



**SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

GME - 06  
16 a 21 Outubro de 2005  
Curitiba - Paraná

## **GRUPO VI - GRUPO DE ESTUDO EM MERCADOS DE ENERGIA ELÉTRICA - GME**

### **ESTRATÉGIAS DE ATUAÇÃO DE AGENTES GERADORES SOB INCERTEZA EM LEILÕES DE CONTRATOS DE ENERGIA ELÉTRICA**

**Alexandre Street\*    Julio Cahuano    Sérgio Granville    José Rosenblatt    Luiz M. Thomé  
Luiz Augusto Barroso    Mario V. Pereira    Rafael Kelman    Eduardo Faria    Álvaro Veiga**

**PSR / MERCADOS DE ENERGIA / PUC-Rio**

#### **RESUMO**

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia e apresentar uma ferramenta para estratégia de oferta de agentes geradores em leilões de contratos de energia existente. Assim, para um dado gerador, deve-se determinar a quantidade ótima de energia a ser ofertada em cada contrato, para cada nível de preço corrente do leilão, de maneira a maximizar a utilidade esperada do agente. A metodologia apresentada, leva em consideração o perfil de risco de cada agente frente aos riscos relevantes associados à contratação, como por exemplo: risco de preço e quantidade (devido à correlação negativa entre geração e PLD) e o risco de redução de montante contratado (devido à opção que as distribuidoras têm de reduzir os montantes contratados em até 4% ao ano – o que é equivalente a precificar uma *put*). Com a estratégia de atuação individual de um agente gerador já desenvolvida, é então apresentada e exemplificada uma metodologia de simulação de leilões, que modela a atuação de todas as empresas participantes em um esquema competitivo, por um processo iterativo.

#### **PALAVRAS-CHAVE**

Leilões de energia elétrica, Função Utilidade, Otimização Estocástica, Programação Linear, Risco de contratação.

#### **1.0 - INTRODUÇÃO**

Desde 2002, através da Lei 10.438/2002 e do Decreto 4.562/2002, os leilões de contratos de suprimento vêm sendo o principal instrumento para compra e venda de energia elétrica no Brasil. O “novo” marco regulatório brasileiro, aprovado em março de 2004 e regulamentado pelo Decreto 5.163/2004, consolidou a orientação de contratação por leilões através de três determinações principais:

- a) Toda demanda – tanto dos consumidores livres como dos cativos – deve estar 100% contratada. Esta obrigação tem dois objetivos principais: (i) viabilizar comercialmente a entrada de novos geradores e assim garantir a expansão do sistema [1]; e (ii) garantir a segurança de suprimento – embora os contratos sejam instrumentos financeiros, eles devem ser respaldados por capacidade física efetiva (“lastro”). Se a demanda está 100% contratada, isto significa que há capacidade física de respaldo suficiente para atendê-la.
- b) As empresas geradoras federais e estaduais somente podem vender energia para consumidores livres através de “processos públicos e transparentes”. Embora os consumidores livres possam negociar diretamente as condições de seus contratos, a orientação acima, aliada ao fato de os geradores públicos corresponderem à maior parte da capacidade instalada, induz tais consumidores a realizar leilões de compra; caso contrário, os únicos participantes seriam geradores privados, o que reduziria a competição e aumentaria os preços.
- c) Leilão de contratação para distribuidoras. As distribuidoras devem participar, todos os anos, de dois tipos de leilão: contratação de energia existente – realizado anualmente, visa renovar os contratos da distribuidora que expiram no mesmo ano. A duração dos contratos é de 5 a 15 anos; contratação de energia nova – realizado anualmente, visa atender o crescimento previsto da demanda cinco e três anos à frente. Este leilão está restrito a novos empreendimentos, e são oferecidos contratos de longo prazo, para entrada em operação cinco e três anos depois. A duração do contrato e a antecedência da contratação permitem que o vencedor do leilão consiga financiamento para a construção da usina.

\* Rua Voluntários da Pátria, 45 - 1507 - CEP 22270-000 – Rio de Janeiro - RJ - BRASIL  
Tel: (21) 2539-2073 - Fax: (21) 2539-1566 - e-mail: street@mercados.com.br

Em ambos os casos, é leiloado um montante de energia correspondente ao *total* requerido pelas distribuidoras (soma das declarações de compra individuais de cada empresa). Cada gerador que vence o leilão assina contratos bilaterais separados com todas as distribuidoras.

A existência de leilões cria um desafio importante para as geradoras, que é determinar uma *estratégia de oferta* (preço e quantidade) que leve em consideração o seu “perfil de risco”, as incertezas associadas à contratação (por exemplo o risco hidrológico), o custo de oportunidade da energia e riscos inerentes aos próprios contratos (como a possibilidade de redução pelas distribuidoras do montante contratado nos leilões de energia existente em até 4% anualmente para compensar variações na demanda prevista).

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia para *estratégia de oferta* de geradoras em leilões de contratos de energia existente, que determine a quantidade ótima que deve ser ofertada de cada contrato para cada nível de preço de leilão, levando em conta os perfis de risco de cada agente e os riscos associados à contratação. A idéia básica é a determinação da curva de disposição a contratar (CDC) de cada geradora. Esta curva, representada por  $E_c(P)$ , fornece a quantidade de energia  $E_c$  que o gerador ofereceria para contratação se o preço do contrato no leilão fosse  $P$ . Por sua vez, o processo de construção da CDC tem três componentes principais: (i) cálculo da renda líquida da geradora com a modelagem das incertezas associadas; (ii) definição de uma medida de “aversão a risco” da geradora, que permita comparar de maneira consistente as opções de contratação com diferentes atributos (preço, quantidade e risco) e, (iii) definição de uma metodologia de otimização da rentabilidade, ajustada pelo perfil de risco da empresa, que permita determinar as quantidades a contratar em cada contrato oferecido no leilão, para um conjunto de preços candidatos. Neste trabalho as incertezas associadas a (i) são modeladas através de cenários, oriundos de modelos de despacho hidrotérmico e de simulação das regras de comercialização da CCEE (MRE etc). Para item (ii), este trabalho define, para cada empresa, uma função utilidade [2-4], que permite capturar a aversão ao risco dos agentes. Esta função “traduz” a distribuição de probabilidade da renda líquida em uma distribuição de “utilidade”, que é neutra em relação a risco. Isto permite que duas alternativas de contratação com diferentes distribuições de probabilidade de remuneração líquida possam ser comparadas em termos de uma única métrica de risco, o valor esperado da utilidade desta renda. Finalmente, para o item (iii), o problema é formulado como um processo de otimização estocástica, onde a função objetivo é maximizar a utilidade esperada da renda da empresa, o parâmetro de entrada é o preço do contrato  $P$  e a variável de decisão a otimizar é o montante contratado  $E_c(P)$ .

Após apresentar a metodologia e utilização da CDC por uma empresa geradora, este trabalho discute o uso das CDCs na simulação de leilões simultâneos (multi-produtos) de energia. Será apresentado um simulador de leilões e a metodologia ilustrada para o chamado “leilão de transição”, realizado em Dezembro de 2004.

## 2.0 - REMUNERAÇÃO LÍQUIDA DOS GERADORES E RISCOS ASSOCIADOS

A remuneração líquida de uma empresa geradora depende, essencialmente, dos seguintes fatores:

(a) venda de energia no mercado de curto prazo, dada pelo produto do preço de curto prazo (ou preço de liquidação de diferenças – PLD) com a energia total produzida, deduzidos os custos operativos (por exemplo, custos de combustível e O&M variáveis). Esta remuneração líquida é uma variável aleatória, pois o PLD depende das condições hidrológicas, do nível de armazenamento dos reservatórios e do balanço atual e futuro da oferta e demanda de energia, entre outros fatores;

(b) conforme discutido na literatura [1,2,4], em geral a venda de energia no mercado de curto prazo é arriscada devido à grande volatilidade e assimetria dos preços. Desta maneira, os contratos bilaterais têm sido utilizados como uma forma de proteção contra esta volatilidade e formam a segunda parcela de renda de um gerador, que é a venda de contratos de suprimento, dada pelo produto do preço do contrato ( $P$ ) pelo montante contratado ( $E_c$ ), subtraídos os custos de compra dos montantes contratados no mercado de curto prazo, cujo preço é uma variável aleatória, em função da incerteza no pagamento (“*default*” das distribuidoras). Esta é a abordagem dos chamados “contratos por quantidade”, onde o risco do suprimento está alocado ao gerador;

(c) nos contratos firmados entre geradores nos leilões de energia existente e distribuidoras, estas possuem o direito (mas não a obrigação) de reduzir o montante contratado em até 4% do seu valor inicial, em função da demanda prevista não realizada. Isto significa que o gerador vende à distribuidora uma opção de venda (*put*) de 4% do total de MWh de energia inicialmente contratados a um preço de exercício igual ao preço do contrato. Ou seja, o montante contratado  $E_c$  ganha uma componente estocástica (direito de redução do montante);

(d) a contratação multilateral nos leilões leva a assinatura de contratos entre cada gerador vencedor do leilão e todas as distribuidoras. Embora estes contratos estejam respaldados por cláusulas de garantias, pode existir a percepção do “risco de crédito” de algumas distribuidoras por parte dos geradores. Este risco pode ser encarado como uma redução do preço efetivamente pago por elas, que pode ser modelado por uma variável aleatória que engloba a composição agregada de reduções de todas as distribuidoras que estão contratadas com cada gerador. Observe que, mesmo em caso de default, a obrigação de suprimento continua sob responsabilidade do gerador.

Assim sendo, a expressão da renda líquida do gerador para um período (mês)  $t$  e uma série hidrológica  $s$  pode ser expressa, de maneira simplificada, por:

$$R_{ts} = E_c P + (G_{ts} - E_c) \pi_{ts} - G_{ts} c_t - C_t^f \quad (1)$$

Onde:

$R_{ts}$  Receita operacional líquida, em R\$ (*variável aleatória*)

$E_c$  Montante do contratado, em MWh (*variável aleatória*)

$P$  Preço do contrato, em R\$/MWh (*variável aleatória*)

$G_{ts}$  Geração alocada pelo MRE, em MWh, ou despacho de uma térmica, em MWh (*variável aleatória*)

$\pi_{ts}$	PLD (preço de curto prazo), em R\$/MWh ( <i>variável aleatória</i> )
$C_t$	Custo variável de operação no período $t$ , em R\$/MWh. (valor conhecido)
$C_t^f$	Custo fixo no período $t$ , em R\$. (valor conhecido)

Na expressão (1) denota-se em *itálico* as principais variáveis aleatórias do problema, que capturam os riscos de quantidade e preço, riscos de redução de montante contratado e risco de inadimplência das distribuidoras. A consideração destes riscos é de extrema importância para o estabelecimento da estratégia de oferta dos geradores. Por exemplo, no caso do risco hidrológico deve-se considerar que pode não valer a pena contratar todo o lastro do gerador e sim reservar um “espaço” como um *hedge* contra as hidrologias desfavoráveis.

### 2.1 Modelagem das Incertezas

A modelagem adotada neste trabalho para as incertezas ilustradas na expressão (1) é através do uso de cenários, oriundos da aplicação de uma cadeia de modelos computacionais [2,4]. Em particular:

a) cenários de PLD e de geração (térmica e/ou hidroelétrica): utilizou-se um modelo de despacho hidrotérmico<sup>1</sup>. A partir de um cenário de longo prazo de oferta e demanda de energia elétrica, o modelo calcula as funções de custo futuro do sistema hidrotérmico, levando em consideração as restrições operativas e as incertezas nas afluências. Em seguida, o modelo simula a operação do sistema, resolvendo sucessivamente o problema de despacho de um estágio para um conjunto de *cenários hidrológicos* - conjunto de vazões afluentes ao longo dos  $T$  estágios. O resultado da simulação é um conjunto de cenários de PLDs  $\{\pi_{ts}\}$ , para cada submercado, e um conjunto de produções físicas de energia para cada gerador  $\{G_{jts}\}$ , para cada cenário  $s$ , gerador  $j$  e etapa  $t$ .

b) Regras e Procedimentos de Mercado – como de conhecimento geral, as usinas hidrelétricas participam do chamado Mecanismo de Realocação de Energia (MRE), um esquema compulsório de redução de risco hidrológico. No MRE, a geração física de cada usina em cada estágio é substituída por um “crédito de energia” ( $G_{ts}$ ), que é proporcional à geração hidrelétrica total do sistema neste mesmo estágio. O fator de proporcionalidade é o “certificado de energia assegurada” da usina, que reflete sua contribuição de longo prazo para a produção do conjunto. Este crédito de energia é então utilizado no processo de contabilização do CCEE. Outro aspecto importante para as hidrelétricas é o chamado “surplus da transmissão”, um mecanismo que as protege da diferença de preços entre submercados nos casos em que a aplicação do MRE resultou em créditos fora do submercado original. Nesta etapa foram simuladas as regras do CCEE, para possibilitar a obtenção de cenários de créditos de energia e “surplus”, para cada cenário  $s$ , gerador  $j$  e etapa  $t$ . Utilizou-se o modelo SCE [4].

c) risco de redução de montante contratado: multiplica-se  $E_c$  por uma variável aleatória  $x_t$  que representa o percentual descontratado em cada etapa (até 4% do montante inicial). Este montante é obtido a partir de um modelo de simulação da estratégia de atuação das distribuidoras nos leilões de energia [6], que fornece como subproduto cenários de descontração  $\{X_{ts}\}_{s=1,\dots,S}$ . Neste trabalho estes valores foram ainda considerados, por simplificação, como independentes do PLD, o que permite sua associação direta às simulações com as séries hidrológica.<sup>2</sup>

d) o risco de inadimplência das distribuidoras pode ser modelado por uma variável  $y_t$  que engloba a composição agregada de reduções de preço de todas as distribuidoras, período a período, que estão contratadas com cada gerador. A variável  $y_t$  é independente da hidrologia e então, pode-se simular  $S$  cenários e associa-los às séries hidrológicas. A distribuição de probabilidade de  $y_t$  depende da composição agregada do *default* de todas as distribuidoras, em proporção às suas demandas declaradas. Entretanto, a inferência destas distribuições não está no escopo deste trabalho, onde é assumido que a distribuição de  $y_t$  é conhecida.

Das simulações do despacho e das regras de mercado (a e b) resultam os cenários de PLD e produção das usinas (hidros e térmicas), que somados aos demais fatores de risco (c e d) possibilitam obter os fluxos de caixa das diversas empresas. Através desses fluxos pode-se calcular as CDCs de cada um desses agentes, conforme será descrito na seção 4. Na expressão (1), todos os termos (exceto o último) são variáveis aleatórias, representadas por cenários. Isto caracteriza uma renda  $R_{ts}$  estocástica, cuja distribuição de probabilidade depende diretamente da decisão do montante  $E_c$  a ser contratado. Com isso, é necessário encontrar um critério de comparação entre diferentes fluxos estocásticos, que leve em consideração o perfil de risco de cada agente. Esta métrica de risco é discutida a seguir.

### 3.0 - MEDIDA DE AVERSÃO A RISCO: FUNÇÕES UTILIDADE

Neste trabalho o perfil de risco de cada agente é caracterizado por uma função utilidade (FU), que traduz um grau de satisfação (“unidades de utilidade”) do agente para cada possível resultado financeiro [2,3,7]. Este grau de satisfação já expressa o seu perfil de risco, traduzindo assim toda a sua preferência entre variações positivas e negativas para cada ponto da renda. A decisão no espaço de utilidades é neutra em relação ao risco, o que permite que diferentes portfólios (por exemplo, alternativas de contratação que tenham diferentes distribuições de probabilidade de remuneração) possam ser comparadas em termos de uma única métrica de risco, o valor esperado da utilidade da renda. O objetivo então passa a ser maximizar a utilidade esperada, onde a FU do agente passa a descrever sua atitude (*perfil*) frente ao risco, que pode ser de aversão, neutralidade ou propensão.

<sup>1</sup> Foi utilizado o software SDDP (que trata o problema de despacho de mínimo custo do sistema de forma individualizada por usina), ver [6]

<sup>2</sup> Observe que o exercício da put (descontração) pelas distribuidoras tende a ocorrer nos cenários onde o PLD é reduzido. A razão é que a sobre contratação (que motiva a redução de contratos) possui relação direta com a sobre oferta física (decorrente da entrada de novos equipamentos), que por sua vez é inversamente correlacionada ao PLD.

Por exemplo, um agente avesso a risco, conforme considerado neste trabalho, apresentaria uma FU côncava, como observado na Figura 1. Neste caso, a perda devida a um “mau” resultado não é “compensada” pelo ganho advindo de um “bom” resultado de mesma magnitude, descrevendo uma FU côncava: para uma variação de  $+d$  em torno do ponto  $R_0$  (representando um aumento da renda), o “ganho” da utilidade é menor, em módulo, que o decréscimo de utilidade resultante da mesma variação negativa ( $-d$ ) em torno de  $R_0$ , ou seja,  $DU^+ \leq DU^-$ . Outros perfis de risco possíveis são a neutralidade (FU linear) e a propensão ao risco (FU convexa) [2,3,7].

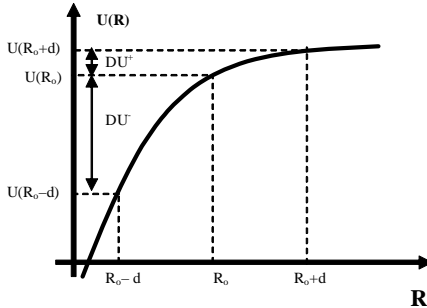


FIGURA 1 – FU côncava (aversão a risco)

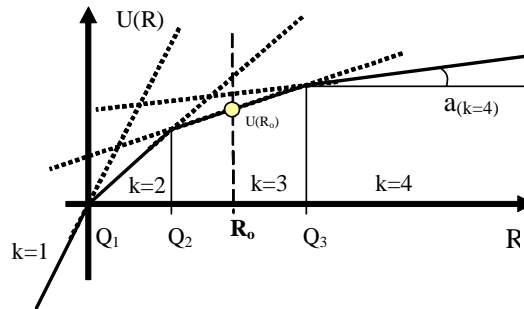


FIGURA 2 – FULP côncava (aversão a risco)

### 3.1 Representação linear por partes da Função Utilidade

Um aspecto não desejável da abordagem anterior é a representação da FU por uma função côncava não linear, como por exemplo, a função logaritmo. Buscando a representação do problema de otimização de um gerador como um problema de programação linear (PPL), pode-se definir uma função de utilidade linear por partes (FULP), que pode se aproximar de qualquer outra função côncava o quanto se queira, traçando retas tangentes a esta curva. Assim, esta função pode ser expressa através de um PPL de maximização, para o caso de um agente avesso a risco (FU côncava) e um PPL de minimização para um agente propenso ao risco (FU convexa). Para o caso de aversão a risco, a FULP pode ser expressa por:

$$U(x) = \text{Max } \delta \quad (2)$$

Sujeito a:

$$\delta \leq a_k x + b_k \quad k = 1, \dots, K \quad (2.1)$$

onde  $K$  representa o número de segmentos lineares;  $a_k$  é o coeficiente angular  $k$ -ésimo segmento,  $b_k$  é o coeficiente linear do  $k$ -ésimo segmento e  $\delta$  representa a variável que é sempre menor que todos os segmentos, representando a utilidade de  $x$ .

A Figura 2 acima ilustra uma FULP com quatro segmentos, onde cada ponto  $Q_k$  representa uma “quebra”, ou seja, uma mudança de inclinação e portanto uma mudança na taxa de crescimento de “satisfação” com a renda do agente. Nota-se que o PPL que define esta curva seleciona, para um dado ponto  $x_0$ , o segmento que fornece o menor valor no contradomínio. A Figura 2 ilustra este fato para um ponto localizado no terceiro segmento. A construção da FU de um agente está além do escopo deste trabalho e diversas abordagens para sua obtenção (a partir do coeficiente de aversão a risco, analogia ao mercado financeiro, etc) são discutidas em [2].

### 4.0 - CONSTRUÇÃO DA CURVA DE DISPOSIÇÃO A CONTRATAR (CDC)

A idéia básica da CDC é construir uma curva que determina a melhor oferta de energia a contratar  $E_c(P)$  para um dado preço do produto (contrato), isto é, aquela que maximiza a utilidade esperada da renda do gerador – expressão (1) – com esse contrato “candidato”. Esta curva reflete a disposição a contratar do gerador para cada nível de preço do contrato. Este princípio pode ser empregado para o caso dos leilões de energia mono-produto, onde geralmente são ofertados preços e quantidades ou em uma segunda modalidade, onde dado um preço corrente (definido pelo leiloeiro) de um produto, deve-se ofertar a respectiva quantidade desejada do produto.

No caso particular do leilão de “transição” de energia existente, onde foram leiloados um conjunto de contratos para entrega em anos distintos - o que o caracteriza como um leilão multi-produto - o resultado do leilão não pode ser obtido facilmente da mesma forma, pois as CDC's tornam-se superfícies multivariadas, que são definidas através de funções do espaço dos preços ( $\mathfrak{R}^N$ ) para o espaço das ofertas ( $\mathfrak{R}^N$ ), onde  $N$  é o número de produtos. Ambas as abordagens (mono e multi produto) serão discutida as seguir.

#### 4.1 Cálculo da CDC para Leilões Mono-produto

Em leilões mono-produto apenas um contrato é leilado. Neste caso, a melhor oferta  $E_c$  para um dado preço de contrato é aquela que maximiza a utilidade esperada da renda do gerador com o contrato “candidato” no seu portfólio. Isto pode ser representado, para o caso onde a FU é linear por partes - como mostrado em (2) - esse problema pode ser reescrito através do seguinte problema de programação linear (PPL):

$$E_c^*(P) = \text{argMax}_{(E_c)} \sum_{t=1}^T \left[ \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S \delta_{ts} / (1+J)^t \right] \quad (3)$$

Sujeito a:

$$\delta_{ts} \leq a_{Gk}[EcX_{ts}P + (G_{ts} - EcX_{ts}) \cdot \pi_{dts} - G_{ts} \cdot C_t - C_t^f] + b_{Gk} \quad \text{para } k=1, \dots, K, s=1, \dots, S \text{ e } t=1, \dots, T \quad (3.1)$$

$$Ec \leq E^{MAX} \quad (3.2)$$

Onde,  $a_{Gk}$  é o coeficiente angular de cada segmento (valor conhecido);  $b_{Gk}$  é o coeficiente linear de cada segmento (valor conhecido);  $\delta_s$  é a variável auxiliar que representa a utilidade da renda para a série  $s$ ;  $K$  é o número de segmentos lineares (valor conhecido);  $E^{MAX}$  é a máxima quantidade (MWh) que pode ser ofertada (valor conhecido);  $Ec$  é a variável de decisão que representa a contratação ótima em MWh;  $P$  é o preço do contrato “candidato” avaliado em R\$/MWh (valor conhecido); e  $J$  é a taxa de desconto anual, livre de risco (valor conhecido).

#### 4.2 Cálculo da CDC para Leilões Simultâneos Multi-produto

Em leilões multi-produto, diversos contratos, com preços e prazos distintos são leiloados simultaneamente. Neste caso não é possível visualizar a CDC, pois cada empresa oferta sob uma superfície contida no espaço  $(\mathbb{R}^5, \mathbb{R}^5)$ , por exemplo, no caso de 5 produtos diferentes, onde para cada vetor de cinco preços “candidatos” é mapeado um vetor de cinco ofertas ótimas resultantes que são interdependentes. Ou seja, o mesmo problema definido anteriormente em (3) é resolvido, com a importante diferença que agora a quantidade ofertada  $Ec$  é um vetor  $(Ec_1, Ec_2, \dots, Ec_5)$  que depende de  $(P_1, P_2, \dots, P_5)$  (no caso de 5 produtos).

#### 4.3 Exemplo de utilização da CDC em leilões de energia e análise de riscos associados

As CDC podem ser utilizadas por empresas geradoras para estabelecer suas estratégias de atuações nos leilões de energia. Neste caso, a CDC pode ser pré-calculada (ex-ante) para um conjunto pré-estabelecido de preços candidatos de contratos e utilizada pelo agente gerador durante o processo do leilão de acordo com os preços correntes verificados a cada rodada. Por exemplo, a **FIGURA 3** ilustra o exemplo CDC de uma empresa localizada no submercado sudeste.

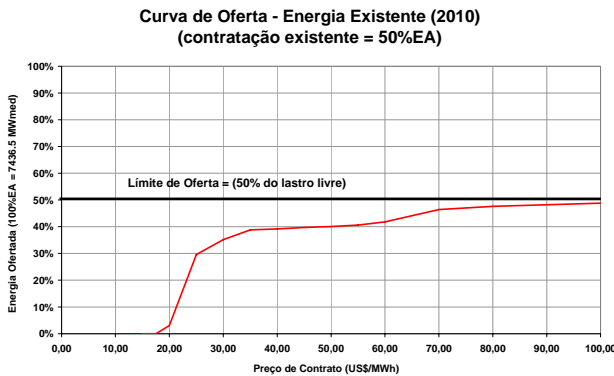


FIGURA 3 – Exemplo de CDC para um gerador de energia existente (já contratado em 50%)

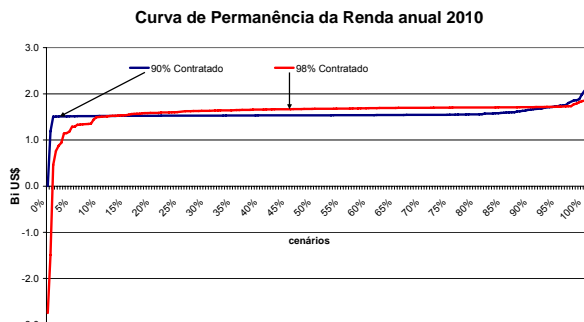


FIGURA 4 – Distribuição da Renda para dois níveis de contratação

Nesta figura, observa-se que para um preço de 36 US\$/MWh a empresa decide contratar 90% do seu lastro total, ou seja, a CDC decide ofertar os próximos 40% (uma vez que a empresa já encontra-se 50% contratada), deixando 10% do lastro total como *hedge* contra o risco hidrológico. A **FIGURA 4** mostra, para este preço, a distribuição da renda líquida da geradora para dois casos: (i) onde a geradora se contrata no montante “ótimo” decidido pela CDC; (ii) onde a geradora é “forçada” a contratar 48% do seu lastro total, deixando apenas 2% do lastro descontratado. Observa-se que a curva de distribuição é muito mais “arriscada” para o caso (ii). Um aspecto interessante é observar que o caso (i) apresenta uma renda média aproximadamente 33 MiUS\$ inferior à do (ii), entretanto o caso (ii) apresenta uma pequena probabilidade de ocorrer um grande prejuízo. Assim, devido à percepção deste risco pelo perfil do agente, o equivalente a certeza do caso (ii) é menor (cerca de 182 MiUS\$) que o do (i), demonstrando uma aversão a estes eventos “desastrosos”.

#### 5.0 - USO DA CDC NA SIMULAÇÃO DE LEILÕES DE ENERGIA EXISTENTE

Uma vez estabelecida a metodologia para determinar a disposição a contratar dos geradores para cada nível de preço, pode-se simular iterativamente o processo dos leilões bastando para isso apenas a implementação de suas regras e procedimentos. O objetivo dos leilões de compra de energia existente, onde os geradores disputam ofertando preços e quantidades ou apenas quantidades (dados os preços correntes do leilão), é obter o maior montante de energia para atender à demanda, minimizando o valor pago pelas distribuidoras.

#### 5.1 Leilões mono-produto

Para o caso mono-produto o resultado do leilão pode ser obtido através da simples composição agregada das curvas de oferta individuais. Para uma demanda total  $D$  (MWh) em um leilão de compra de preço uniforme, onde existam “ $I$ ” empresas geradoras, o preço de equilíbrio ( $P^{ed}$ ) pode ser escrito por:

$$\sum_{i=1}^I EC_i^*(P^{eq}) = D \quad (4)$$

Dado que se busca o preço único, tal que o total de oferta e demanda sejam iguais e como só existe um único produto sendo leiloado, para cada preço  $P$  só existe uma oferta total. Assim, pode-se encontrar o  $P^{eq}$  através da CDC agregada, conforme a expressão acima. Essa busca pode ser facilmente realizada traçando as curvas de oferta individuais (expressão (3)) para uma gama de preços crescentes de leilão e somando-as preço a preço, conforme a expressão (4). Assim, basta encontrar o menor preço que faça a oferta total ( $EC_i^*$ ) igual à demanda ( $D$ ).

## 5.2 Leilões multi-produto

Para o caso multi-produto, o resultado do leilão não pode ser obtido da mesma forma que o caso univariado, pois as CDC's tornam-se superfícies multivariadas. Assim, o processo do leilão deve ser simulado, a fim de se estimar o ponto de equilíbrio do mesmo: serão traçadas "trajetórias" de ofertas em função dos preços correntes, que decorrerão do processo de competição entre os agentes, até que se encontre algum ponto que atenda às condições de parada do leilão. Neste trabalho foi desenvolvido um modelo simulador de leilões, descrito a seguir.

## 6.0 - APLICAÇÃO: SIMULADOR DE LEILÕES DE ENERGIA EXISTENTE E O LEILÃO DA TRANSIÇÃO DE 2004

Neste trabalho foi desenvolvido um modelo de simulação de leilões de energia existente multi-produto utilizando, como estratégia de oferta dos geradores a cada rodada, o modelo descrito em (3) e generalizado em (6).

### 6.1 Metodologia do simulador de leilões

Em geral, os leilões multiproduto de preço uniforme utilizam o desenho "descending price clock auction" [8], que iniciam cada produto com um preço conhecido (preço inicial) e, para cada rodada, à medida que as ofertas são realizadas, o leiloeiro as contabiliza (seguindo as regras do leilão), verifica a condição de parada, e informa aos competidores os novos preços correntes da rodada seguinte e o quanto de suas respectivas ofertas foi aceita e ficará comprometida em cada produto. Assim, quando o leilão for finalizado (dependendo da regra, que em geral envolve uma condição sob os preços e sob o balanço entre oferta e demanda), os montantes que estiverem comprometidos serão liquidados aos preços correntes finais.

Em termos de modelagem, o processo do leilão pode ser visualizado na Figura 5, que ilustra o fluxo de informações que ocorre a cada rodada: o leiloeiro fornece aos geradores o vetor de preços correntes ( $P^c$ ) e o vetor energia comprometida ( $E^{co}_i$ ); os geradores calculam suas ofertas e devolvem ao leiloeiro o vetor de ofertas em função dos preços correntes ( $E^{of}_i(P^c)$ ).

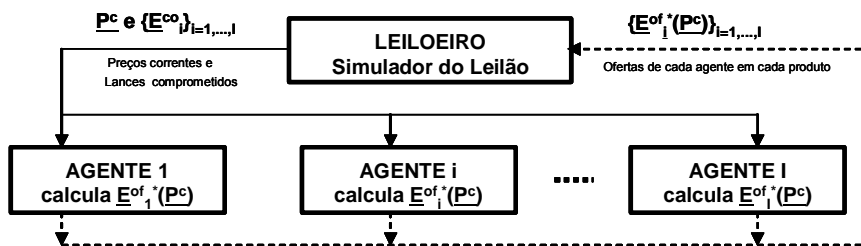


FIGURA 5 – Esquema de uma rodada em um leilão multi-produto.

### 6.1.1 Estratégia de oferta ótima a cada rodada

Considerando que a informação disponível que o agente possui a cada rodada é o "vetor" de preços correntes e os montantes comprometidos em cada produto, sua estratégia de oferta ótima será a que maximiza sua renda ajustada pelo seu perfil de risco dados o preço corrente, seu portfólio de contratos e os lances comprometidos. Para tanto, o gerador deve incorporar na expressão (1) os montantes comprometidos em produtos fechados (aos respectivos preços) e encontrar os montantes de contratos candidatos que maximizam a utilidades esperada da renda da empresa aos preços corrente observados. Então, para uma dada rodada  $r$  do leilão, a expressão da renda de uma dada geradora  $i$ , pode ser expressa por:

$$R_{irts} = \sum_{j=1}^{Npr} P_{jr}^c Y_{ts}(E_{ijrt}^{co} + Q_{ijt}^{max} E_{ijr}^{%of}) X_{ts} + [G_{its} - \sum_{j=1}^{Npr} (E_{ijrt}^{co} - Q_{ijt}^{max} E_{ijr}^{%of}) X_{ts}] \tau_{ts} - G_{its} \cdot C_{it} - C_{it}^f \quad (5)$$

Onde

$E_{ijr}^{%of}$  Variável de decisão que representa o **percentual da energia máxima** que pode ser ofertada de cada produto  $j$  por período.

$Q_{ijt}^{max}$  **Energia máxima** que pode ser ofertada por cada empresa  $i$  em cada produto  $j$  por período  $t$ , em MWh. (valor conhecido)

$P_{jr}^c$  Preço corrente do produto  $j$  na rodada  $r$ , em R\$/MWh. (valor conhecido)

$E_{ijrt}^{co}$  Energia dos lances comprometidos da empresa  $i$  no produto  $j$ , na rodada  $r$  em cada período de tempo  $t$ , em MWh. (valor conhecido)

$X_{ts}$  Fator de redução de contrato, provenientes da decisão de descontração das distribuidoras no período  $t$ , associado à série  $s$ . (valor conhecido)

$Y_{ts}$	Fator de redução do pagamento, provenientes de cenários de inadimplência das distribuidoras no período $t$ , associado à série $s$ . (valor conhecido)
$G_{its}$	Representa o total dos créditos de energia de todas as usinas da empresa $i$ , no período $t$ , série hidrológica $s$ , em MWh. (valor conhecido)
$\pi_{ts}$	PLD (preço de curto prazo) no período $t$ , série $s$ , em R\$/MWh. (valor conhecido)
$N_{pr}$	Número de produtos. (valor conhecido)

Neste caso, os diferentes produtos (contratos) têm diferentes datas de entrega, os montantes comprometidos variam por período, sendo diferentes de zero apenas para os seus respectivos intervalos de duração. Assim, o percentual de energia ofertada (variável de decisão) é multiplicado por um vetor de energia que varia por período e por produto, sendo zero para os períodos onde cada produto não é definido e assumindo um valor máximo de contratação possível para os demais períodos (já expressos em anos).

Pode-se, então, definir a estratégia ótima de oferta de cada empresa, através do seguinte PPL:

$$\{E_{ijr}^{of}\}_{j=1,\dots,N_{pr}} = \arg\text{Max } 1/S \sum_{t=1}^{TA} \sum_{s=1}^S \delta_{irts} / (1+J)^t \quad (6)$$

Sujeito a:

$$\delta_{irts} \leq a_{Gk}(R_{irts}) + b_{Gk} \quad \text{para } k=1,\dots,K, t=1,\dots,TA \text{ e } s=1,\dots,S \quad (6.1)$$

$$E_{ijr}^{of} \leq 1 \quad \text{para } j=1,\dots,N_{pr} \quad (6.2)$$

$$\sum_{j=1}^{N_{pr}} E_{ijr}^{co} + Q_{ijt}^{\max} E_{ijr}^{of} \leq EA_{it} \quad \text{para } t=1,\dots,TA \quad (6.3)$$

Onde  $R_{irts}$  é definida em (5);  $J$  é a taxa de desconto;  $\delta_{irts}$  é um vetor de variáveis de decisão auxiliares, que representam a utilidade da renda de cada empresa  $i$ , na rodada  $r$ , período  $t$  e série  $s$  (é a única variável irrestrita);  $EA_{it}$  é a energia assegurada total da empresa  $i$  em cada período  $t$ , em MWh e  $TA$  é o número de períodos.

#### 6.1.2 Aplicação – Estudo de caso Leilão de Transição (dezembro de 2004)

No leilão da transição, ocorrido em dezembro de 2004, inicialmente seriam leiloados cinco produtos simultaneamente, contratos com diferentes datas de entrega (2005 a 2009) e diferentes durações (8 e 5 anos). O Ministério de Minas e Energia optou por retirar os dois últimos produtos deste leilão (2008 e 2009), fazendo assim um leilão com apenas os 3 primeiros produtos. A expectativa dos preços dos produtos retirados (ainda desconhecidos em dezembro de 2004) afeta a disposição a contratar dos agentes no leilão e, por isso, neste trabalho, a simulação foi realizada com os cinco produtos iniciais<sup>3</sup>.

O conjunto de regras do leilão (descrito em [9]) foi implementado em um modelo computacional. Como otimizador das ofertas dos agentes em cada rodada, foi utilizada a metodologia de CDC descrita neste trabalho. Neste estudo de caso foram modeladas 12 empresas geradoras representativas do setor elétrico brasileiro. Para cada empresa, representa-se o leilão como 5 contratos “candidatos” (no próprio submercado da empresa – pois no ACR o risco de submercado é alocado às distribuidoras) cujos montantes serão otimizados (variável de decisão) e os preços são iguais aos preços correntes de cada rodada. O processo (a)-(e) descrito na seção 3 foi executado com os modelos computacionais SDDP e SCE, de propriedade da PSR Consultoria. Foram produzidos 200 cenários de: preços de curto prazo em todos os submercados, energia alocada pelo MRE em cada submercado para cada usina (individual) de cada empresa e alocação de surplus. Considerou-se também cenários de redução de montante contratado (obtidos a partir do modelo descrito em [6]) mas não foram considerados cenários de redução de pagamento devido ao risco de inadimplência (por insuficiência de dados). Com estes resultados, foi possível simular o processo de contabilização na CCEE para um horizonte de 2004-2014 e obter fluxos de caixa em etapas mensais, posteriormente agregados em base anual. Dados de contratos das empresas (para formar o portfólio existente) foram inferidos através de fontes públicas, como os disponíveis na Internet (resultado de leilões públicos), informes da ANEEL sobre as audiências públicas de revisão tarifária das distribuidoras, entre outros. O objetivo do estudo é simular a primeira fase do leilão de transição e avaliar a performance das empresas simuladas. O leilão convergiu em 66 rodadas (iterações) finalizando com o seguinte resultado:

TABELA 1– Preços (R\$/MWh) resultantes da simulação do Leilão de Transição

	Prod(2005)	Prod(2006)	Prod(2007)	Prod(2008)	Prod(2009)
Preços Iniciais*	106	106	106	106	106
Preços de Reserva*	80	90	96	100	100
Preços de Fechamento	63	71	79	100	***

\*: os preços de reserva e inicial foram inseridos pelo leiloeiro (parâmetro de entrada).

\*\*\*: significa que para este produto houve “corte total” de demanda.

Demais parâmetros considerados [9]: (i) fator de decremento: 1 R\$/MWh por produto e por rodada; (ii) fator de sobredemanda: 2%

Na FIGURA 6, a seguir, nota-se que ao longo das iterações a oferta decresce em função da redução da disposição a contratar dos agentes à medida que os preços dos produtos decrescem. Estes, por sua vez, decrescem em

Excluído

<sup>3</sup> Esta simulação foi realizada em outubro de 2004 (ver [2]), antes portanto da realização do leilão em dezembro de 2004.

função da sobre oferta de cada produto. Assim, os preços decaem em ordem cronológica - conforme esperado para um comportamento onde os agentes não tentam manipular os preços do leilão com suas estratégias (abordagem deste trabalho) e atuam de forma racional, dando preferência aos produtos que iniciam no curto prazo: os primeiros produtos recebem mais oferta e seus preços decrescem mais rapidamente que os subsequentes. No decorrer das iterações, ocorreram transferências de ofertas para os produtos cronologicamente mais a frente, à medida que os preços destes tornam-se mais significativos em relação aos demais. Com isso, os preços de fechamento do leilão formam uma “escada” expressando a “preferência” por produtos que iniciam mais cedo.

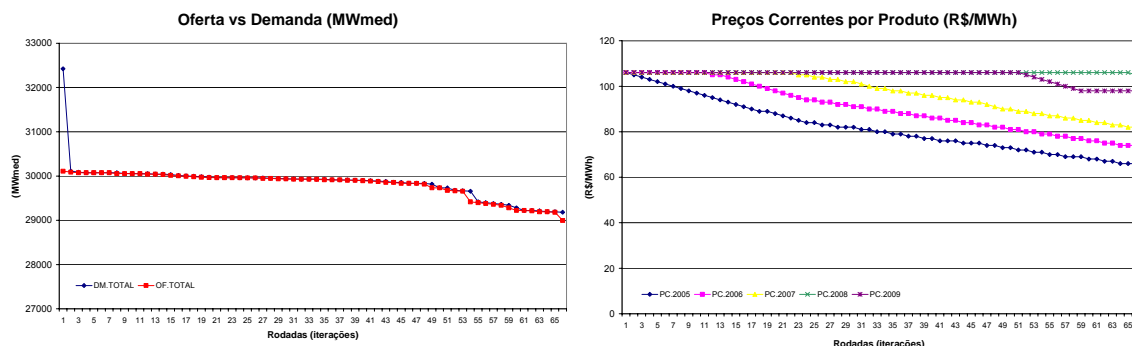


FIGURA 6 – Preços correntes e Balanço Oferta e Demanda por iteração.

Como uma das condições de encerramento do leilão é o balanço total (soma de todos os produtos) entre oferta e demanda [9], a preferência por produtos que iniciam mais cedo faz com que os preços sejam reduzidos a valores nos limites da disposição a contratar dos geradores, que reduziu a oferta total (retirou oferta do leilão) durante as iterações finais. Com isso, o balanço total de energia tornou-se negativo, condição para ocorrer [9] “redução de demanda” (no simulador esta redução ocorre do produto final para o inicial). Assim, a demanda do produto 2009 foi “zerada” e o produto “extinto” do leilão. A segunda condição de parada (preços correntes menores ou iguais aos respectivos preços de reserva) foi atendida quando o preço do produto 2008 atingiu o seu preço de reserva. Como os preços de reserva são parâmetros definidos pelo leiloeiro e não revelados aos competidores, nesta simulação, o preço de 100 R\$/MWh pode representar uma expectativa de preço para o ano 2008 e os demais preços (de 2005 a 2007) a “real” disposição a contratar dos agentes competindo entre si, dada essa expectativa.

## 7.0 - CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma metodologia para estratégia de oferta de agentes geradores em leilões de contratos de energia existente. A metodologia apresentada leva em consideração o perfil de risco de cada agente frente aos riscos relevantes associados à contratação, como por exemplo o risco de preço e quantidade (“risco hidrológico”) e o risco de redução de montante contratado (devido à opção que as distribuidoras têm de reduzir os montantes contratados em até 4% ao ano). Com a estratégia de atuação individual de um agente gerador já desenvolvida, apresentou-se uma ferramenta de simulação de leilões que modela a atuação de todas as empresas participantes em um esquema competitivo por um processo iterativo. Um estudo de caso foi apresentado para o “leilão da transição”, ocorrido em dezembro de 2004. Através do conjunto de resultados do simulador do leilão, como por exemplo, preços de cada produto por iteração, oferta vs demanda total e balanço final entre oferta e demanda por produto, foi possível verificar a disposição a contratar de cada agente em um ambiente competitivo. Além disso, pode-se fazer uma estimativa dos preços finais da primeira fase. Esta metodologia pode ser utilizada pelas geradoras para desenhar suas estratégias de oferta, assim como para desenhar os leilões (estimular a competição e o “price disclosure”), monitorar distorções (poder de mercado) e simular o efeito de medidas mitigatórias.

## 8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) M. Pereira, L. A. Barroso and J. Rosenblatt “Supply adequacy in the Brazilian power market” Proceedings of the IEEE General Meeting, Denver, 2004 – Disponível em <http://www.psr-inc.com>.
- (2) A. Street, Tese de Mestrado, “Estratégia de oferta de geradores em leilões de contratação de energia elétrica”, Departamento de Engenharia Elétrica, Puc-Rio, novembro de 2004.
- (3) J. Pratt, “Risk Aversion in the Small and in the Large”, *Econometrica*, v.32, n.1-2, pp.122-130
- (4) S.Granville, R.Kelman, L.A.Barroso, R.Chabar, M.V. Pereira, P. Lino, P. Xavier e I. Capanema, “Um Sistema Integrado para Gerenciamento de Riscos em Mercados de Energia Elétrica”, XVII SNPTEE, Uberlândia, 2003.
- (5) S. Granville, G.C. Oliveira, L.M Thomé, N. Campodónico, M. Latorre, M.V.Pereira, e L.A. Barroso, “Stochastic optimization of transmission constrained and large scale Hydrothermal Systems in a Competitive Framework”, Proceedings of the IEEE General Meeting, Toronto, 2003 – Disponível em <http://www.psr-inc.com>.
- (6) A. Resende, M.V.Pereira, J.Rosenblatt, R.Kelman, L.A.Barroso e E.Faria, “Estratégia de Contratação das Distribuidoras Sob Incerteza de Demanda em Leilões de Energia”, XVIII SNPTEE, Curitiba, 2005.
- (7) P. A. M-S. David, “Formação do Preço, Atração de Investimentos e Gerenciamento de Risco no Mercado Brasileiro de Energia Elétrica” Tese de Doutorado, Puc-Rio, 2004.
- (8) P.Klemperer, “Auctions: Theory and Practice”. Oxford University Press, 2003
- (9) Portaria 231 do Ministério de Minas e Energia, Setembro de 2004.