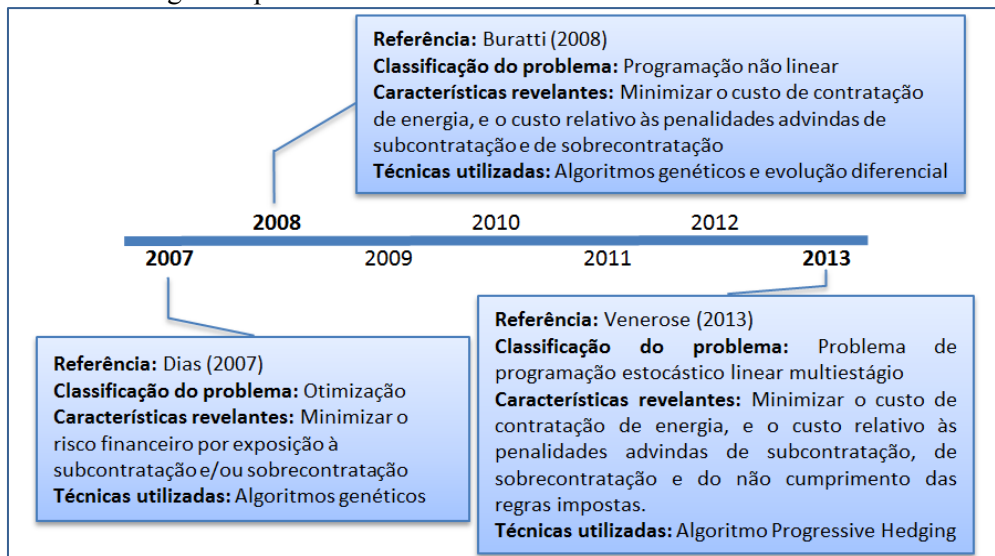


Figura 1 – Referências dispostas temporalmente.

Fonte: Os autores

A Tabela 2 retrata o planejamento estratégico de compra de energia, no qual é adotado um período de estudos de seis anos, uma vez que, nesse intervalo de tempo pode-se comprar pelo menos uma vez em cada uma das modalidades de leilões, e receber a energia comprada ainda durante o período de estudo. Pela Tabela 1, cada montante de energia recebido perdurarão durante alguns anos, sendo A-3 e A-5 os únicos que nunca terão seus contratos vencidos no intervalo de tempo proposto, logo como até o momento os leilões de ajustes tiveram durações de até um ano, a única incerteza que pode alterar a quantidade adquirida em cada leilão no planejamento estratégico são as durações dos contratos nos leilões A-1, visto que para cada ano a duração do contrato pode variar entre 1 a 15 anos.

Tabela 2 – Planejamento estratégico de compra de energia

		Compra da energia em leilões						Recebimento da energia comprada						
		Período de estudo						Período de estudo						
		0	1	2	3	4	5	0	1	2	3	4	5	
Leilões	Ajuste	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	A-1	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x
	A-3	x	x	x							x	x	x	
	A-5	x												x

Fonte: Os autores

Logo, este trabalho diferencia-se dos demais citados anteriormente por agregar a modelagem do problema as diferentes durações de contratos que podem ocorrer em leilões A-1 durante o período de estudo, o que gera um modelo mais real, obtendo uma solução melhorada para o problema de contratação de energia, considerando um planejamento estratégico num horizonte de estudo de seis anos, onde será analisado o modelo matemático proposto utilizando-se de um caso particular com valores fictícios de uma distribuidora.

A seção 2 apresenta detalhadamente a modelagem matemática do problema de otimização. Na seção 3 é descrito o estudo de caso utilizado, seguido dos resultados na seção 4. Por fim, são apresentadas as conclusões e referências bibliográficas utilizadas.

## 2. Modelagem do problema

Nessa seção são apresentados os principais componentes de um mecanismo de contratação de energia por leilões. O modelo utilizado nesse trabalho consiste na minimização dos custos advindos das quantidades, em MWh, contratadas no horizonte de estudo, e dos prejuízos decorrentes do não cumprimento das regras impostas pela legislação, levando em consideração as restrições da obrigatoriedade de contratação de cem por cento da demanda e das limitações de compra para cada tipo de leilão.

As modalidades contratuais consideradas na aquisição de montantes de energia foram: Ajuste, A-1, A-3, A-5, que são as modalidades usuais utilizadas pelas distribuidoras na contratação de energia. Os dados considerados são:  $t$ , ano do período de estudo em que foi adquirida a energia, tal que  $t = 0, 1, 2, 3, 4, 5$ ; e  $m$ , índice referente à modalidade de aquisição contratual, tal que  $m = 1, 2, 3, 4$  refere-se aos leilões de Ajuste, A-1, A-3, A-5, respectivamente. As variáveis de decisão envolvidas na descrição do modelo estão listadas a seguir:

- $x_{m,t}$ : quantidade de energia adquirida no ano  $t$  na modalidade  $m$ , em MWh por ano.
- $q_{sub_t}$ : é a quantidade de energia subcontratada no ano  $t$ , em MWh.
- $q_{sob_t}$ : é a quantidade de energia sobrecontratada no ano  $t$ , inferior ou igual a 5% da demanda, em MWh.
- $q_{sob5_t}$ : é a quantidade de energia sobrecontratada acima dos 5% da demanda, 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.
- $q_{3lim_t}$ : quantidade de energia adquirida acima do limite de 2% da carga verificada no ano "A-5", em MWh.
- $Q_t$ : montante acumulado de energia contratada durante o período de estudo, vigente no ano  $t$ , em MWh.
- $MR_t$ : representa a quantidade de energia que está vencendo no ano  $t - 1$  em relação ao ano  $t$ , desconsiderando os vencimentos de contratos dos leilões de ajuste.

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

$$\min f(x) = \left[ \lambda_1 \overbrace{(NC1 + NC2)}^{\text{custo de compra}} + \lambda_2 \overbrace{(NPsub + NPsob5 + NPen + NPa3)}^{\text{penalizações}} \right]$$

sujeito a:

Restrições de fluxos:

$$Q_t + CA_t + q_{sub_t} - q_{sob_t} - q_{sob5_t} = D_t \quad t = 0, 1, 2, 3, 4, 5 \quad (1)$$

$$0 \leq q_{sob_t} \leq 0,05 * D_t \quad t = 0, 1, 2, 3, 4, 5 \quad (2)$$

$$Q_0 = x_{1,0} \quad (3)$$

$$Q_t = Q_{t-1} + \sum_{m=1}^4 x_{m,(t-dv_m)} - \sum_{i \in I} x_{1,i} - \sum_{j \in J} x_{2,j} \quad t = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (4)$$

Restrição Ajuste:		
$x_{1,t} \leq 0,05 * (CA_t + Q_t)$	$t = 0, 1, 2, 3, 4, 5$	(5)
Restrições A-1:		
$x_{2,t} + q\_2lim_t \geq 0,96 * MR_t$	$t = 0, 1, 2, 3, 4$	(6)
$x_{2,t} \leq MR_t + 0,005 * D_t$	$t = 0, 1, 2, 3, 4$	(7)
$MR_t = \left( Q_t - \left( Q_{t+1} + \sum_{m=1}^4 x_{m,t+1-dv_m} \right) - \sum_{k \in K} x_{1,k} \right) + CA_t - (CA_{t+1} - CV_{t+1})$	$t = 0, 1, 2, 3, 4$	(8)
Restrição A-3:		
$x_{3,t} - q\_3lim_t \leq 0,02 * CV\_A5_t$	$t = 0, 1, 2$	(9)
Restrições de não-negatividade:		
$x_{m,t} \geq 0$	$m = 1,2,3,4$	$t = 0, 1, 2, 3, 4, 5$
$Q_t \geq 0$		$t = 0, 1, 2, 3, 4, 5$
$qsub_t \geq 0$		$t = 0, 1, 2, 3, 4, 5$
$qsob5_t \geq 0$		$t = 0, 1, 2, 3, 4, 5$
$MR_t \geq 0$		$t = 0, 1, 2, 3, 4$
$q\_2lim_t \geq 0$		$t = 0, 1, 2, 3, 4$
$q\_3lim_t \geq 0$		$t = 0, 1, 2$

onde:

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

$\lambda_2$  : parâmetro de ponderação das penalizações.

$NC1$  : custo normalizado do montante de energia contratada nos leilões durante o período de estudo, em R\$/IPCA<sup>2</sup>.

$NC2$  : custo normalizado do montante de energia adquirida no MCP, em R\$/IPCA.

$NPsub$  : custo normalizado da penalização por quantidade subcontratada, em R\$/IPCA.

$NPsob5$  : custo normalizado da penalização por quantidade sobrecontratada acima dos 105% da demanda, em R\$/IPCA.

$NPen$  : custo normalizado da penalização em energia nova da quantidade de energia deixada de ser adquirida em “A-1” abaixo do limite estipulado, em R\$/IPCA.

$NPa3$  : custo normalizado da penalização por quantidade comprada nos leilões A-3 acima do limite estipulado, R\$/IPCA.

$CA_t$  : montante de energia contratado acumulado antes do período de estudo, vigente no ano  $t$ , em MWh.

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

$I$  : conjunto de todos os elementos  $i$ 's que satisfazem a equação  $d_{1,i} + i = t$ , em que  $d_{1,i}$  representa a duração do contrato adquirido na modalidade 1 no ano  $i$ , e  $t$  representa o ano de cálculo de  $Q_t$ .

$J$  : conjunto de todos os elementos  $j$ 's que satisfazem a equação  $d_{2,j} + j + 1 = t$ , em que  $d_{2,j}$  representa a duração do contrato adquirido na modalidade 2 no ano  $j$ , e  $t$  representa o ano de cálculo de  $Q_t$ .

$dv_m$  : tempo de entrada em vigor de determinado contrato na modalidade  $m$ , conforme Tabela 1, consideraremos os seguintes valores, zero ano para a modalidade 1, um ano para a modalidade 2, 3 anos para a modalidade 3 e cinco anos para a modalidade 5.

$x_{m,(t-dv_m)}$  : representa o montante adquirido no ano  $t - dv_m$  na modalidade  $m$ , com início de suprimento no ano  $t$ , em MWh/ano.

$x_{1,i}$  : representa o montante adquirido na modalidade 1 no ano  $i \in I$ , que esta a vencer no final do ano  $t - 1$ , em MWh/ano.

$x_{2,j}$  : representa o montante adquirido na modalidade 2 no ano  $j \in J$ , que esta a vencer no final do ano  $t - 1$ , em MWh/ano.

<sup>2</sup> Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo.

$K$  : conjunto de todos os elementos  $k$ 's que satisfazem a equação  $d_{1,k} + k = t + 1$ , em que  $d_{1,k}$  representa a duração do contrato adquirido na modalidade 1 no ano  $k$ , e  $t$  representa o ano de cálculo de  $MR_t$ .

$x_{1,k}$  : representa o montante adquirido na modalidade 1 no ano  $k \in K$ , que esta a vencer no final do ano  $t - 1$ , em MWh/ano.

$x_{m,(t+1-dv_m)}$  : montante de energia contratado na modalidade  $m$  no ano  $t + 1 - dv_m$ , que está entrando em vigor no ano  $t + 1$ , em MWh/ano.

$CV_{t+1}$ : montante de energia contratado antes do período de estudo na modalidade  $m$ , que entra em vigor no ano  $t + 1$ , em MWh.

$CV\_A5_t$  : carga da distribuidora verificada no ano "A-5", em MWh.

## 2.1 Custos da energia contratada em leilões no horizonte de estudo

O custo da energia total contratada em leilões no horizonte de estudo se dá através do montante de energia adquirido (em MWh/ano), multiplicado pela quantidade de anos a perdurar cada contratação no horizonte de estudo, multiplicado pelo preço de compra. Vale ressaltar que como são empregados índices de correção monetária, nos contratos de LEEs como nos de LENSs, os valores monetários serão normalizados por número índice, para que seja possível a comparação entre eles, para normalizar<sup>3</sup> tais valores deve-se dividir seu respectivo preço pelo número índice do IPCA correspondente ao ano do cálculo do mesmo. Utilizando esta normalização, temos que o custo da energia contratada no período de estudo é:

$$NC1 = \sum_{m=1}^4 \sum_{t=0}^5 dh_{m,t} \cdot p_{m,t}^n \cdot x_{m,t}$$

onde:

$p_{m,t}^n$  : é o valor  $p_{m,t}$  normalizado pelo número índice do IPCA da data base do cálculo do preço, sendo que  $p_{m,t}$  é o preço da energia comprada na modalidade  $m$ , no ano  $t$ , em R\$ por MWh.

$dh_{m,t}$  : duração anual do contratado de energia adquirida no ano  $t$  na modalidade  $m$ , no horizonte de estudo.

## 2.2 Custo da energia contratada no MCP

No caso de subcontratação, em que a demanda foi maior do que a energia adquirida, segundo o Decreto nº 5.163 Art. 42, a energia faltante deverá ser adquirida no MCP a PLD. Logo o custo da energia que será adquirida MCP dar-se-á pelo produto da quantidade faltante e PLD.

$$NC2 = \sum_{t=0}^5 pld_t^n \cdot qsub_t$$

onde:

$pld_t^n$  : é o valor do  $pld_t$ , normalizado pelo número índice do IPCA da data base do cálculo do valor, sendo que  $pld_t$  é o valor anual do PLD para o ano  $t$ , em R\$/MWh.

## 2.3 Penalização por subcontratação

Em caso de subcontratação, a distribuidora além de comprar a energia faltante no MCP a PLD, será ainda penalizada, conforme é descrito na equação abaixo. Esta penalidade é composta por duas partes: (i) a concessionária poderá somente repassar para a tarifa o menor valor entre o PLD e o Valor Anual de Referência (VR), ou seja, em caso de PLD baixo ela não terá prejuízo, caso contrário, seu prejuízo será a diferença entre o montante pago a PLD e o VR; (ii) é a penalização propriamente dita que é por insuficiência de lastro, o valor a ser pago pela quantidade subcontratada será o maior valor entre o VR e o PLD.

<sup>3</sup> Esta normalização é relatada no Submódulo 6.1 Regras de Repasse dos Preços de Energia da ANEEL aprovada pela resolução normativa nº703/2016.

$$NPsub = \sum_{t=0}^5 [pld_t^n - \min\{VR_t^n, pld_t^n\} + \max\{VR_t^n, pld_t^n\}] \cdot qsub_t$$

onde:

$VR_t^n$  : é o  $VR_t$ , normalizado pelo número índice do IPCA da data base do cálculo do valor, sendo que  $VR_t$  é o VR para o ano  $t$ , em R\$/MWh.

## 2.4 Penalização por sobrecontratação acima dos 105% da demanda

No caso da distribuidora adquirir energia além dos 105% da sua demanda, ela não poderá repassar os custos dessa energia aos seus consumidores finais, mas poderá vender 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. Neste trabalho não será considerado o lucro que a distribuidora poderá auferir, visto que seu objetivo não é o lucro, e sim a minimização de prejuízos e custos. Logo o prejuízo causado na sobrecontratação será a diferença entre o valor pago pela energia e o valor de venda, que neste caso seria o valor de PLD.

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, logo optamos por simular o pior caso possível do prejuízo decorrente da sobrecontratação acima dos 105% da demanda.

$$NPsob5 = \sum_{t=0}^5 \max\{pMAX_t^n - pld_t^n, 0\} \cdot qsob5_t$$

onde:

$pMAX_t^n$  : é o valor  $pMAX_t$ , normalizado pelo número índice do IPCA da data base do cálculo do valor, sendo que  $pMAX_t$  é o preço máximo da energia que poderá ser contratada no horizonte de estudo, possivelmente vigente no ano  $t$ , em R\$/MWh.

## 2.5 Penalização por falta de repasse na energia nova

As distribuidoras são obrigadas a contratar no Leilão A-1, o limite mínimo da quantidade de 96% dos montantes de energia que estarão sendo descontratados até o final do ano “A-1”<sup>4</sup>, este montante que estará vencendo é denominado Montante de Reposição (MR), não integram o MR vencimentos de contratos celebrados por meio de leilões de ajuste.

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). No qual 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<sup>5</sup> 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, e sim um valor inferior àquele que havia sido pago. 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 no ano “A-3” e “A-5” com os contratos de maior preço.

$$NPen = 3 \sum_{t=0}^4 \max\left\{\max\left\{p_{3,(t+1)-3}^n, p_{4,(t+1)-5}^n\right\} - VRE_{t+1}^n, 0\right\} q_{2lim_t}$$

onde:

<sup>4</sup> Onde “A” é o ano-base de previsão para o início do suprimento da energia elétrica adquirida pelos agentes de distribuição por meio dos leilões.

<sup>5</sup> Para manter a linearidade do problema esse valor é considerado como sendo  $\max\left\{p_{3,(t+1)-3}^n, p_{4,(t+1)-5}^n\right\}$ .

$p_{3,(t+1)-3}^n$  : é valor  $p_{3,(t+1)-3}$ , normalizado pelo número índice do IPCA da data base do cálculo do valor, sendo que  $p_{3,(t+1)-3}$  é o preço de compra de energia na modalidade 3, para o ano  $t - 2$ , em R\$/MWh.

$p_{4,(t+1)-4}^n$  : é valor  $p_{4,(t+1)-4}$ , normalizado pelo número índice do IPCA da data base do cálculo do valor, em que  $p_{4,(t+1)-4}$  é o preço de compra de energia na modalidade 4, para o ano  $t - 3$ , em R\$/MWh.

$VRE_t^n$  : é o  $VRE_t$ , normalizado pelo número índice do IPCA da data base do cálculo do valor, sendo que  $VRE_t$  é o VRE para o ano  $t$ , em R\$/MWh.

### 2.6 Penalização por falta de repasse em A-3

A quantidade de energia comprada nos leilões A-3 acima do limite de 2% da quantidade de energia elétrica 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 elétrica proveniente de novos empreendimentos de geração realizados no ano "A - 3" e “A - 5” respectivamente, ponderados pelas respectivas quantidades adquiridas.

$$NP_{a3} = \sum_{t=0}^2 (p_{3,t}^n - \min\{VL5_t^n, VL3_t^n\}) \cdot q_{3lim_t}$$

onde:

$p_{3,t}^n$  : é o valor  $p_{3,t}$ , normalizado pelo número índice do IPCA da data base do cálculo do valor.

$VL5_t^n$  : é o valor  $VL5_t$ , normalizado pelo número índice do IPCA da data base do cálculo do valor, sendo que  $VL5_t$  é o valor médio de aquisição de energia em leilões de energia nova no ano “A-5”, ponderado pelas respectivas quantidades adquiridas para início de suprimento no ano  $t$ , em R\$/MWh.

$VL3_t^n$  : é o valor  $VL3_t$ , normalizado pelo número índice do IPCA da data base do cálculo do valor, sendo que  $VL3_t$  é o valor médio de aquisição de energia em leilões de energia nova no ano “A-3”, ponderado pelas respectivas quantidades adquiridas para início de suprimento no ano  $t$ , em R\$/MWh.

### 2.7 Restrição de balanço geral

As distribuidoras deverão garantir o atendimento de 100% do seu mercado de energia, e no caso de descumprimento sofrerão penalidades, com exceção da sobrecontratação até o limite de 5% da demanda, tal limitação é descrita pela equação (2). Logo, temos 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 como é descrito em (1). A Figura (2) esquematiza essa restrição mostrando um possível cenário de um total de cargas contratadas antes e depois do período de estudo, em relação a sua demanda.

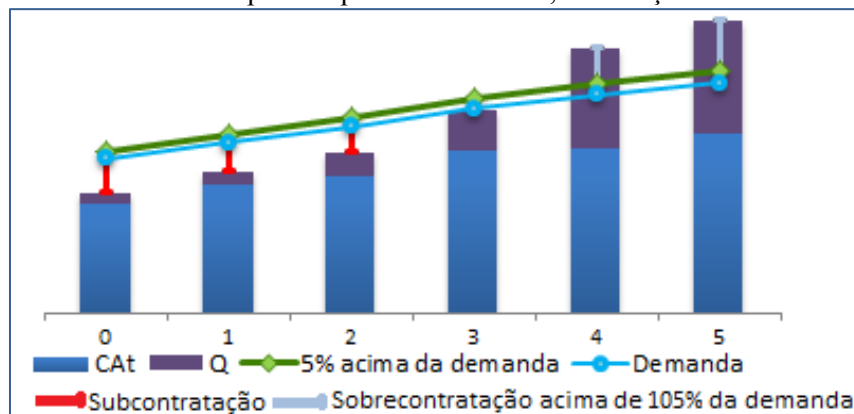


Figura 2 – Balanço geral.

Fonte: Os autores



## 2.8 Restrição para o cálculo da carga acumulada no período de estudo

Para calcular a carga acumulada adquirida durante o período de estudo, precisa-se somar as quantidades acumuladas anteriormente no ano  $t - 1$ , com as cargas que irão entrar em vigor no ano  $t$ , subtraindo dessas cargas as quantidades que irão vencer no final do ano  $t - 1$ , conforme (3) e (4).

Neste trabalho não são consideradas as quantidades que irão vencer no final do ano  $t - 1$  nas modalidades 3 e 4, visto que seu tempo de duração supera o intervalo do período de estudo, logo nunca serão descontratadas nos 6 anos de planejamento.

## 2.9 Restrição da compra na modalidade ajuste

Na modalidade ajuste, o montante total a ser contratado nesta modalidade por uma distribuidora deve ser até 5% da carga total contratada por ela, como descrito em (5).

## 2.10 Restrição do cálculo do montante de reposição (MR)

MR é a quantidade de energia que está a vencer no ano “A-1” em relação ao ano “A”, não fazem parte do MR os vencimentos de contratos de leilões de ajuste. Conforme descrito em (8), para o cálculo do MR é necessário fazer a diferença entre as cargas acumuladas no ano  $t$  e as do ano  $t+1$  retirando desta o montante que entrará em vigor em  $t+1$ . Este cálculo nos dará a quantidade de cargas que estão sendo descontratadas, logo é necessário subtrair as cargas contratadas nos leilões de ajuste que estarão a perdurar no ano  $t$ , pois não fazem parte do MR.

## 2.11 Restrição de limite inferior para a modalidade A-1

A distribuidora deverá recontratar, nos Leilões A-1, o mínimo de 96% do seu MR, sob pena de limite de repasse em energia nova, descrito na subseção 2.5, logo esta restrição pode ser representada por (6).

## 2.12 Restrição de limite superior para a modalidade A-1

A distribuidora poderá recontratar nos Leilões A-1 até o limite do seu MR, acrescido de 0,5% da carga realizada no ano “A-1”, esta restrição é representada em (7).

## 2.13 Restrição de limite de repasse em A-3

A compra de energia nos leilões A-3, é limitada a 2% da carga da distribuidora verificada no ano “A-5”, sob pena de restrição de repasse, conforme descrito em (9).

## 3. Estudo de caso

Os dados utilizados no estudo de caso neste trabalho são provenientes de uma distribuidora fictícia, conforme valores apresentados na Figura 3 e Tabela 3. O intervalo de dados está disposto entre os anos de 2010 a 2015, considerado como horizonte de estudo.

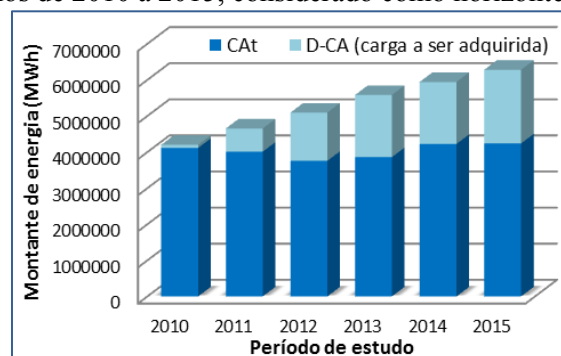


Figura 3 – Demanda necessária de energia.

Fonte: Os autores

A equação (9) limita a compra na modalidade A-3, a 2% da carga verificada no ano “A-5”, os valores dessas cargas estão dispostos na Tabela 3.

**Tabela 3 – Carga verificada no ano “A-5”**

Para utilização no ano	Carga verificada no ano “A-5” (CV A5 <sub>t</sub> )
2010	3.860.385
2011	4.226.462
2012	4.240.802

Fonte: Os autores

Os diversos preços utilizados na compra de energia e no cálculo das penalizações estão listados na Tabela 4, sendo valores reais compreendidos nos anos de 2010 a 2015, e normalizados pelo número índice do IPCA da data base do cálculo de cada um. É importante ressaltar que, durante esses anos, houve a não ocorrência de alguns leilões, por este motivo na tabela aparece “não ocorreu” em alguns lugares, ao invés do respectivo preço.

**Tabela 4 - Preços dos leilões e valores utilizados nas penalizações de energia ambos normalizados pelo número índice do IPCA**

R\$/IPCA	2010	2011	2012	2013	2014	2015
<b>Ajuste</b>	<i>não ocorreu</i>	0,029224	0,036829742	<i>não ocorreu</i>	<i>não ocorreu</i>	0,094173
<b>A-1</b>	0,032866919	0,023618	<i>não ocorreu</i>	0,043663682	0,065624894	
<b>A-3</b>	<i>não ocorreu</i>	0,030586	<i>não ocorreu</i>			
<b>A-5</b>	0,023817792					
<b>PLD</b>	0,022276032	0,008391	0,047338516	0,068330377	0,167345104	0,066176
<b>VR</b>	0,048187461	0,047311	0,044671581	0,045257963	0,029249959	0,025649
<b>VRE</b>	0,032900427	0,032867	0,023618207	0	0,043665261	0,048546
<b>VL5</b>				0	0,0275264	0
<b>VL3</b>				0,045258688	0,03052296	0,024869

Fonte: Os autores

A Tabela 5 relata as premissas adotadas em relação às durações de contrato e tempo para início de suprimento, foi designado à duração de 1 ano para todos os leilões de ajuste, visto que até o momento não existiram leilões de ajuste com duração de 2 anos. As durações dos contratos de A-1 foram baseadas nos leilões que ocorreram entre 2010 a 2014, ressaltando que em 2012 não houve a ocorrência do leilão A-1, por isso, foi designado sua duração em 2012 por zero ano.

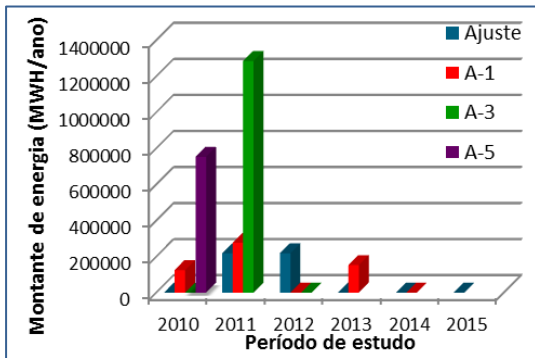
**Tabela 5 – Duração dos leilões que podem ser descontratados no período de estudo**

Leilões	Tempo para início de suprimento	Duração dos contratos
Ajuste	0 ano	1 ano (para todos os leilões realizados no período de estudo)
A-1	1 ano	3, 3, 0, 1 e 5 anos (para os leilões realizados nos anos de 2010 a 2014, respectivamente)

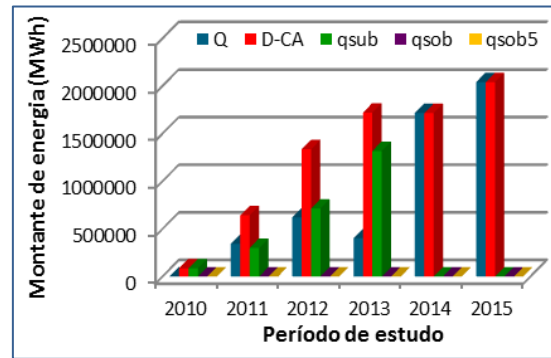
Fonte: Os autores

### 3.1. Resultados

Adotando os valores e premissas relatados, foi executado o solver e obtidos os seguintes resultados de contratação, durante os seis anos de planejamento, conforme Figuras 4 e 5.

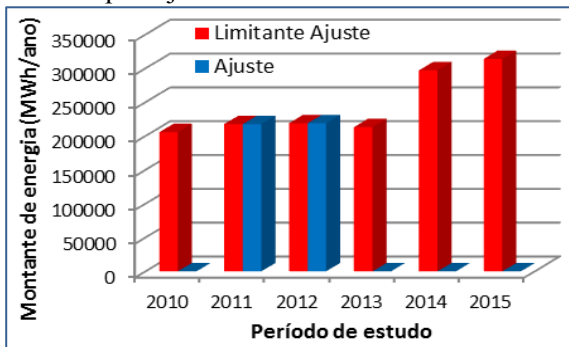


**Figura 4** - Energia contratada nos leilões por ano  
**Fonte:** Os autores

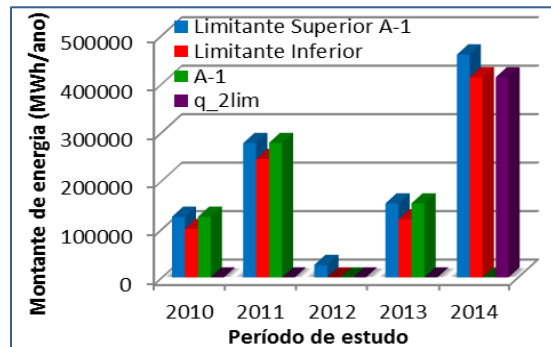


**Figura 5** – Energia adquirida versus demanda.  
**Fonte:** Os autores

Entre os anos de 2010 a 2013 a distribuidora apresenta-se subcontratada. Em 2010 a subcontratação se dá pela não ocorrência do leilão de ajuste, visto que era o único leilão em que se poderia comprar energia e receber no mesmo ano, já em 2011 temos em vigor a energia adquirida no leilão de ajuste de 2011 e leilão A-1 de 2010, porém são dois leilões que possuem limite em sua compra, conforme as Figuras 6 e 7, logo a distribuidora comprou o máximo que poderia nesses dois leilões, mas mesmo assim não conseguiu satisfazer a sua demanda. Em 2012 o mesmo ocorre, visto que a energia vigente neste ano vem somente dos leilões de ajuste de 2012, A-1 ocorridos em 2010 e 2011, que são limitados. E como em 2010 não ocorreu leilão A-3 e também em 2012 não ocorreu leilão A-1, em 2013 a distribuidora ficou subcontratada novamente, por só possuir em vigência as quantidades contratadas em A-1 de 2011 e 2010, visto que não ocorreu o leilão de ajuste em 2013, e esses montantes contratados nesses anos, foram adquiridos até o seu limite máximo, mas mesmo assim a distribuidora não conseguiu suprir sua demanda. Logo, as subcontratações ocorridas entre os anos de 2010 a 2013, se devem ao fato de um mau planejamento realizado anteriormente.



**Figura 6** – Comparação entre a quantidade comprada em ajuste e o limite máximo de compra.  
**Fonte:** Os autores



**Figura 7** – Comparação entre a quantidade comprada em A-1 e os seus limitantes.  
**Fonte:** Os autores

#### 4. Conclusões

Este artigo apresentou um modelo matemático para otimizar a estratégia de contratação de energia em leilões num horizonte de estudo de 6 anos, onde são consideradas durações de contratos em Leilões A-1 diferenciadas durante todo o período de estudo, cujo objetivo era a definição de uma política ótima de contratação, minimizando os custos de compra de energia e das penalidades advindas de sobrecontratação, subcontratação e do não cumprimento das regras impostas pela legislação.

Como se trata de um problema novo existe poucos trabalhos relacionados ao tema exposto. A comercialização de energia através de leilões envolve um grande número de regras, isso acaba sendo um grande obstáculo na reprodução para o modelo matemático, em alguns casos, foi necessário considerar por premissa o pior dos casos possíveis para manter a linearidade

do problema. O modelo matemático proposto apresentou resultados promissores, visto que captura as informações do mercado e decisões já tomadas anteriormente, retornando uma solução de menor custo.

Para se trabalhar com informações obtidas através de previsões são necessárias avaliações de diferentes cenários, devido ao número de incertezas envolvidas no problema. Na continuação deste trabalho, pretende-se refinar ainda mais o modelo matemático, levando em consideração o conceito de sazonalização, que se refere ao ato de distribuir as cargas contratadas anualmente pelos meses. Ainda será considerado o problema das durações dos contratos de leilões de ajuste, que são mensais na maioria das vezes, a ocorrência de diversos leilões da mesma modalidade em um mesmo ano e os leilões que negociam um mesmo produto com durações diferentes de contrato.

## 5. 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

Brasil. Decreto n. 5.163 de 30 de julho de 2004. 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, Brasília, DF, 30 jul. 2004.

Buratti, R. M. (2008). Estratégia de Contratação de Energia Elétrica para uma Concessionária de Distribuição. Curitiba: PUCPR, 2008. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Produção e Sistemas) – Programa de Pós-graduação em Engenharia da Produção e Sistemas, Pontifícia Universidade Católica do Paraná.

Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. Regras de Comercialização. Disponível em: [http://www.ccee.org.br/portal/faces/oquefazemos\\_menu\\_lateral/regras?\\_afzLoop=388966835677000&\\_adf.ctrl-state=jgv49gdad\\_67](http://www.ccee.org.br/portal/faces/oquefazemos_menu_lateral/regras?_afzLoop=388966835677000&_adf.ctrl-state=jgv49gdad_67). Acesso em 12/05/2016.

Dias, I. V. (2007). Estratégias de Gestão de Compra de Energia Elétrica para Distribuidoras no Brasil. Curitiba: UFPR, 2007. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

Instituto Acende Brasil (2012). Leilões no Setor Elétrico Brasileiro: Análises e Recomendações. White Paper 7, São Paulo, 52 p.

Venerose, H. D. (2013). Um Modelo de Otimização Estocástica Baseado em Progressive Hedging para Definição de Estratégia de Contratação de Energia no Ambiente Regulado. Florianópolis: UFSC, 2013. 162 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Energia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.