

USO DA COMPUTAÇÃO EVOLUTIVA NA DEFINIÇÃO DE UMA ESTRATÉGIA DE CONTRATAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PARA DISTRIBUIDORAS NO BRASIL

PETÚNIA B. LOPES*, RONEI BURATTI†, LUCIANA MARTINEZ*, HUMBERTO X. DE ARAÚJO*

**Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal da Bahia
Aristides Novis, n.02 - Federação, Salvador, Bahia*

*†Companhia Paranaense de Energia - COPEL
Curitiba, Paraná*

Emails: petunialop@gmail.com, buratti@copel.com, lucianam@ufba.br,
humberto.araujo@ufba.br

Abstract— This article presents a strategy for the purchase of electric power, based on two computational methods of optimization: Genetic Algorithm and Differential Evolution, and modelling rules of the New Model of the Electric Power Sector in Brazil. This strategy is used in simulations of the purchase realized by the electric power distribution agents. The optimized strategy implementation aims to minimize the cost of the purchase of electric power, ensuring the distribution agents compliance with the rules established by the New Model. Simulations for two different scenarios of energy prices are analysed for both optimization methods.

Keywords— Modelling, Auctions Public Power, Genetic Algorithm, Differential Evolution.

Resumo— Este artigo apresenta uma estratégia de contratação de energia elétrica, baseada em dois métodos computacionais de otimização: Algoritmo Genético e Evolução Diferencial, e na modelagem das regras do Novo Modelo do Setor Elétrico Brasileiro. Essa estratégia é utilizada em simulações de compra realizadas pelas distribuidoras de energia. A aplicação da estratégia otimizada visa minimizar os custos da contratação de energia elétrica, garantindo aos distribuidores o cumprimento das regras estabelecidas pelo Novo Modelo. São analisados os resultados para dois cenários de preços de energia, para ambos os métodos de otimização.

Keywords— Modelagem, Leilões públicos de energia, Algoritmos Genéticos, Evolução Diferencial.

1 Introdução

No Brasil, a comercialização de energia elétrica entre produtores, distribuidores e consumidores é regulamentada pelo Decreto N° 5.163, de 30 de julho de 2004 (BRASIL, 2004), e suas subsequentes retificações. O Decreto, que deu origem ao Novo Modelo do setor elétrico, estabelece restrições para a contratação de energia, bem como especificações para a cobrança de tarifas aos consumidores e aplicação de penalidades aos distribuidores, no caso de descumprimento de regras estabelecidas.

De acordo com o estabelecido pela legislação, a comercialização de energia elétrica passou a ser feita por meio de leilões promovidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Os leilões acontecem cinco (A-5), três (A-3) e um (A-1) ano antes do atendimento à demanda prevista, sendo a energia proveniente de novos empreendimentos de geração comercializada nos leilões dos anos A-5 e A-3 e a energia de fontes de geração existentes comercializada no leilão do ano A-1. A garantia do atendimento à demanda pelas distribuidoras é assegurada através de contratos registrados na Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) e aprovados pela ANEEL. O descumprimento desses contratos implica em penalidades para os agentes distribuidores.

O ajuste da tarifa cobrada aos consumidores é regulado pelo Ministério de Minas e Energia

(MME) e pela ANEEL. A tarifa é composta basicamente por duas parcelas: custos operacionais e custos com a compra de energia pelas distribuidoras. Enquanto os custos operacionais podem ser otimizados por cada distribuidor, os gastos com compra de energia dependem da disponibilidade do mercado e das regras do setor elétrico. Minimizar os custos com a contratação de energia, garantir modicidade tarifária, atendimento do mercado previsto e evitar multas por sub ou sobrecontratação, é o que em geral as distribuidoras buscam.

A determinação de uma estratégia otimizada de contratação é um problema complexo devido ao ambiente de incerteza envolvendo demanda e mercado de energia. Neste contexto, modelos de simulação das regras de mercado e dos comportamentos dos agentes, associados com uma estratégia ótima de compra de energia elétrica, e ferramentas de previsão de mercado e de preços são de grande importância para a operação das distribuidoras.

Diferentes técnicas de otimização vêm sendo empregadas na solução desse problema. Em (Castro et al., 2010), (Ramos and Sustera, 2006), (Buratti, 2008), o problema da compra de energia é equacionado utilizando-se Algoritmo Genético. Em (Guimaraes, 2006), técnicas de otimização estocástica multi-estágio são consideradas. Em (Fernandez, 2010), (Moreira, 2011), o problema

é tratado com técnicas de programação linear. As abordagens diferem ainda em relação à alguns aspectos do problema, como o horizonte de planejamento, as implementações do mecanismo de compensação de sobras e déficits e dos limites de contratação em cada modalidade e o tratamento das incertezas associadas a preço e disponibilidade de mercado.

No trabalho aqui proposto, todos os mecanismos de contratação e descontração previstos no Decreto 5.163 são levados em consideração na modelagem do problema, incluindo retificações posteriores como, por exemplo, aquela que modifica o artigo 38 definida no Decreto 7945/2013. Como este problema é não-linear, com funções descontínuas nas restrições, dois métodos da Computação Evolutiva são considerados para a solução do problema: Algoritmo Genético e Evolução Diferencial. A cada ano, o modelo proposto realiza a comparação do montante contratado com o mercado otimista e pessimista (Buratti, 2008), determinando a exposição a sub e sobrecontratação.

O trabalho está organizado como segue. Na seção 2, é apresentada a modelagem matemática do problema, desenvolvida com base no Decreto N° 5.163. As técnicas evolutivas utilizadas para a determinação da estratégia otimizada de contratação de energia são apresentadas na seção 3. Os dados utilizados na realização dos cálculos bem como os resultados obtidos são apresentados na seção 4. Na seção 5, são apresentadas as conclusões sobre o estudo realizado.

2 Modelagem do Problema

O Decreto 5.163 estipula limites, restrições e penalidades, para a compra e venda de energia, entre produtores, distribuidores e consumidores do Setor Elétrico Brasileiro. A modelagem matemática deste problema, proposta inicialmente em (Buratti, 2008) e atualizada pelas modificações da lei, é apresentada a seguir, para um horizonte de 5 anos. A função objetivo é definida pela soma dos custos relativos à aquisição de energia e custos associados às penalizações por sobre e subcontratação:

$$\min J = \{C_{compra} + P_{sobr} + P_{sub}\} \quad (1)$$

sujeito a:

$$C_{compra} = \sum_{j=1}^5 (c(j) \cdot e(i+j)) \quad (2)$$

$$P_{sobr} = \sum_{j=1}^5 (e(i+j) - 1,05 M_{er}(i+j)) (P_{mix}(i+j) - PLD(i+j)) \quad (3)$$

$$P_{sub} = P_{subf} + P_{subp} \quad (4)$$

$$P_{subf} = \sum_{j=1}^5 (M_{er}(i+j) - e(i+j)) (PLD(i+j) - \min(PLD(i+j), VR)) \quad (5)$$

$$P_{subp} = \sum_{j=1}^5 (M_{er}(i+j) - e(i+j)) \max(PLD(i+j), VR) \quad (6)$$

$$e(i+1) = (e_v + e_{v1} + e_{v2} + e_{v3} + e_{v4}) - x_1(MI_v + MI_{v1} + MI_{v2} + MI_{v3} + MI_{v4}) + y_1(e_{v0} + e_{n0}) + (e_n + e_{n1} + e_{n2} + e_{n3} + e_{n4}) + A3(i-2) + A5(i-4) + MCSD(i+1) + AJ(i+1) \quad (7)$$

$$e(i+2) = (e_v + e_{v2} + e_{v3} + e_{v4}) - (x_1 + x_2)(MI_v + MI_{v2} + MI_{v3} + MI_{v4}) + (1 - x_2)y_1(e_{v0} + e_{n0}) + (1 - x_2)MCSD(i+1) + (1 - x_2)AJ(i+1) + y_2(e_{v1} + e_{n1} - x_1 MI_{v1}) + (e_n + e_{n2} + e_{n3} + e_{n4}) + A3(i-2) + A3(i-1) + A5(i-4) + A5(i-3) + MCSD(i+2) + AJ(i+2) \quad (8)$$

$$e(i+3) = (e_v + e_{v3} + e_{v4}) - (x_1 + x_2 + x_3)(MI_v + MI_{v3} + MI_{v4}) + (1 - x_2 - x_3)y_1(e_{v0} + e_{n0}) + y_2(1 - x_3)(e_{v1} + e_{n1} - x_1 MI_{v1}) + (1 - x_2 - x_3)MCSD(i+1) + (1 - x_3)MCSD(i+2) + (1 - x_3)AJ(i+2) + y_3(e_{v2} + e_{n2} - (x_1 + x_2)MI_{v2}) + (e_n + e_{n3} + e_{n4}) + A3(i-2) + A3(i-1) + A3(i) + A5(i-4) + A5(i-3) + A5(i-2) + MCSD(i+3) + AJ(i+3) \quad (9)$$

$$e(i+4) = (e_v + e_{v4}) - (x_1 + x_2 + x_3 + x_4)(MI_v + MI_{v4}) + (1 - x_2 - x_3 - x_4)y_1(e_{v0} + e_{n0}) + (1 - x_3 - x_4)y_2(e_{v1} + e_{n1} - x_1 MI_{v1}) + (1 - x_4)y_3(e_{v2} + e_{n2} - (x_1 + x_2)MI_{v2}) + (1 - x_2 - x_3 - x_4)MCSD(i+1) + (1 - x_3 - x_4)MCSD(i+2) + (1 - x_4)MCSD(i+3) + (1 - x_4)AJ(i+3) + y_4(e_{v3} + e_{n3} - (x_1 + x_2 + x_3)MI_{v3}) + (e_n + e_{n4}) + A3(i-2) + A3(i-1) + A3(i) + A3(i+1) + A5(i-4) + A5(i-3) + A5(i-2) + A5(i-1) + MCSD(i+4) + AJ(i+4) \quad (10)$$

$$e(i+5) = e_v - (x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5)MI_v + (1 - x_2 - x_3 - x_4 - x_5)y_1(e_{v0} + e_{n0}) + (1 - x_3 - x_4 - x_5)y_2(e_{v1} + e_{n1} - x_1 MI_{v1}) + (1 - x_4 - x_5)y_3(e_{v2} + e_{n2} - (x_1 + x_2)MI_{v2}) + (1 - x_4)y_4(e_{v3} + e_{n3} - (x_1 + x_2 + x_3)MI_{v3}) + (1 - x_2 - x_3 - x_4 - x_5)MCSD(i+1) + (1 - x_3 - x_4 - x_5)MCSD(i+2) + (1 - x_4 - x_5)MCSD(i+3) + (1 - x_5)MCSD(i+4) + (1 - x_5)AJ(i+4) + y_5(e_{v4} + e_{n4} - (x_1 + x_2 + x_3 + x_4)MI_{v4}) + e_n + A3(i-2) + A3(i-1) + A3(i) + A3(i+1) + A3(i+2) + A5(i-4) + A5(i-3) + A5(i-2) + A5(i-1) + A5(i) + MCSD(i+5) + AJ(i+5) \quad (11)$$

$$0 \leq x_j \leq 0,04 \quad \text{para } j = 1, \dots, 5 \quad (12)$$

$$0 \leq y_j \leq 1 \quad \text{para } j = 1, \dots, 5 \quad (13)$$

$$(1 - y_2)(e_{v0} + e_{n0}) \leq 0,04(e_{n0} + MI_{v0}) \quad (14)$$

$$(1 - y_2)(e_{v1} + e_{n1} - x_1 MI_{v1}) \leq 0,04(e_{n1} + MI_{v1}) \quad (15)$$

$$(1 - y_3)(e_{v2} + e_{n2} - (x_1 + x_2)MI_{v2}) \leq 0,04(e_{n2} + MI_{v2}) \quad (16)$$

$$(1 - y_4)(e_{v3} + e_{n3} - (x_1 + x_2 + x_3)MI_{v3}) \leq 0,04(e_{n3} + MI_{v3}) \quad (17)$$

$$(1 - y_5)(e_{v4} + e_{n4} - (x_1 + x_2 + x_3 + x_4)MI_{v4}) \leq 0,04(e_{n4} + MI_{v4}) \quad (18)$$

$$\text{Se } x_j \neq 0 \text{ ou } y_j \neq 0 \text{ então } MCSD(i+j) = 0 \quad \text{para } j = 1, \dots, 5 \quad (19)$$

$$\text{Se } x_j = 0 \text{ e } y_j = 1 \text{ então } 0 \leq MCSD(i+j) \leq \frac{per_j}{100 - per_j} \{e(i+j) - MCSD(i+j)\} \quad \text{para } j = 1, \dots, 5 \quad (20)$$

$$\text{Se } x_j \neq 0 \text{ ou } y_j \neq 1 \text{ então } AJ(i+j) = 0 \quad \text{para } j = 1, \dots, 5 \quad (21)$$

$$\text{Se } x_j = 0 \text{ e } y_j = 1 \text{ então } 0 \leq AJ(i+j) \leq \frac{1}{99} \{e(i+j) - AJ(i+j)\} \quad \text{para } j = 1, \dots, 5 \quad (22)$$

O custo de aquisição de energia, C_{compra} , é descrito em (2), onde $e(i+j)$ representa o montante de energia (MWh) disponível para a distribuidora no ano $(i+j)$, onde i representa o ano da previsão em que a contratação j ocorre ($j = 1, 2, \dots, 5$), e $c(j)$ o custo associado (R\$).

O custo associado à penalização por sobrecontratação, P_{sobre} , é dado por (3), onde $M_{er}(i+j)$ é o valor do mercado (MWh) estabelecido pela distribuidora para o ano $(i+j)$; $P_{mix}(i+j)$ é o preço médio (R\$) praticado nos leilões que acontecem no ano $(i+j)$ e $PLD(i+j)$ é o preço de liquidação de diferenças (R\$) para o ano $(i+j)$. Estabelecida no Art. 38º do Decreto 5.163, a penalidade por sobrecontratação é aplicada a uma distribuidora caso a mesma tenha sobrecontratado uma quantidade de energia acima de 5% (cinco por cento) do montante anual. Nesse caso, a distribuidora terá de negociar essa energia no mercado de curto prazo no valor de PLD estabelecido pela ANEEL. Se o PLD for maior do que o preço pelo qual a energia foi originalmente comprada, a distribuidora obterá lucro. Caso contrário, prejuízo.

O custo associado à penalização por subcontratação, P_{sub} , é representado por (4). As penalidades por subcontratação estão previstas nos Art. 3º e Art. 42º do Decreto 5.163. As distribuidoras subcontratadas terão de comprar a energia faltante no mercado de curto prazo ao preço PLD e repassá-la aos consumidores ao menor preço entre o PLD e o Valor de Referência (VR), podendo portanto ter prejuízo (caso VR seja menor do que PLD), tal como representado em (5), onde VR é o valor anual de referência (R\$) praticados no ano $(i+j)$. Além disso, para cada MWh não contratado é cobrada uma multa à distribuidora (equação (6)). As penalizações por subcontratação ou sobrecontratação podem ser aplicadas através de multas ou do não repasse dos gastos adicionais para as tarifas dos consumidores.

Os montantes totais de energia $e(i+j)$ (MWh) contratados para o ano $(i+j)$ são dados pelas equações (7)-(11), onde e_{v_j} representa a energia (MWh) proveniente de empreendimentos existentes, contratada até o ano i , cujos contratos se encerram no horizonte de cinco anos; e_{n_j} representa a energia (MWh) proveniente de empreendimentos novos, contratada até o ano i , cujos contratos se encerram no horizonte de cinco anos; e_v e e_n são as parcelas desses contratos que não se encerram até o ano $(i+5)$; MI_{v_j} é o montante original de energia (MWh) dos contratos que se encerram a cada ano j ; x_j representa a porcentagem de descontração de energia a cada ano j ; y_j a porcentagem de recontração dos contratos que se encerram e que devem ser recontraçados nos leilões A-1 no ano j ; $A3(i-j)$, $A5(i-j)$ representam a energia (MWh) comprada nos leilões do tipo A-3 e A-5, respectivamente, ocorridos no ano $(i-j)$; $A3(i+j)$, $A5(i+j)$, $MCS D(i+j)$

e $AJ(i+j)$ representam a energia (MWh) a ser comprada nos leilões do tipo A-3, A-5, MCS D e Ajuste, respectivamente, no ano $(i+j)$.

O Art. 29º do Decreto 5.163 trata dos mecanismos de descontração, estipulando que apenas a energia proveniente de empreendimentos existentes pode ser descontraçada, com um limite máximo de 4% do montante original contratado para o suprimento do ano corrente. Restrições do tipo (12) representam os limites nos percentuais de descontração x_j de energia a cada ano j .

O Art. 24º estabelece que, a partir do ano de 2009, os leilões de energia proveniente de empreendimentos existentes (leilões A-1) ficam destinados à contratação do montante de reposição. Este montante é formado, a cada ano, pela energia dos contratos que se encerram no ano corrente. A quantidade de energia que pode ser adquirida nos leilões A-1 fica então restrita ao limite do montante de reposição. As restrições do tipo (13) representam os limites nos percentuais de recontração de energia y_j a cada ano j .

O Art. 40º do Decreto estabelece ainda um limite mínimo de recontração, que deve ser igual a 96% do montante de reposição a cada ano j . Por montante de reposição entende-se a quantidade de energia elétrica dos contratos que forem extintos, ou tiverem previsão de redução da quantidade contratada no ano dos leilões, subtraídas as reduções permitidas em cada ano. As restrições (14)-(18) representam tais limites.

O Mecanismo de Compensação de Sobras e Déficits (MCS D) é um instrumento de compra e venda de energia resultantes de sub e sobrecontratações. Devido à incerteza da disponibilidade de energia nesse tipo de mercado, o MCS D foi levado em conta apenas como mecanismo de compra, ou seja, apenas se a distribuidora estiver subcontratada. Se durante o ano corrente houve descontração ou se a recontração do montante de reposição não foi integral, observa-se que a distribuidora não apresenta falta de energia e portanto a energia adquirida através do MCS D é nula, tal como representado pelas restrições do tipo (19). Foi estabelecido ainda um limite para a compra de energia nesse mercado, que só deve ocorrer caso não haja descontração e a recontração seja máxima. O limite utilizado foi definido com base nos valores utilizados por empresas distribuidoras (3%) sendo representado por per_j nas restrições do tipo (20).

O Art. 26º estabelece que a Aneel deve promover leilões de ajuste para complementar o montante de energia necessário ao atendimento da totalidade das cargas dos distribuidores. Esse tipo de mecanismo não será utilizado caso haja descontração ou a recontração não tenha sido integral, tal como representado pelas restrições do tipo (21). O Art. 26º define ainda o limite de contratação de energia através dos leilões de ajuste,

o que é representado pelas restrições do tipo (22).

O Art. 36º estabelece o limite máximo de contratação de energia nos leilões A-3 igual a 2% da carga verificada no ano A-5. Na modelagem foi utilizada a restrição de que a quantidade de energia contratada para cada ano deve estar entre limites de mercados pessimistas e otimistas, cujos valores utilizados foram obtidos a partir dos dados apresentados por empresas distribuidoras.

Desta forma, o problema proposto possui 24 variáveis.

3 Métodos de Otimização

Neste trabalho, Algoritmo Genético e Evolução Diferencial foram as técnicas de Computação Evolutiva utilizadas na determinação da estratégia otimizada de contratação de energia.

3.1 Algoritmo Genético

Os algoritmos genéticos baseiam-se em conceitos provenientes do princípio de seleção natural para abordar uma série ampla de problemas, em especial de otimização. De acordo com (Michalewicz, 1995), os algoritmos genéticos devem apresentar cinco características principais: Representação genética das possíveis soluções do problema (cromossomos); técnica para gerar uma população inicial; função objetivo, também chamada função “fitness”, para calcular a aptidão dos indivíduos da população; operadores genéticos (seleção, cruzamento ou crossover, mutação) para atuar na população e gerar novos indivíduos; parâmetros para implementação do algoritmo (tamanho da população, probabilidade de cruzamento, probabilidade de mutação, critério de parada da otimização).

Neste trabalho, a codificação real foi considerada, onde cada cromossomo é formado por uma cadeia de vinte e quatro variáveis, que representam as características dos indivíduos. A população inicial foi gerada aleatoriamente, sendo uma solução factível ao problema.

A seleção dos indivíduos foi realizada pelo método da roleta. A etapa de recombinação foi realizada através da combinação convexa, onde cada par de indivíduos selecionados deu origem a um par de descendentes. A mutação foi utilizada como uma perturbação na população e foi aplicada em um indivíduo X a cada geração ($X' = X + \epsilon X$), sendo adotado $\epsilon = 0,02$. Por fim, para garantir que o indivíduo mais apto se perpetue na população, o critério de elitismo foi considerado. Foram utilizadas populações com um número fixo de 80 indivíduos e o critério de parada considerado foi o número máximo de 300 gerações.

3.2 Evolução Diferencial

Neste trabalho, a utilização da Evolução Diferencial seguiu as etapas de desenvolvimento propostas por (Storn and Price, 1997). É um método de aproximação heurístico capaz de minimizar funções não-lineares e não-diferenciáveis, apresentando rápida convergência, poucas variáveis de controle, robustez e facilidade de implementação.

Assim como nos Algoritmo Genético, na otimização por Evolução Diferencial a população é formada por vetores de prováveis soluções, cujas posições representam as características dos indivíduos. Neste caso, os parâmetros de controle utilizados no algoritmo são: número de dimensões (tamanho do cromossomo, quantidade de características dos indivíduos); tamanho da população; constante de crossover (probabilidade de recombinação); constante de mutação; número máximo de gerações.

Os parâmetros relacionados à codificação dos indivíduos, tamanho do cromossomo, número de indivíduos na população, geração da população inicial e critério de parada foram os mesmos adotados no desenvolvimento do Algoritmo Genético (seção 3.1), a fim de que os resultados obtidos pelas duas técnicas pudessem ser comparados.

O algoritmo desenvolvido seguiu as etapas propostas por (Storn and Price, 1997). Assim, as etapas de mutação, recombinação e seleção foram realizadas através de operações matemáticas entre vetores escolhidos aleatoriamente na população e o fator F igual a 0,4 foi adotado na etapa de mutação, desde que, segundo os autores, valores de F abaixo de 0,4 e acima de 1 não costumam ser muito eficazes. A probabilidade de cruzamento foi considerada como 0,8. A estratégia de otimização utilizada foi a DE/rand/1/bin, que utiliza vetores escolhidos aleatoriamente na população, apenas um vetor diferença por iteração e recombinação binomial.

4 Estudo de caso

As abordagens propostas utilizam como dados de entrada os preços praticados em cada tipo de leilão, os montantes de energia já contratados, os limites de compra nos leilões A-3 e os valores de mercado. Alguns desses valores são estabelecidos pela ANEEL e outros são determinados por cada distribuidora, de acordo com a experiência de seus funcionários.

Os dados utilizados são baseados em (Buratti, 2008). A Tabela 1 apresenta os montantes de energia já contratados e os limites estipulados. Os valores de e_v , e_n e MI_v são, respectivamente, 2010, 60 e 2010 MW médio. A Tabela 2 apresenta preços praticados nos leilões, no período de previsão de cinco anos. Os preços da energia e_v e e_n são, respectivamente, 50 e 115 R\$/MWh. Dois

cenários de mercado (otimista e pessimista) e dois cenários diferentes de preços PLD (alto e baixo) foram considerados, com o objetivo de observar os efeitos deste parâmetro sobre as estratégias de contratação de energia.

Tabela 1: Montantes e limites de energia MW médio.

Tipo	Contratos que se encerram nos próximos cinco anos e devem ser recontratados (MW)				
	(i + 1)	(i + 2)	(i + 3)	(i + 4)	(i + 5)
Energia Existente	e_{v0} 20	e_{v1} 50	e_{v2} 20	e_{v3} 80	e_{v4} 20
Energia Nova	e_{n0} 20	e_{n1} 40	e_{n2} 30	e_{n3} 20	e_{n4} 30
Montantes Originais	MI_{v0} 20	MI_{v1} 50	MI_{v2} 20	MI_{v3} 80	MI_{v4} 20
Mercado Otimista	Mot_1 2960	Mot_2 3120	Mot_3 3280	Mot_4 3490	Mot_5 3660
Mercado Pessimista	Mpe_1 2370	Mpe_2 2450	Mpe_3 2520	Mpe_4 2630	Mpe_5 2700
Energia leilões A-3	50	120	-	-	-
Energia leilões A-5	60	170	360	540	-
Limite leilões A-3	-	-	A3(i) 2400	A3(i + 1) 2500	A3(i + 2) 2600

Tabela 2: Preços de energia em R\$/MWh.

Tipo	Contratos que se encerram nos próximos cinco anos e devem ser recontratados (MW)				
	(i + 1)	(i + 2)	(i + 3)	(i + 4)	(i + 5)
Energia Existente	e_{v0} 50	e_{v1} 50	e_{v2} 70	e_{v3} 80	e_{v4} 78
Energia Nova	e_{n0} 115	e_{n1} 118	e_{n2} 119	e_{n3} 118	e_{n4} 118
Leilões A-1 (MR)	80	85	95	98	98
Leilões A-3	A3(i-2) 128	A3(i-1) 130	A3(i) 120	A3(i+1) 150	A3(i+2) 155
Leilões A-5	A5(i-4) 80	A5(i-3) 90	A5(i-2) 100	A5(i-1) 105	A5(i) 110
Leilões MCSD	40	45	60	96	115
Leilões Ajuste AJ	110	115	160	170	175
PLD Baixo	30	20	30	30	20
PLD Alto	300	400	500	300	200
Valores Ref. VR	99	106	108	123	128

Foram realizadas 50 simulações de cada cenário, para cada uma das abordagens, e a resposta escolhida foi a que apresentou o menor custo. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 3. A Tabela 4 apresenta os custos anuais relativos à contratação de energia, sobrecontratação e subcontratação, bem como o valor da função objetivo obtidos nas simulações. As Figuras (1)-(4) mostram os valores dos montantes de energia contratados em cada ano da previsão, para os preços de PLD alto e baixo, juntamente com os valores de mercado otimista e pessimista considerados.

Os resultados mostram a influência do preço do PLD na estratégia de compra a ser realizada pela distribuidora e, conseqüentemente, no valor da função objetivo. Nas simulações que consideraram PLD alto, os montantes de energia contratados foram maiores, se aproximando do limite do mercado otimista (Figuras 1 e 3). Neste caso alguns anos apresentaram montantes negativos de sobrecontratação, o que representa lucro para a distribuidora com o montante sobrecontratado. Portanto, o cenário de PLD alto favorece os distribuidores e a aquisição de energia.

Nos cenários de PLD baixo, os montantes de

Tabela 3: Resultados para as estratégias testadas.

Variáveis	Algoritmo Genético		Evolução Diferencial	
	PLD Alto	PLD Baixo	PLD Alto	PLD Baixo
x_1	0,0013	0,0111	0,0019	0,0011
x_2	0,0352	0,0199	0,0331	0,0394
x_3	0,0355	0,0397	0,0379	0,0383
x_4	0,0400	0,0383	0,0391	0,0268
x_5	0,0164	0,0103	0,0170	0,0131
y_1	0,9935	0,9618	0,9926	0,9999
y_2	0,9987	0,9969	0,9650	0,9671
y_3	0,9956	0,9782	0,9678	0,9599
y_4	1,0000	0,9620	0,9826	0,9667
y_5	1,0000	0,9682	0,9964	0,8210
MCSD(i+1)	0,0	0,0	0,0	0,0
MCSD(i+2)	0,0	0,0	0,0	0,0
MCSD(i+3)	0,0	0,0	0,0	0,0
MCSD(i+4)	0,0	0,0	0,0	0,0
MCSD(i+5)	0,0	0,0	0,0	0,0
AJ(i+1)	0,0	0,0	0,0	0,0
AJ(i+2)	0,0	0,0	0,0	0,0
AJ(i+3)	0,0	0,0	0,0	0,0
AJ(i+4)	0,0	0,0	0,0	0,0
AJ(i+5)	0,0	0,0	0,0	0,0
A3(i+3)	0,8544	7,4607	7,0451	0,0284
A3(i+4)	10,1122	2,2035	2,1052	3,1692
A3(i+5)	28,5746	23,2482	17,0876	5,9775
A5(i+5)	119,0160	20,6371	193,5283	64,8281

Tabela 4: Custo obtidos com as estratégias.

Custos (R\$)	Algoritmo Genético		Evolução Diferencial	
	PLD Alto	PLD Baixo	PLD Alto	PLD Baixo
Fç Objetivo	1.226.000	1.299.700	1.284.000	1.287.600
Contratação	1.077.800	1.065.400	1.082.200	1.064.000
Sobrecontratação	-561.440	105.730	-497.700	94.217
Subcontratação	709.640	128.640	699.490	129.380

energia contratados foram menores (Figura 2 e 4). O PLD baixo torna as distribuidoras mais vulneráveis às situações de sobre e subcontratação. Para evitar que os custos com penalidades comprometam a custo total, as distribuidoras buscam equilibrar seus gastos através da diminuição dos montantes de energia adquiridos. Comparando-se os valores calculados para a função objetivo através das duas técnicas de otimização, observa-se valores maiores para o cenário de PLD baixo, devido às penalidades sofridas, confirmando o efeito do PLD sobre o custo total de aquisição. Para os dois cenários, o Algoritmo Genético e a Evolução Diferencial apresentaram resultados muito próximos. Com PLD alto, o Algoritmo Genético obtém resultados ligeiramente melhores, e o inverso acontece com o PLD baixo.

Valores nulos para os leilões MCSD e de Ajuste foram verificados em todas as simulações (Tabela 3). Pela modelagem do problema (seção

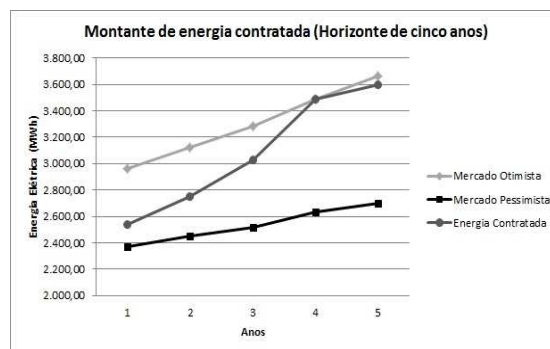


Figura 1: Energia contratada (Alg.Gen.-PLD alto).

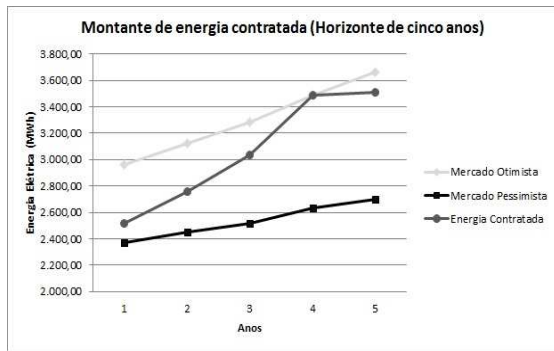


Figura 2: Energia contratada (Alg.Gen.-PLD baixo).

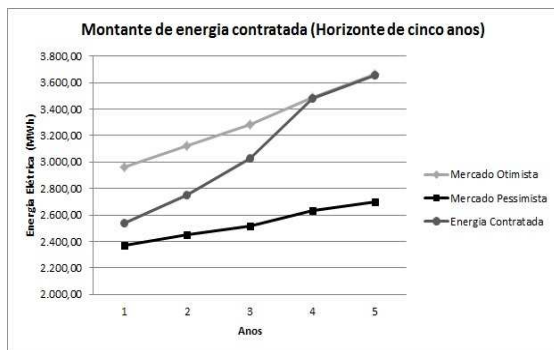


Figura 3: Energia contratada (Evol.Dif.-PLD alto).

2), tais mecanismos de compra de energia somente são utilizados nos anos em que não há descontratação e a recontratação dos montantes é integral.

5 Conclusões

O artigo apresentou estratégias otimizadas para a contratação de energia pelas distribuidoras, de acordo com as regras estabelecidas para o novo modelo do Setor Elétrico Brasileiro. Foram implementados o método de Algoritmo Genético e da Evolução Diferencial. Ambos os algorit-

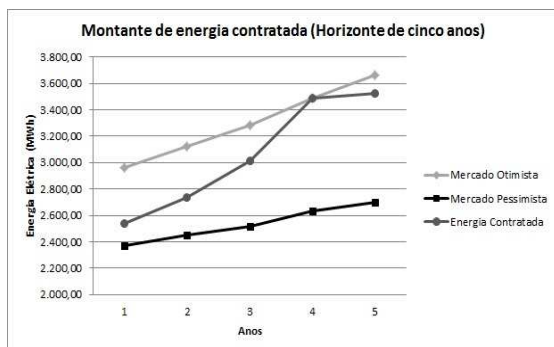


Figura 4: Energia contratada (Evol.Dif.-PLD baixo).

mos levaram em consideração as restrições apresentadas pelo problema, considerando os limites de descontratação e recontratação estabelecidos pela legislação, bem como os limites de mercado otimista e pessimista, que são estabelecidos por cada distribuidora. Os resultados obtidos pelos dois métodos foram bastante próximos. As simulações realizadas consideraram cenários com diferentes valores para o PLD. Os resultados mostraram que o PLD alto estimula a compra de energia, enquanto o PLD baixo torna as distribuidoras mais suscetíveis às penalidades.

Referências

BRASIL (2004). *Decreto nº 5.163 de 30 de julho de 2004.*, Diário Oficial da República Federativa do Brasil.

Buratti, R. M. (2008). *Estratégia de contratação de energia elétrica para uma concessionária de distribuição*, Dissertação de Mestrado, PUC-PR.

Castro, C. M. B., Oliveira, E. J., Silva Junior, I. C. and Marcato, A. L. M. (2010). Aplicação de algoritmo genético na estratégia de contratação de energia elétrica pelas distribuidoras de energia, *XVIII Congresso Brasileiro de Automática*.

Fernandez, M. R. (2010). *Contratação ótima para comercialização de energia elétrica*, Dissertação de Mestrado, Unicamp.

Guimaraes, A. R. (2006). *Estratégia de contratação das distribuidoras em leilões de energia sob incerteza da demanda.*, Dissertação de Mestrado, PUC-RJ.

Michalewicz, Z. (1995). *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, Editora Springer.

Moreira, R. L. P. (2011). *Metodologia para definição de montante ótimo de energia elétrica contratado por uma distribuidora nos leilões A-5*, Dissertação de Mestrado, Universidade Salvador.

Ramos, D. S. and Sustera, G. L. (2006). Utilização de algoritmos genéticos para previsão da contratação de energia pelas distribuidoras, *IEEE Latin America Transactions* 4(4): 268–278.

Storn, R. and Price, K. (1997). Differential evolution - a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces, *Journal of Global Optimization* 11(4): 341–359.