



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

FI/GCR/15  
18 a 21 de Outubro de 2015  
Foz do Iguaçu - PR

**GRUPO – VI**

**GRUPO DE ESTUDO DE COMERCIALIZAÇÃO, ECONOMIA E REGULAÇÃO DE ENERGIA - GCR**

**METODOLOGIA PARA A OTIMIZAÇÃO DA CONTRATAÇÃO EM LEILÕES DE ENERGIA ELÉTRICA  
CONSIDERANDO CENÁRIOS DE CARGA**

**Débora C.  
Marcilio (\*)**  
Institutos Lactec

**Ana Paula  
Oening**  
Institutos Lactec

**Daniel H. M.  
Detzel**  
Institutos Lactec

**Lúcio de  
Medeiros**  
Institutos Lactec

**Antony M.R.  
Leitão**  
EDPI

**RESUMO**

O suprimento de energia aos consumidores regulados é gerido pela CCEE por meio de leilões que definem os contratos entre geradores e distribuidoras. Essa legislação trouxe grandes desafios para as distribuidoras, visto que elas precisam estabelecer suas contratações em meio à incerteza da demanda. O sistema em vigor é composto por regras e qualquer violação, implica em penalizações a serem pagas ao PLD, pela concessionária, o qual é conhecido por sua volatilidade. Portanto, propõe-se uma metodologia envolvendo a modelagem do problema de otimização de contratos sem a consideração de valores e consideração de cenários de carga. Foi desenvolvido um otimizador.

**PALAVRAS-CHAVE**

Leilões de Energia, Comercialização, Otimização, PSO, Programação Matemática

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Com o intuito de alcançar a modicidade tarifária, em 2004 foi estabelecido um novo modelo de contratação de energia elétrica do Setor Elétrico Brasileiro (SEB). Ano em que foram criadas a Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE) e a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) através das respectivas Leis nº 10.847 e nº 10.848. A nova regulamentação é pautada em um modelo de expansão baseado em um mercado regulado, priorizando contratações de longo prazo, antecedência na contratação e forte sinal regulatório para a correta projeção da demanda. Previamente a esse marco regulatório, as distribuidoras de energia eram responsáveis pelo atendimento de suas respectivas áreas de concessão. Consequentemente, a viabilização de projetos que garantiam a expansão do sistema gerador (denominados projetos estruturantes) ficou prejudicada, pois dependiam de contratos de longo prazo que as distribuidoras evitavam firmar devido aos preços pouco atrativos (1). Dessa maneira, a solução encontrada foi a adoção de um ambiente de comercialização tipo *pool* centralizado na CCEE, que passou a ser responsável pela definição de preços, intermediação de contratos e operação dos leilões. As premissas para composição de cada leilão são elaboradas em conjunto com a EPE, na intenção de viabilizar projetos condizentes com o planejamento da expansão do SEB.

Assim, o mercado brasileiro de energia elétrica é segmentado em dois Ambientes de Contratação: Livre e Regulado. O Ambiente de Contratação Livre (ACL) é onde se realiza as operações comerciais entre consumidores, denominados como livres ou especiais, produtores independentes, autoprodutores, importadores, e exportadores de energia. Nesse ambiente a negociação é feita livremente entre compradores e vendedores. A comercialização de energia para os consumidores cativos, que são representados pela distribuidora local, acontecem no Ambiente de Contratação Regulada (ACR). A comercialização de energia nesse ambiente é realizada através de leilões, onde todos os aspectos dos contratos dependem do tipo de leilão.

A dinâmica dos leilões de compra de energia faz com que as distribuidoras se agrupem por necessidade de contratação e os geradores compitam pela menor tarifa, tendo como objetivo o atendimento da demanda a ser contratada. As distribuidoras têm que declarar, para compra nos leilões, a carga necessária para o atendimento ao

(\*) Rodovia BR-116, km 98 nº 8813– CEP 81.531-980 Curitiba, PR – Brasil  
Tel: (+55 41) 3361-6178 – Email: debora@lactec.org.br

seu mercado cativo. Com o objetivo de garantir preços adequados e um ambiente propício para a expansão da oferta de energia, na comercialização de energia no ACR, a energia ofertada advinda de novos empreendimentos recebe a classificação de energia nova (empreendimento que não possui o termo de outorga até a data do início do leilão) ou energia existente (empreendimento que possui o termo de outorga até a data do início do leilão) (1).

Os leilões destinados à compra de energia nova resultam em contratos com durações mais longas e uma maior antecedência para o início do fornecimento. São conhecidos por leilão A-3 (oferece energia para três anos à frente) e leilão A-5 (oferece energia para cinco anos à frente). Diferentemente, os leilões de energia existente são realizados com uma antecedência menor em relação à data de entrega e com prazos de duração menores também. Recebem a denominação leilão A-1 (o início do suprimento ocorre no ano seguinte ao do leilão) e leilão A-0 ou leilão de Ajuste (onde o fornecimento de energia começa no mesmo ano do leilão).

Dentre outras peculiaridades, as principais regras a serem seguidas pelos agentes de distribuição de energia no atual modelo são (1): (i) todos os consumidores, cativos ou livres, devem estar completamente atendidos; (ii) os contratos, que garantem o atendimento à demanda requerido pela primeira regra, devem ser celebrados em termos de certificados de energia firme; (iii) os contratos para consumidores cativos deverão ser, obrigatoriamente, de longo prazo, enquanto que consumidores livres têm liberdade de negociar contratos bilaterais diretamente com geradores. Violações às regras mencionadas são passíveis de punições aos agentes. Além dos mencionados, o governo pode promover outros tipos de leilões mais específicos, denominados Leilão de Energia Alternativa, Leilão de Projetos Estruturantes e Leilão de Energia de Reserva, na intenção de instigar projetos especiais (como a usina de Belo Monte, por exemplo) ou tecnologias distintas à tradicional geração de cunho hidrotérmico (2).

Do ponto de vista das distribuidoras de energia, os maiores riscos envolvidos advêm de erros na estimação de sua demanda e, consequentemente, das punições incidentes em casos de violação da regra (i) anteriormente mencionada. Barros *et al.* (1) argumenta que as empresas precisam tomar duas decisões importantes com relação à contratação de energia: o quanto ela deverá requisitar em cada tipo leilão e como distribuir a energia contratada nos meses subsequentes ao certame, visto que a comprovação do atendimento à demanda é realizada em base mensal pela CCEE (1) (3). Os montantes de energia resultantes entre o contratado e o verificado pela Câmara são apurados e estão sujeitos ao Preço de Liquidação das Diferenças (PLD), calculado pela própria CCEE. De forma simplificada, na hipótese de sobrecontratação (montante de energia contratada é superior à demanda) a distribuidora arca com a perda da receita usada na compra da energia não distribuída, podendo, no entanto, vender o excedente pelo PLD. Caso ocorra subcontratação (montante de energia contratada é inferior à demanda), a distribuidora é obrigada a recorrer ao mercado de curto prazo para suprir o déficit, estando sujeita a um mínimo entre o PLD e o Valor de Referência (VR), este último calculado pela ANEEL com base nos preços finais dos últimos leilões A-5 e A-3. Além disso, a distribuidora é também obrigada a pagar uma multa determinada a partir do máximo entre o PLD e o VR (4). Além das características já expostas o mecanismo de contratação de energia via leilão público envolve variáveis de incerteza, como por exemplo, preço dos leilões para cada modalidade, PLD e VR, tornando o problema de otimização da contratação em leilões um problema de difícil solução. A consideração dessas variáveis, conforme a regulamentação e descrito em (4) agregaria um nível significativo de insegurança ao problema, dessa maneira, com o objetivo de contornar mais essa dificuldade associada ao problema, a proposta desta metodologia é de não considerar os valores monetários vinculados a compra de energia e a penalização por não cumprir a regulamentação.

Portanto, a proposta descrita nesse artigo é apresentar um modelo que minimize as quantidades contratadas e penalizadas, em MW, envolvidas na aquisição de energia em leilões, levando-se em consideração as restrições de balanço contratual, limitação de compra para cada tipo de leilão, subcontratação e sobrecontratação. Para considerar as incertezas relacionadas à demanda prevista para a área de concessão da distribuidora para o período de planejamento, são considerados dois cenários de carga, gerados a partir de métodos clássicos de previsão e a utilização de variáveis exógenas.

Para realizar a otimização do problema, conforme proposto, foi implementado um otimizador híbrido entre os métodos Particle Swarm Optimization (PSO) e o Algoritmo de Migração Auto-Organizável (SOMA). Métodos consagrados na literatura pelo desempenho computacional e que responderam satisfatoriamente aos testes realizados, com tempo computacional baixo e atendendo as expectativas quanto à realidade.

O restante do artigo é dividido da seguinte maneira: a seção 2 apresenta o modelo matemático adotado para o problema de contratação e a seção 3 descreve os métodos de otimização utilizados. Na seção 5 é apresentado um estudo de caso, com dados fornecidos pela Eletrobrás Distribuição Piauí, com o intuito de validar a metodologia desenvolvida. Por fim, são apresentadas as conclusões.

## 2.0 - METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DA CONTRATAÇÃO DE ENERGIA ELETRICA POR MEIO DE LEILÕES

A metodologia desenvolvida tem sua essência centrada em três grupos de atividades: (i) previsão das séries de carga, (ii) inclusão de cenários de mercado nas previsões e (iii) otimização dos montantes a serem contratados em

leilões de energia elétrica. A FIGURA 1 esquematiza a metodologia proposta, com destaque aos grupos de atividades mencionados.

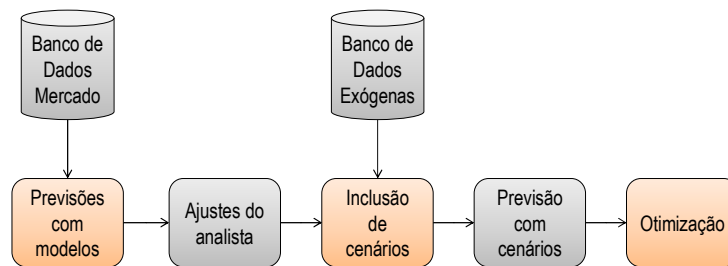


FIGURA 1– Esquema da metodologia proposta. As caixas com destaque em cores se referem às atividades centrais

As informações de mercado para a realização das previsões são fornecidas pela EDPI e referem-se à carga global histórica, além outras informações relevantes. São empregados quatro modelos de previsão (Regressão Linear Simples, Regressão Logística, Amortecimento Exponencial e Box & Jenkins), cujos resultados sofrerão intervenção do analista, caso este julgue necessário. Séries de variáveis exógenas relevantes ao mercado da EDPI são utilizadas para a incorporação de cenários à previsão. Ao final, ter-se-ão cenários pessimistas e otimistas para cada previsão e estas séries são, finalmente, submetidas à metodologia de otimização.

Uma das penalidades mais preocupante, é a que se refere ao não atendimento da demanda sob a área de concessão da distribuidora. Para a consideração dessa restrição é necessário a previsão de carga para o período de planejamento considerado na otimização. Com a consideração de dois cenários de carga pretende-se não ter apenas montantes de contratação para um única curva prevista de carga e sim para uma faixa de possibilidades de ocorrências, onde a resposta do otimizador são quantidades a serem contratadas em cada modalidade de leilões. Ou seja, o modelo matemático considerando cenários tem como objetivo minimizar a penalidade incidente nos cenários previstos, portanto o resultado da otimização tem a menor penalidade para o caso de ocorrência de um dos dois cenários.

O problema de otimização da contratação de energia elétrica por meio de leilões públicos, tem características de um problema estocástico, pois envolve variáveis de incerteza, dentre as variáveis pode-se citar o PLD e a própria carga futura da concessionária. Segundo definição, o PLD é determinado semanalmente para cada patamar de carga, limitado por preço máximo e mínimo, vigentes para cada período de apuração e submercado (13). O comportamento dos preços vinculados à energia elétrica no curto prazo no Brasil é especialmente incerto, pois não segue um equilíbrio de mercado entre a oferta e a demanda e sim é determinado a partir de um modelo computacional.

A consideração de todas essas variantes torna o problema de difícil solução, além de agregar um nível significativo de incerteza. Dessa maneira, a proposta dessa pesquisa é minimizar os montantes de energia envolvidos nas penalizações, ou seja, minimizar a quantidade de energia subcontratada e sobcontratada, a quantidade de energia proveniente do A-1 que precisa ser comprada para atingir o limite regulatório e a quantidade de energia proveniente do A-3 que excede o limite regulatório. Também se tem como objetivo a minimização do montante de energia provenientes dos leilões de ajuste e A-1, dando prioridade à contratação de energia nova vinculada aos leilões A-3 e A-5.

A seguir é apresentada uma descrição sucinta da modelagem matemática do problema, a qual atende a legislação vigente e necessidades computacionais.

O modelo utilizado nessa pesquisa consiste na minimização das quantidades em *MWh* contratadas e penalizadas envolvidas na aquisição de energia em leilões, levando em consideração as restrições de balanço contratual e de limitação 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.

Dados  $t$ , índice referente ao período de tempo em anos, que o contrato entra em vigor, tal que  $t = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ ; e  $i$ , índice referente à modalidade de aquisição contratual, onde  $i = 1, 2, 3, 4$  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:

- $q_{i,t}$  montante de energia contratada na modalidade  $i$  no ACR, que será suprida no período  $t$ , em *MWm*;
- $q_{sub,t}$  subcontratação de energia no período  $t$ , em *MWm*;
- $q_{sob5,t}$  sobrecontratação de energia no intervalo acima de 105% da carga no período  $t$ , em *MWm*;
- $q_{en,t}$  montante de energia proveniente do A-1 que precisa ser comprada para atingir o limite regulatório no período  $t$ , em *MWm*;

- $qa3_t$  montante de energia proveniente do A-3 que excede o limite regulatório no período  $t$ , em  $MWm$ ;

O modelo matemático de otimização pode ser escrito como:

$$\begin{aligned}
 &\text{minimizar} \quad \sum_{t=1}^6 P_1 q_{1,t} + P_2 q_{2,t} + P_3 q_{3,t} + P_4 q_{4,t} + P_5 q_{sub,t} + P_6 q_{sob5,t} + P_7 q_{en,t} + P_8 qa3_t \quad (\text{Erro! Indicador não definido.}) \\
 &\text{sujeito à} \quad \sum_{i=1}^4 q_{i,t} + q_{sub,t} - q_{sob5,t} = d_t - CA_t - Q_t, \quad t = 1, \dots, 6 \quad (\text{Erro! Indicador não definido.}) \\
 &\quad \quad \quad q_{1,t} \leq 0,01 [CA_t + Q_t] \quad t = 1, \dots, 6 \quad (\text{Erro! Indicador não definido.}) \\
 &\quad \quad \quad q_{2,t-1} + q_{en,t} \geq 0,96 mr_{t-1} \quad t = 3, \dots, 6 \quad (\text{Erro! Indicador não definido.}) \\
 &\quad \quad \quad q_{2,t} \leq mr_t + 0,005d_t \quad t = 2, \dots, 6 \quad (\text{Erro! Indicador não definido.}) \\
 &\quad \quad \quad q_{3,t} - qa3_t \leq 0,02D_{t-5} \quad t = 4, \dots, 6 \quad (\text{Erro! Indicador não definido.}) \\
 &\quad \quad \quad 0 \leq q_{1,t} \\
 &\quad \quad \quad 0 \leq q_{2,t} \\
 &\quad \quad \quad 0 \leq q_{3,t} \\
 &\quad \quad \quad 0 \leq q_{4,t} \\
 &\quad \quad \quad 0 \leq q_{sub,t} \quad (\text{Erro! Indicador não definido.}) \\
 &\quad \quad \quad 0 \leq q_{sob5,t} \\
 &\quad \quad \quad 0 \leq q_{sob5,t} \leq 0,05d_t \\
 &\quad \quad \quad 0 \leq q_{en,t} \\
 &\quad \quad \quad 0 \leq qa3_t
 \end{aligned}$$

A restrição de balanço contratual define que a soma dos contratos vigentes mais os desvios (penalidades) devem ser iguais à carga prevista para o período, como representado pela equação (2). Onde  $CA_t$  representa o montante de contratos anteriores, adquiridos antes do horizonte de estudo, via leilões ou de outras formas, por exemplo, bilateral, Itaipu, etc. no período  $t$ , em  $MWm$ ,  $d_t$  é a energia prevista para o mercado da concessionária no período  $t$ , em  $MWm$  e  $Q_t$  é o montante acumulado nos leilões de Ajuste, A-1, A-3 e A-5 vigentes no período  $t$ , em  $MWm$ .

A inequação (3) representa a limitação na contratação de energia na modalidade Ajuste, ou seja a compra é limitada a 1% do total de contratos vigentes no período  $t$ . A distribuidora deve recontratar no mínimo 96% do seu montante de reposição (MR) no A-1, senão será penalizada na forma de limitação de repasse do montante de energia nova equivalente ao montante que deixou de ser recompra-da, conforme (4) e (5).

A aquisição de energia nova na modalidade A-3 é restrita a carga realizada pela concessionária, para o ano em que ocorreu a modalidade A-5 dos leilões. Exemplificando, no ano 3, a concessionária pode comprar na modalidade de leilão A-3, 2% da carga realizada no ano 1, ano que ocorreu leilão na modalidade A-5, essa restrição está representada em (6). E as limitações das variáveis (não negatividade) estão representadas pelo conjunto de restrições (7).

A função (1) tem como objetivo minimizar as penalidades envolvidas nos leilões de energia e a quantidade de energia proveniente das modalidades Ajuste e A-1. Priorizando a contratação de energia nova nas modalidades A-3 e A-5. Ressaltando a substituição de valores monetários envolvidos na penalização e na compra de energia por pesos,  $P_j$ , com  $j = 1, \dots, 8$  representam os pesos utilizados na ponderação dos objetivos. Essa ponderação é realizada pelo analista de acordo com sua expertise.

A formulação do modelo matemático descrito em (1) a (7) sofreu readequações para receber os cenários otimista e pessimista e adaptações necessárias para a implementação do método híbrido de otimização. As adequações consistem, basicamente, na consideração das variáveis referentes às penalidades de subcontratação e sobcontratação para ambos os cenários. E as adaptações são somente a reescrita das restrições em um formato matemático diferente do descrito por equações em (1) a (7).

### 3.0 - OTIMIZADOR HÍBRIDO

O primeiro passo para a otimização de processos é a modelagem do problema, que consiste na identificação das principais características e objetivos a serem alcançados. Em seguida são escolhidos métodos que atendam as necessidades do modelo de otimização idealizado. Como mencionado anteriormente, para uma modelagem fiel do problema de contratação de energia através de leilões seria necessário a consideração de valores monetários, tais como PLD, preços praticados nos leilões e valores de referências. Para evitar mais essas incertezas agregadas ao modelo, foi implementada uma versão onde os valores monetários são substituídos por pesos. Essa alternativa não elimina completamente a incerteza, porém dá flexibilidade para o analista dosar as prioridades vinculadas a esse tipo de transação. Portanto, fica a cargo do tomador de decisão calibrar os pesos considerados no problema de otimização

Para a otimização da contratação considerando cenários foi desenvolvido um otimizador híbrido. Um método híbrido é uma abordagem que utiliza dois ou mais métodos para resolver o problema considerado. O otimizador híbrido entre os métodos SOMA e DPSO alia vantagens desses dois algoritmos de otimização. Esta metodologia, apesar de simples, pode melhorar consideravelmente a resposta encontrada. Pode-se comparar um otimizador híbrido a um compósito, onde materiais com propriedades mecânicas distintas se combinam para gerar um material final com propriedades únicas ou combinadas. Uma forma simples e eficiente de estruturar um otimizador híbrido é a determinação de um otimizador de inicialização e um de finalização. O papel do primeiro otimizador, como o nome já diz, é iniciar o processo de otimização do problema a partir de soluções iniciais aleatórias. Quanto ao finalizador, utiliza a melhor solução encontrada pelo inicializador como parâmetro inicial de busca. Uma estrutura que garante diminuição do desvio padrão apresentado entre o conjunto de soluções encontradas para um mesmo *set* de entrada, além de, em média, diminuir consideravelmente o valor da função objetivo, é a utilização do algoritmo SOMA como o otimizador inicializador e o algoritmo DPSO como o otimizador finalizador. Esta melhoria é proveniente da boa capacidade exploratória global do SOMA e pela capacidade exploratória cognitiva e rápida convergência do DPSO.

A seguir, serão descritos a modelagem do problema de otimização de contratação de energia através de leilões considerando cenários e os métodos utilizados na otimização: DPSO e o SOMA.

### 3.1 Otimização por Enxame de Partículas (PSO)

A otimização por Enxame de Partículas, do inglês *Particle Swarm Optimization* (PSO), é um algoritmo da área da inteligência de enxames (*Swarm Intelligence*) inspirado no voo coletivo de pássaros e em cardume de peixes. O princípio básico de seu funcionamento se deve a interatividade social entre os indivíduos do enxame, decisões singulares e presença de memória. Cada indivíduo do grupo, chamado de partícula, lembra-se da melhor posição já encontrada por si e da melhor posição encontrada pelo enxame, conforme fluxograma na FIGURA 2.

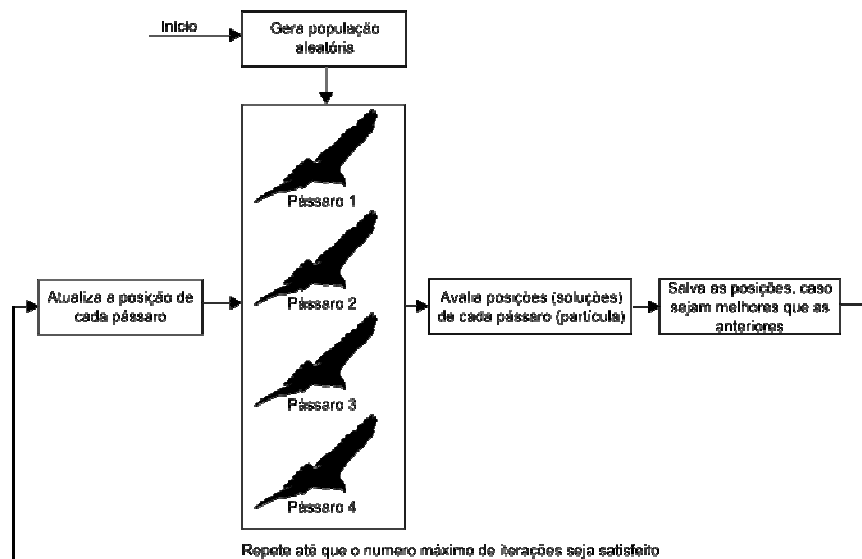


FIGURA 2– Fluxograma de funcionamento do método PSO

O algoritmo PSO tem recebido grande atenção na última década devido a sua fácil implementação, custo computacional reduzido e bom desempenho. Muitas modificações têm sido propostas nos últimos anos, como por exemplo, o PSO dinâmico (DPSO), que se diferencia por conter parâmetros variáveis. No DPSO, o parâmetro de inércia, a constante cognitiva e a constante de sociabilidade variam no tempo linearmente. A priori, são definidos os valores iniciais dos parâmetros, e estes vão decaindo (ou incrementando) ao decorrer das iterações do algoritmo. Mais detalhes sobre otimização por Enxame de Partículas estão disponíveis em (6), (7), (8), (9) e (10).

### 3.2 Algoritmo de Migração Auto-Organizável (SOMA)

O Algoritmo de Migração Auto-Organizável, do inglês *Self-Organizing Migrating Algorithm* (SOMA), é um novo algoritmo estocástico do âmbito de otimização. É baseado em procura cooperativa, onde todos os indivíduos da população movem-se em direção a um líder, ou seja, aquele que até o momento experimentou a melhor solução.

O método SOMA necessita de um tempo maior de execução do que o DPSO, porém, é menos suscetível ao problema de multidimensionalidade. Ou seja, conforme cresce o número de variáveis, cresce a dimensão do modelo e, por consequência, o tempo computacional necessário para se otimizar o problema.

A FIGURA 3 contém o fluxograma de funcionamento do algoritmo de Migração Auto-Organizável. Mais informação sobre o método SOMA ou sobre variantes existentes estão disponíveis em (11) e (12).

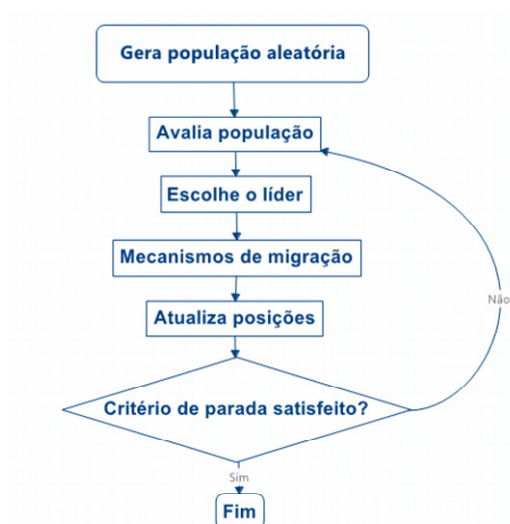


FIGURA 3– Fluxograma de funcionamento do método SOMA

#### 4.0 - ESTUDO DE CASO

A metodologia foi validada com auxílio de estudo de casos, onde os dados foram fornecidos pela EDPI, e os resultados apresentados aqui foram utilizados dados baseados em dados reais da distribuidora. Para a montagem dos cenários, fez-se a escolha da previsão de carga global obtida pelo modelo ARIMA como previsão de referência, por ser a que gerou o menor erro para um período de validação considerado. A incorporação de cenários nas previsões globais é feita com auxílio de variáveis exógenas. De todas as variáveis testadas, a que obteve o melhor desempenho, tendo inclusive sido aprovada em testes estatísticos, como por exemplo, Durbin-Watson e teste F, foi a de “Salário Mínimo”, conforme FIGURA 4. A previsão foi realizada em *MWh* e para a otimização a mesma é transformada em *MWm*.

Quanto a energia contratada vigente no período do planejamento, a mesma está representada na FIGURA 4. Como pode-se verificar a otimização deverá fornecer as quantidades de energia para atender as séries de carga previstas para os próximos 6 anos. O período considerado é formado de o ano atual mais 5 anos à frente, pois os o leilão referente a modalidade A-5 que ocorrer no ano 1 terá o início de seu suprimento no ano 6.

Uma das premissas adotadas é a otimização da contratação de energia em leilões não considerando os valores monetários envolvidos, logo é necessário ponderar a importância de cada uma das variáveis de decisão que compõem o problema. O mecanismo dos leilões estimulam os preços dos leilões A-5 e A-3 a serem menores que os de Ajuste e A-1, além de incentivarem a expansão e diversificação do parque gerador. Por esses motivos as quantidades contratadas nos leilões de A-5 3 A-3 não compõem a função objetivo. Assim, a contratação de energia nova no A-5 é livre e no leilão A-3 é restrita a 2% da carga declarada no ano que ocorreu leilão de A-5.

Ao atribuir pesos nas variáveis que representam a quantidade adquiridas nos leilões de energia existente pretende-se restringir a compra nessa modalidade, pois os preços associados a esses leilões são maiores. De maneira análoga, serão atribuídos pesos às penalidades com o intuito de inibir a infração nas restrições de compra. O responsável pela atribuição dos pesos é o analista, pois ele é o que possui a expertise necessária para essa tarefa.

Para os testes aqui expostos foram atribuídos pesos que simulam cenários de PLD alto (aproximadamente R\$ 400,00) para todos os períodos, e PLD baixo (aproximadamente R\$ 50,00) para todos os períodos, conforme exposto Tabela 1.

Relembrando, o peso P5 está associado a quantidade subcontratada e o P6 a quantidade sobrecontratada, que ficou acima de 105% da carga prevista. Percebe-se a diferença nos pesos quanto à liquidação no curto prazo, ou seja, os montantes de energia resultantes entre o contratado e o verificado pela CCEE são apurados e estão sujeitos ao PLD. De forma simplificada, na hipótese de sobrecontratação a distribuidora arca com a perda da receita usada na compra da energia não distribuída, podendo, no entanto, vender o excedente ao PLD. Caso ocorra subcontratação, a distribuidora é obrigada a recorrer ao mercado de curto prazo para suprir o déficit, estando sujeita a um mínimo entre o PLD e o VR.

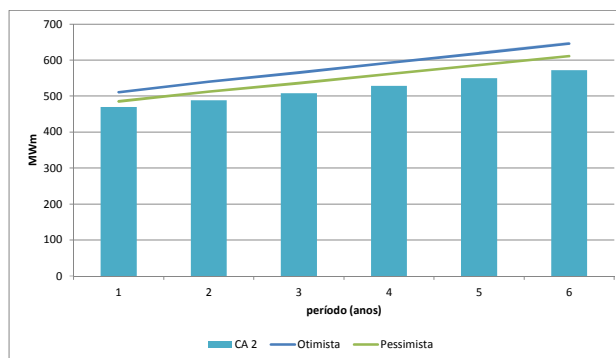


FIGURA 4– Cenários de carga versus energia contratada

Tabela 1 – Relação entre os pesos e o PLD

t	PLD alto		PLD baixo	
	P5	P6	P5	P6
ano 1	11,19	0,00	1,31	1,00
ano 2	10,41	0,00	1,22	0,93
ano 3	9,69	0,00	1,13	0,87
ano 4	9,01	0,00	1,05	0,80
ano 5	8,38	0,00	0,98	0,75
ano 6	7,80	0,00	0,91	0,70

Nos próximos gráficos o cenário 1 refere-se ao cenário otimista e o cenário 2 ao cenário pessimista, a linha tracejada representa 105 % da carga otimista prevista.

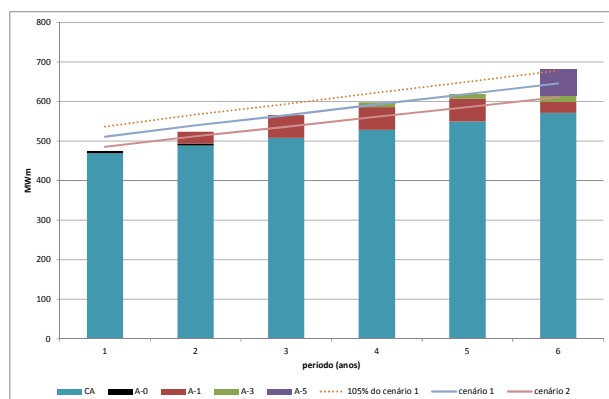


FIGURA 5– Balanço Contratual – PLD alto

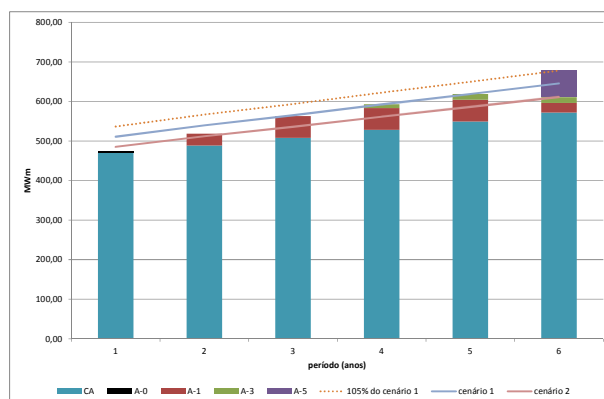


FIGURA 6 – Balanço Contratual – PLD baixo

Como se pode constatar, as diferenças entre as contratações são sutis. Em ambos os testes, no primeiro ano existe uma subcontratação, pois a limitação na compra no Ajuste compromete esse ano. A principal diferença entre os resultados se deram devido à consideração de séries diferentes de contratos vigentes. Como para o teste 01, os contratos anteriores tem um decréscimo durante o período acontece uma subcontratação maior nos três primeiros anos enquanto no segundo teste a tendência é ficar sobrecontratado. Ressalta-se que o otimizador aqui descrito tem como função ser uma ferramenta de apoio a tomada de decisões não eliminando a experiência do analista.

## 5.0 - CONCLUSÃO

Este artigo apresentou uma metodologia para otimizar a estratégia de contratação de energia em leilões, que engloba a previsão de carga global, que associada a variáveis exógenas relevantes ao mercado da EDPI – Eletrobras Distribuição Piauí geram cenários de previsões, os quais são submetidas a uma ferramenta de otimização da contratação de energia elétrica via leilão público. Dessa maneira, a ferramenta desenvolvida oferecerá maior agilidade e segurança aos profissionais da empresa distribuidora ligados à tomada de decisão na definição das estratégias de participação nos leilões de energia. Essas melhorias refletirão diretamente na relação da distribuidora com os diversos órgãos governamentais do setor elétrico brasileiro, ajudando a firmar compromissos confiáveis no âmbito da contratação de energia elétrica em leilões e diminuindo o risco de multas e penalidades.

## 6.0 - AGRADECIMENTOS

Os desenvolvimentos apresentados neste artigo são oriundos do projeto de P&D da ANEEL PD-0038-0012/2012 intitulado "Metodologia de Previsão de Mercado Baseada em Cenários com Vista à Otimização da Contratação em Leilões de Energia Elétrica", que possui como empresa proponente a EDPI. Os autores gostariam de agradecer as valiosas contribuições das equipes de mercado e comercialização de energia das distribuidoras do grupo Eletrobras.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) BARROS, M., MELLO, M. F. de, SOUZA, R. C. Aquisição de energia no mercado cativo brasileiro: simulações dos efeitos da regulação sobre o risco das distribuidoras. Pesquisa Operacional, v. 29, n. 2, p. 303-322, 2009.
- (2) MAURER, L. T. A.; BARROSO, L. A. Electricity auctions: an overview of efficient practices. The World Bank: Washington D.C., 2011. Disponível em: <http://documents.worldbank.org/curated/en/2011/01/14830990/electricity-auctions-overview-efficient-practices>. Acesso em 04/09/2014 .
- (3) BARROSO, L. A.; ROSENBLATT, J.; BEZERRA, B. V.; FLACH, B. da C.; PEREIRA, M. V.; LINO, P. R. Seis anos de leilões de energia nova no Brasil: lições aprendidas e sugestões de aprimoramento. Anais do XXI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Florianópolis, 2011.
- (4) CASTRO, M. A. L.; FIGUEIREDO, F. M. de; CAMARGO, I. M. de T. Análise dos riscos de uma distribuidora associados à compra e venda de energia no novo modelo do setor elétrico. Revista Brasileira de Energia, Vol. 10, N. 1, 1-13, 2004.
- (5) VERONESE, H. D.; FINARDI, E. C. Um modelo de otimização estocástica para definição de estratégias de contratação de energia no ambiente de contratação regulada via progressive hedging. Anais do XXII Seminário nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Brasília, 2013.
- (6) KENNEDY, J.; EBERHART, R. Particle swarm optimization. In: Proceeding of the IEEE Conference on Neural Networks. v. 4, p. 1942-1946. Perth, Australia, 1995
- (7) EBERHART, R.; KENNEDY, J. A new optimizer using particle swarm theory. In: Proceeding of the Sixth International Symposium. p. 39-43. Nagoya, Japan, 1995
- (8) ZHAN, Z.; ZHANG, J.; LI, Y; CHUNG, H.S. Adaptive Particle Swarm Optimization. In: IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B. v. 39, p.1362-1381. 2009
- (9) VALLE, Y.; VENAYAGAMOORTHY, G. K; MOHAGHEGHI, S.; HERNANDEZ, J. C.; HARLEY, R. G.; Particle Swarm Optimization: Basic Concepts, Variants and Applications in Power Systems. In: IEEE Transactions on Evolutionary Computation. v. 12, p. 171-195. 2008.
- (10) ENGELBRECHT, A. P. Fundamentals of Computational Swarm Intelligence. Wiley. 2005.
- (11) COELHO, L. S.; PIERGIORGIO, A. Electromagnetic Optimization Using a Cultural Self-Organizing Migrating Algorithm Approach Based on Normative Knowledge. IEEE Transactions on Magnetics, v .45, n. 3, p. 1446-1449, 2009.
- (12) ZELINKA, I; SOMA Homepage. Acessado em 21 de Outubro de 2014: <<http://www.ft.utb.cz/people/zelinka/soma/>>
- (13) CCEE; Câmara de Comercialização de Energia Elétrica Disponível em: <http://www.ccee.org.br/>. Acesso em: 13/11/14.

## 8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Débora Cinta Marcilio possui graduação em Matemática Industrial – UFPR (2003), mestrado em Métodos Numéricos em Engenharia – PPGMNE/UFPR (2004 – 2006) e doutorado em Métodos Numéricos – PPGMNE/UFPR (2014). Atualmente é pesquisadora do LACTEC, possui experiência na área de Matemática Aplicada com ênfase em Otimização, atuando principalmente nos seguintes temas: programação linear, programação não linear, alocação de geração distribuída, previsão de



séries temporais e comercialização de energia, despacho hidrotérmico.

Ana Paula Oening é bacharel em Matemática Industrial pela Universidade Federal do Paraná (2003), mestre em Métodos Numéricos com ênfase em otimização pelo Programa de Métodos Numéricos em Engenharia – PPGMNE/UFPR (2006) e doutora em Métodos Numéricos com ênfase em previsão de carga na mesma instituição (2014). É Pesquisadora Plena na Divisão de Sistemas Elétricos do LACTEC, atuando nas áreas de otimização, previsão de séries temporais, planejamento da operação e expansão, comercialização de energia e leilões.



Daniel H. M. Detzel nasceu em Curitiba, Paraná, em 1983. Graduiu-se em Engenharia Civil na Universidade Federal do Paraná (2005) e é mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental pela mesma Instituição (2009), sendo contemplado com o prêmio Heinz Dieter Fill pelo reduzido tempo de titulação. Trabalha como pesquisador no LACTEC desde abril de 2010 principalmente nas áreas de hidrologia estocástica, previsão de carga e mercado de energia elétrica. Atualmente é doutorando em Engenharia de Recursos Hídricos na Universidade Federal do Paraná.



Engenheiro eletricitista pela Universidade Federal de Juiz de Fora, possui mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Atualmente é Pesquisador Sênior do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC. Conta com experiência na área de Engenharia de Produção, com ênfase em Séries Temporais, atuando principalmente nos seguintes temas: previsão de carga e preço de energia, mercado de eletricidade e eficiência energética.

Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal da Paraíba (1981) e em Administração pela Associação Internacional de Educação Continuada (2011). MBA em Gestão Empresarial pela Fundação Getúlio Vargas. Especialista em Engenharia da Qualidade pela Universidade Nova de Lisboa - Portugal e em Metodologia do Ensino Superior, pela Faculdade Ademar Rosado. E atualmente é engenheiro da Companhia Energética do Piauí e professor adjunto do Centro de Ensino Unificado de Teresina e da Faculdade Santo Agostinho.