

Energy Purchasing Strategy On The Brazilian Regulated Electricity Market: A Fuzzy Model

C. Unsihuay and G. Perondi

Abstract— Brazilian regulatory model of electricity imposes that distribution companies should acquire all your energy market related to captive customers on, regulated auctions, and distributed generation, whose energy is traded with public calls. An energy market forecast is designed by the utilities and this forecast has to be a 100% covered with contracts agreed from regulated trades. The challenge of utilities is to forecast their own energy market five years in advance, which brings to the process a high level of uncertainty. This paper presents a methodology for planning the purchase of electricity by distribution agents in the Brazilian regulated contracting environment (ACR). The contracting strategy covers a horizon of 5 years, with monthly discretization and the goal is to minimize the total cost of energy procurement strategy. The proposed model considers the current regulatory Brazilian Laws of energy contracting by distribution companies, i.e. energy purchases from auctions in the regulated environment, distributed generation - GD, Compensation Mechanism Surplus and Deficit - MCS D and short-term market. The uncertainties of future electric consumption are modeled following a fuzzy approach. Thus, the formulation of proposed model is a fuzzy non-linear programming problem. Results show the importance of the short-term modeling and the consideration of MCS D and GD in the Energy Purchase Strategy on the Brazilian Regulated Electricity Market.

Keywords— Energy purchasing strategy, distribution companies, Brazilian electricity market, fuzzy non-linear programming, short-term market.

I. INTRODUÇÃO

AS BASES do novo modelo do setor elétrico brasileiro remetem aos anos 90 onde ocorreu a primeira reestruturação do setor elétrico. Uma segunda reforma ocorreu em 2004 [1]. A Lei 10.848 e o Decreto 5.163 foram publicados em 2004 e alteraram significativamente o modelo de comercialização de energia elétrica [2]. Segundo o modelo vigente, agentes de distribuição são obrigados a contratar a totalidade das suas cargas, estes contratos por sua vez só poderão ser pactuados por meio de leilões no ambiente de contratação regulada (ACR). Para viabilizar a comercialização de energia elétrica foi criada também a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), que passou a gerenciar a contratação de energia no ACR, no ambiente de contratação livre (ACL), além de realizar a contabilização e liquidação financeira das operações firmadas no mercado de curto prazo [1]-[4].

Pelas regras do novo modelo do setor elétrico brasileiro as distribuidoras devem lastrear 100% do seu consumo por meio de contratos. Esta regra exige que tal agente tenha uma

previsão de carga apurada e um acompanhamento constante de seu mercado cativo. Caso contrate menos de 100% do seu consumo a distribuidora deverá adquirir energia no mercado de curto prazo, assim estará sujeita a preços voláteis além de penalidades por insuficiência de lastro de energia. Por outro lado, se a contratação exceder a 103% de sua carga, os custos de aquisição da energia referentes a parcela superior a 103% não são passíveis de repasse, o que gera um prejuízo integralmente absorvido pela distribuidora [3], [4]. A definição de uma estratégia de contratação de energia para agentes de distribuição que não ocasione prejuízos e/ou penalizações é de extrema importância, sendo a otimização desta contratação de energia o objetivo principal deste artigo. A aquisição de energia pelas distribuidoras sem um estudo preliminar pode gerar custos desnecessários, sendo o custo desta mitigação de riscos repassados em sua maioria para o consumidor cativo [5].

A aquisição de energia elétrica no ACR já foi objeto de estudo em vários trabalhos na literatura. No artigo [6] é sugerido uma estratégia determinista baseada em algoritmos genéticos para compra de energia ao longo de horizonte de 5 anos (longo prazo) de uma distribuidora é orientada através de uma função objetivo que minimiza o somatório do custo da compra de energia, possíveis penalizações por sobre contratação, subcontratação e perda de repasse por contratação de energia existente abaixo do limite regulatório.

Similarmente como em [6], em [7] o problema de estratégia de contratação de energia de longo prazo de uma distribuidora é formulado como um problema de otimização. Entretanto, em [7] tal problema é modelado como um problema de otimização linear estocástico multi-estágio através da modelagem em “árvore” da incerteza das demandas futuras de uma determinada distribuidora. Porém, os dados de Preços de Liquidação de Diferenças (PLDs) e preço dos contratos são determinísticos.

Dias (2007) em [8] verifica o comportamento desta aquisição com base em diferentes cenários de carga ao longo do tempo. Já o planejamento de 5 anos com discretização mensal é explorado em [9] considerando-se ferramentas de controle de risco, como CVar e o mecanismo de compensação de sobras e déficits - MCS D Ex-post [9]. Como em análises de curto prazo existe um maior dinamismo, a incerteza associada também é maior, por isso faz-se necessário a inclusão de ferramentas para gestão de risco. Ferramentas comerciais denominados EST-D e EST-D-CP para análise no longo e curto prazo, respectivamente foram desenvolvidas pela consultora Power System Research (PSR) [10], [11] se baseando na técnica de árvore de cenários. A modelagem da PSR gera uma estratégia de compra no longo prazo (5 anos) e curto prazo (2 anos), respectivamente, sendo que o curto prazo

C. Unsihuay, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Departamento de Engenharia Elétrica, Curitiba, Brasil, clodomiro@eletrica.ufpr.br

G. Perondi, Companhia Paranaense de Energia (COPEL), Curitiba, Brasil, gustavo.perondi@copel.com

considera a presença do MCS D.

Recentemente, em [12] é proposto uma formulação do problema de compra de energia das distribuidoras de energia no mercado brasileiro, e quantifica os riscos em que estas ficaram expostas por conta das recentes mudanças regulatórias ocorridas. Para tal, será elaborado um modelo de otimização estocástico que funciona de maneira semelhante (porém simplificada) ao modelo EST-D [10]. O modelo criado (da mesma maneira que o EST-D) indica, com o auxílio de uma árvore de possibilidades de demandas futuras, as decisões ótimas de contratação disponíveis aos distribuidores, sempre no sentido de minimizar as penalidades regulatórias.

Um interessante trabalho apresentado em [13] é proposto um modelo de curto prazo (horizonte de 1 ano) de estratégia de compra de uma distribuidora que minimiza suas possíveis penalidades futuras, além da imposição de contratação de 10% de seu lastro via contratos de Geração Distribuída de fontes eólica e térmica (cogeração). Dado o cenário de curto prazo, as demais ferramentas para a contratação total do lastro são os leilões de ajuste e compras no mercado spot. Este último instrumento traz como consequência a penalidade por subcontratação, emulada novamente conforme as regras vigentes do setor elétrico à época do estudo. Para supor o crescimento de carga da distribuidora e a geração eólica dos contratos de Geração Distribuída ao longo do ano de estudo foi utilizada lógica Fuzzy através de funções de pertinência. A inovação está em, dado a natureza incerta destas duas grandezas, a abordagem não em cenários probabilísticos, mas em funções de pertinência que se baseiam na experiência de ocorrência dessas grandezas.

Dos trabalhos encontrados na literatura, a maioria abordam o planejamento de compra de energia no contexto de longo prazo, apenas os trabalhos apresentados em [11] e [13] lidam no contexto de curto prazo o problema de compra de energia das distribuidoras cuja modelagem considera uma discretização em base mensal. Em todos esses modelos, exceto em [13], adota-se na formulação de otimização métodos de solução por meio de algoritmos genéticos e otimização estocástica.

O modelo apresentado neste artigo é inspirado nos trabalhos apresentados em [11] e [13], e tem as seguintes contribuições:

- A diferença com o trabalho [11], neste artigo considera a contratação via contratos de Geração Distribuída e abordagem não é em cenários probabilísticos, mas em funções de pertinência Fuzzy. Tais informações são aplicadas em uma proposta de modelagem mês a mês (curto prazo) durante um horizonte de 5 anos.
- Similarmente como é feito em [13], neste artigo além de considerar, a geração distribuída, leilões de ajuste e compras no mercado spot, é considerado a presença do MCS D. Tais informações são aplicadas em uma proposta de modelagem mês a mês (curto prazo) durante um horizonte de 5 anos.

- Outra contribuição importante deste artigo diz respeito a sazonalização indireta de contratos.

Assim, neste artigo é proposto um modelo computacional para a compra de energia das distribuidoras de energia elétrica no Brasil, na qual considera todas as regras vigentes no ACR, sendo que as inovações ou contribuições deste artigo em relação a outros trabalhos do mesmo tema, disponíveis na literatura: a consideração da geração distribuída, a modelagem do MCS D, sazonalização indireta de contratação a consideração das incertezas na demanda via formulação como um problema de otimização non-linear Fuzzy. Tais informações são aplicadas em uma proposta de modelagem mês a mês (curto prazo) durante um horizonte de 5 anos.

A seção II descreve em detalhes o problema da contratação de energia elétrica no ACR e as regras e procedimentos de comercialização vigente. A seção III apresenta a modelagem matemática proposta neste artigo, define quais as regras de comercialização incluídas no problema e aborda conceitos de incerteza, sua representação por meio da lógica Fuzzy e sua inclusão no equacionamento do modelo. Na seção IV são apresentados e discutidos os resultados obtidos através da aplicação do método proposto a dois casos de estudos. A seção V aborda as conclusões obtidas da pesquisa.

II. CONTRATAÇÃO DE ENERGIA NO ACR

Os novos contratos de energia pactuados entre agentes de geração e distribuição são realizados em sua maioria através de leilões decrescentes. Esta modalidade de negociação tem por objetivo comercializar energia ao menor preço possível e assim, não onerar excessivamente o consumidor final. As regras para contratação nos leilões no ACR, bem como o repasse pelas distribuidoras dos respectivos custos de aquisição foram estabelecidas no Decreto 5.163/2004 [1]-[4].

Após a publicação do Decreto 5.163/2004, algumas das possibilidades de contratação de energia no ACR são:

Leilão A-5: Ocorre no quinto ano anterior ao do início do suprimento de energia. Neste leilão participam apenas usinas novas, ainda não construídas. Os contratos decorrentes deste certame devem ter duração mínima de 15 anos e máxima de 30 anos. Não existe limite de contratação pela distribuidora e o repasse dos custos de aquisição de energia às tarifas é integral.

Leilão A-3: Ocorre no terceiro ano anterior ao do início do suprimento de energia. Neste leilão participam apenas usinas novas, ainda não construídas. Os contratos oriundos deste certame devem ter duração mínima de 15 anos e máxima de 30 anos. O repasse integral dos custos de aquisição de energia às tarifas é limitado a 2% da carga da distribuidora verificada no ano A-5, o que indiretamente limita a aquisição de energia.

Leilão A-1: Ocorre no ano anterior ao do início do suprimento de energia. Nesta modalidade participam apenas empreendimentos de geração já existentes. Os contratos decorrentes deste leilão devem ter duração mínima de 3 anos e máxima de 15 anos. Cada agente de distribuição poderá contratar no certame a energia elétrica correspondente ao seu montante de reposição. Caso haja oferta no leilão, a distribuidora poderá contratar até o equivalente a meio por

cento da sua carga verificada no ano A-1, acima do montante de reposição. Os custos de aquisição de energia são repassados integralmente às tarifas.

Leilão de ajuste: Certame específico onde participam apenas empreendimentos de geração existentes. O início do fornecimento será em até 4 meses após a realização do leilão, com o prazo de suprimento de até 2 anos. O montante contratado não poderá exceder a 1% da carga contratada da distribuidora. O repasse às tarifas dos custos de aquisição da energia será integral, porém, limitado ao Valor de Referência (VR).

Geração distribuída: Contratação ocorre por meio de chamadas públicas, sem qualquer tipo de leilão. O montante contratado deve ser limitado a 10% da carga da distribuidora. O repasse às tarifas dos custos de aquisição da energia será integral, porém, limitado ao Valor de Referência (VR).

Ainda segundo o Decreto 5.163/2004, é previsto a implementação de um mecanismo de compensação de sobras e déficits (MCSD). As regras e procedimentos operacionais desta ferramenta estão a cargo da CCEE. O objetivo do MCSD é realizar a cessão ou aquisição de energia já contratada entre as distribuidoras, desta forma sobras são cedidas sem que haja um prejuízo por sobrecontratação, já os déficits são compensados sem a realização de novos leilões ou aplicações de penalidades à distribuidora envolvida. O MCSD é aplicado exclusivamente sobre os Contratos de Comercialização de Energia no Ambiente Regulado (CCEAR) na modalidade quantidade de energia de empreendimentos existentes, sendo que a participação de distribuidoras no MCSD é voluntária. As modalidades de MCSD abordadas neste artigo são:

Mensal: Compensações realizadas para todos os meses a partir da execução do MCSD. Seu processamento ocorre quando as distribuidoras declaram sobras de energia oriundas de, exercício por consumidores potencialmente livres da opção de compra de energia no ACL ou acréscimo na aquisição de energia elétrica decorrente de contratos firmados antes de 16/03/2004. As sobras não compensadas no MCSD Mensal poderão ser devolvidas ao agente vendedor, a critério exclusivo do agente de distribuição.

Anual 4%: O Decreto 5.163/2004 estabelece a possibilidade de redução de até 4% do montante de energia proveniente de empreendimentos existentes, a critério exclusivo do agente de distribuição. Contudo, antes de realizar esta devolução, esta sobra de energia é processada no MCSD Anual 4%. Nesta modalidade são consideradas apenas sobras decorrentes de outras variações de mercado. As compensações resultantes do MCSD Anual 4% terão vigência a partir do início do ano seguinte ao da declaração de sobras.

Trocas Livres: Modalidade processada quando um agente de distribuição declara sobras de energia provenientes de outros desvios de mercado. Todavia, as sobras não compensadas nesta modalidade não poderão ser devolvidas ao agente vendedor.

A modelagem matemática definida para estratégias de contratação de energia as possibilidades citadas nesta seção. O modelo proposto considera as incertezas na demanda de

energia elétrica. As incertezas são incluídas no problema por meio de variáveis Fuzzy. Logo, o planejamento da compra de energia proposto neste artigo e formulado como um problema de otimização não linear Fuzzy.

A lógica Fuzzy é uma maneira de representar parâmetros de forma intermediária, ou seja, ao contrário da lógica convencional (ou crisp) onde um dado valor implica se a informação é verdade ou não, na lógica Fuzzy existem verdades intermediárias, ou um grau de verdade. Para definir o grau de verdade faz-se uso de uma função de pertinência, que é uma função matemática cuja resposta varia entre 0 e 1 (0 a 100%) de acordo com o(s) valor(es) de entrada. A esta resposta que varia entre 0 e 1 dá-se o nome de grau de pertinência [14], [15].

III. FORMULAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA

Para melhor compreensão, o equacionamento matemático proposto neste artigo é dividido em duas partes, na primeira é realizada uma modelagem determinística do problema no curto prazo, para um horizonte de 5 anos e discretização mensal. Em uma segunda etapa, são inseridas na modelagem anterior as incertezas associadas ao consumo. Conforme foi mencionado na a seção II, a representação de incertezas será por meio de programação non-linear Fuzzy.

A) *Estratégia de Compra de Energia de Curto-prazo: Modelagem Determinística*

A análise de curto prazo tem o objetivo de aproximar o planejamento da contratação de energia ao consumo efetivamente realizado. A maior diferença em relação a modelos de longo prazo fica por conta da discretização de tempo com que a contratação é otimizada, no curto prazo os 5 anos analisados são discretizados mensalmente gerando ao todo 60 períodos de tempo, enquanto no longo prazo a discretização é anual, o que gera apenas 5 períodos de tempo. Os contratos provenientes dos leilões A-5 e A-3 terão prazo de vigência superior ao da análise e em função da necessidade de contratar tais fontes com 3 ou 5 anos de antecedência, estas contratações não serão otimizadas na pesquisa. Nesta modelagem de curto prazo será considerada uma estratégia definida com um ano de antecedência. Para o leilão A-1 e geração distribuída o prazo de vigência dos contratos será de 3 anos, no leilão de ajuste a vigência é de 2 anos [1].

A presença do Mecanismo de Compensação de Sobras e Déficit é a maior alteração entre os dois modelos elaborados. Previsto pelo Decreto 5.163/2004 e operacionalizado pela CCEE, o MCSD é representado como uma possibilidade para adquirir ou ceder energia ao longo dos períodos, sua modelagem matemática é baseada nas regras e procedimentos de comercialização, ambos elaborados pela CCEE [1]-[4].

Assim, neste artigo, as variáveis e fontes passíveis de contratação no modelo de curto prazo são: Leilões A-1, leilões de ajuste, geração distribuída, MCSD Anual 4%, MCSD Mensal e MCSD Trocas Livres. O problema da contratação de energia elétrica no ACR no curto prazo é descrito abaixo:

Minimizar

fob =

$$\begin{aligned} & \Omega \cdot (E_{A1}^t \cdot V_{L1} + E_{LAJ}^t \cdot V_{LAJ} + E_{GD}^t \cdot V_{GD} + \\ & E_{MCSD\ 4\% \text{ VENDA } y}^t \cdot V_{MCSD\ y} + E_{MCSD\ MENSAL \text{ VENDA } j}^t \cdot V_{MCSD\ j}) + \\ & (1 - \Omega) \cdot (E_{MCSD\ 4\% \text{ COMPRA } y}^t \cdot V_{MCSD\ y} + \\ & E_{MCSD\ MENSAL \text{ COMPRA } j}^t \cdot V_{MCSD\ j} + \\ & E_{MCSD\ TROCAS \text{ LIVRES } COMPRA\ k}^t \cdot V_{MCSD\ k} + \\ & E_{MCSD\ TROCAS \text{ LIVRES } VENDA\ k}^t \cdot V_{MCSD\ k}) \end{aligned} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$E_{contratada} + E_{existente} \geq PC \quad (2)$$

$$E_{contratada} + E_{existente} \leq 105\% \cdot PC \quad (3)$$

$$0 \leq E_{LAJ} \leq 1\% \cdot (E_{contratada} + E_{existente}) \quad (4)$$

$$0 \leq E_{GD} \leq 10\% \cdot PC \quad (5)$$

$$96\% \cdot \text{Montante}_{REPOSIC\tilde{A}O} \leq E_{A1} \leq \text{Montante}_{REPOSIC\tilde{A}O} + 0,5\% \cdot PC_{A-1} \quad (6)$$

$$0 \leq E_{MCSD\ 4\% \text{ COMPRA } y} \leq 4\% \cdot (E_{A1} + E_{A10})_{A-1} \quad (7)$$

$$0 \leq E_{MCSD\ 4\% \text{ VENDA } y} \leq 4\% \cdot (E_{A1} + E_{A10})_{A-1} \quad (8)$$

$$0 \leq E_{MCSD\ MENSAL \text{ VENDA } j} \leq \text{Energia da migração de consumidores para o ACL} \quad (9)$$

$$0 \leq E_{MCSD\ MENSAL \text{ COMPRA } j} \leq 2\% \cdot PC \quad (10)$$

$$0 \leq E_{MCSD\ TROCAS \text{ LIVRES } COMPRA\ k} \leq 2\% \cdot PC \quad (11)$$

$$0 \leq E_{MCSD\ TROCAS \text{ LIVRES } VENDA\ k} \leq 2\% \cdot PC \quad (12)$$

Onde:

$$\begin{aligned} E_{contratada} = & E_{A1} + E_{GD} + E_{LAJ} + E_{MCSD\ 4\% \text{ COMPRA}} + \\ & E_{MCSD\ MENSAL \text{ COMPRA}} + E_{MCSD\ TROCAS \text{ LIVRES } COMPRA} - \\ & E_{MCSD\ 4\% \text{ VENDA}} - E_{MCSD\ MENSAL \text{ VENDA}} - \\ & E_{MCSD\ TROCAS \text{ LIVRES } VENDA} \quad (\text{MWh}); \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} E_{existente} = & E_{A50} + E_{A30} + E_{A10} + E_{GD0} + E_{LAJ0} + E_{A5} + \\ & E_{A3} + EV; \end{aligned} \quad (14)$$

E_{existente}: Vetor de Energia existente (MWh), dimensão 12x1;

E_{A1}, **E_{LAJ}** e **E_{GD}**: Vetor de energia contratada em leilões A-1 e de ajuste e geração distribuída (MWh), dimensão 12x1;

V_{L1}, **V_{LAJ}** e **V_{GD}**: Vetor com o valor da energia em leilões A-1 e de ajuste e geração distribuída (R\$/MWh), dimensão 12x1;

PC: Vetor do consumo previsto para o período em análise (MWh), dimensão 12x1;

EV: Vetor de energia velha proveniente de contratos compulsórios (Itaipu e Proinfa), e contratos firmados até 16 de março de 2004 (MWh), dimensão 12x1;

Montante_{REPOSICÃO}: Vetor da energia a ser recontratada devido ao encerramento ou rescisão de contratos, ou da diminuição dos valores contratados de energia, (MWh), dimensão 12x1;

E_{MCSD}: Vetores com o montante de energia adquirido (compra) ou cedido (venda) por meio das modalidades de MCSD (Mensal, 4% e Trocas livres) para os períodos contidos nos índices “y”, “j” e “k”, (MWh), dimensão 12x1;

V_{MCSD} = Vetor com os valores da energia transacionada no MCSD (R\$/MWh). Este valor corresponde ao preço dos contratos de energia do agente cedente resultado de leilão, sendo este atualizado por meio do Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo – IPCA. É válido para os períodos contidos nos índices “y”, “j” e “k”, (MWh), dimensão 12x1; Índice “A-1” = Representa o valor de cada parâmetro no ano anterior ao da análise;

Ω = Aversão ao risco (0 a 100%), único para os 12 períodos analisados por vez.

Observa-se na modelagem apresentada, por simplicidade de tratamento de dados, são considerados apenas 12 períodos na modelagem. Assim são necessários 5 processos iterativos para determinar a estratégia completa de contratação completa ao longo dos 5 anos (60 meses), os resultados do primeiro ano são utilizados como dados de entrada para a contratação do segundo ano e assim sucessivamente

A Fig. 1 descreve o fluxograma do modelo proposto. Esta Figura apresenta de maneira simplificada, como o processo otimizado de contratação é realizada em um ano é contabilizada no ano seguinte. Em cada ano é necessário adquirir energia em leilões de maneira que em todos os 12 meses de cada ano, as restrições do problema sejam satisfeitas.

No ano seguinte, em cada mês é considerado como energia existente os montantes de energia ainda vigentes dos respectivos meses dos anos anteriores. Dessa forma existe uma dependência entre os mesmos meses de anos diferentes (ex: janeiro de 2015 com janeiro de 2016), porém, não existe dependência entre os meses dentro do mesmo ano (ex: janeiro e fevereiro de 2015).

B) Estratégia de Compra de Energia de Curto-prazo: Modelagem Fuzzy

Outra contribuição importante deste artigo diz respeito a sazonalização de contratos. Sazonalização significa a distribuição do volume anual de energia contratada para os meses do ano. Na prática esta etapa é definida entre os agentes vendedores e compradores. Neste artigo, a sazonalização dos contratos oriundos de geração distribuída e leilões A-1 e de ajuste é obtida indiretamente, isso acontece devido ao acoplamento utilizado entre os períodos. Por exemplo, após a contratação de energia para o mês de janeiro de 2017, no mês de fevereiro de 2016 a contratação realizada no mês anterior não é considerada. No entanto, em janeiro de 2017 a contratação depende do que já foi contratado em janeiro de 2016, ou seja, não existe uma dependência entre os meses dentro do mesmo ano, o que existe é uma dependência entre os mesmos meses de anos diferentes, é isso a forma correta de se modelar a sazonalização, segundo a legislação vigente.

As incertezas incluídas no planejamento de curto prazo são modeladas seguindo a mesma lógica utilizada no problema de longo prazo, baseados nos trabalhos apresentados em [5]-[10], no entanto, os parâmetros que incluem incertezas serão apenas o balanço de energia e o custo total da contratação.

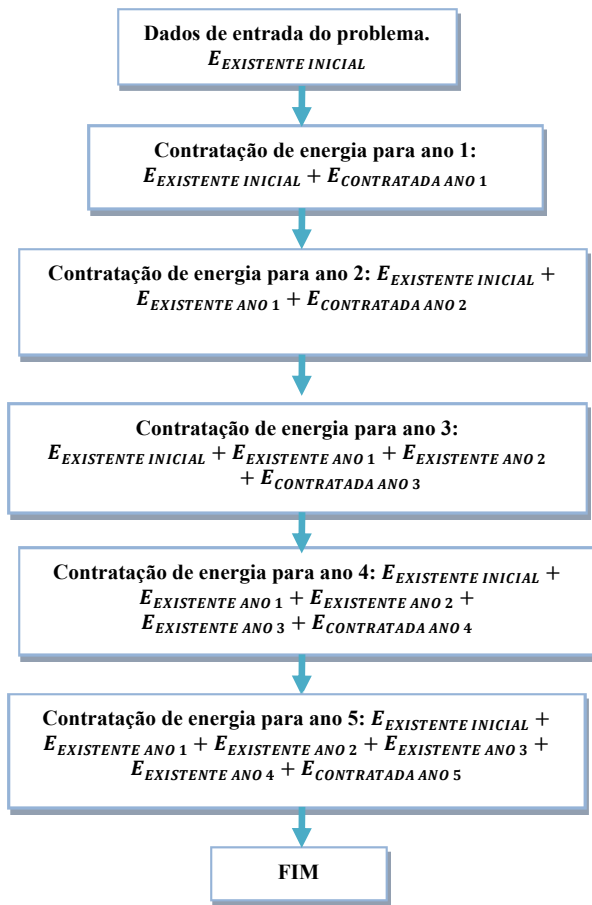


Figura 1. Modelo proposto de contratação de energia ao longo do horizonte de 5 anos.

As incertezas no consumo são incluídas na restrição de balanço de energia por período. O custo da contratação não será mais a função objetivo do problema, em função a inclusão da programação não linear fuzzy, o custo será minimizado indiretamente, ou seja, será uma restrição do problema. As funções de pertinência utilizadas serão do tipo trapezoidal e reta inclinada.

A função de pertinência representada na Fig. 2 é utilizada na representação das incertezas no consumo previsto, sendo descrita matematicamente por:

$$x + f(x) \cdot PC_{LS} \leq PC_S + PC_{LS} \quad (15)$$

$$x - f(x) \cdot PC_{Li} \geq PC_i - PC_{Li} \quad (16)$$

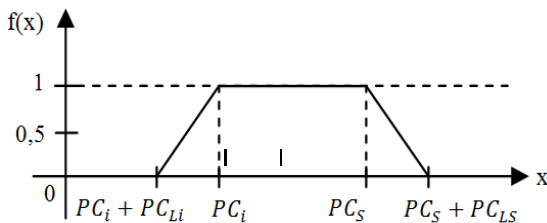


Figura 2. Função de pertinência trapezoidal.

A equação (17) descreve o comportamento de uma função de pertinência tipo reta inclinada, que será aqui utilizada na representação do custo total da contratação de energia, tal como mostrado na Fig. 3.

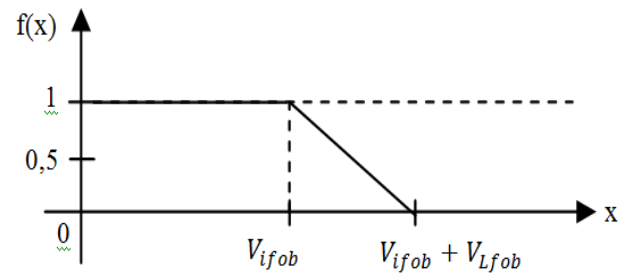


Figura 3. Função de pertinência tipo reta inclinada.

$$x + f(x) \cdot V_{Lfob} \leq V_{ifob} + V_{Lfob} \quad (17)$$

Todo processo que faz uso de lógica fuzzy necessita de um método para realizar a etapa de defuzzificação. Esta etapa originalmente tem a função de transformar o resultado linguístico em numérico, que é desejado. Na presente formulação a defuzzificação representa a maneira como o problema será otimizado. Para operacionalizar este mecanismo as funções matemáticas que contém incertezas são associadas por meio de uma variável λ , que será o grau de pertinência do problema. Para realizar a defuzzificação é então utilizado o método do máximo grau de pertinência, que consiste na maximização do grau de pertinência (λ). Logo, o problema agora passa a ser de maximização [13], [15].

A descrição do problema da contratação de energia no curto prazo com incertezas fica:

$$\text{Maximizar } \lambda \quad (18)$$

Sujeito a:

$$E_{contratada} + E_{existente} + \lambda \cdot PC_{LS} \leq PC_S + PC_{LS} \quad (19)$$

$$E_{contratada} + E_{existente} - \lambda \cdot PC_{Li} \geq PC_i - PC_{Li} \quad (20)$$

$$E_{contratada} + E_{existente} \geq PC \quad (21)$$

$$E_{contratada} + E_{existente} \leq 105\% \cdot PC \quad (22)$$

$$0 \leq E_{LAJ} \leq 1\% \cdot (E_{contratada} + E_{existente}) \quad (23)$$

$$0 \leq E_{GD} \leq 10\% \cdot PC \quad (24)$$

$$96\% \cdot \text{Montante}_{\text{REPOSIÇÃO}} \leq E_{A1} \leq \text{Montante}_{\text{REPOSIÇÃO}} + 0,5\% \cdot PC_{A-1} \quad (25)$$

$$0 \leq E_{MCSD \ 4\% \ COMPRA \ y} \leq 4\% \cdot (E_{A1} + E_{A10})_{A-1} \quad (26)$$

$$0 \leq E_{MCSD \ 4\% \ VENDA \ y} \leq 4\% \cdot (E_{A1} + E_{A10})_{A-1} \quad (27)$$

$$0 \leq E_{MCSD \ MENSAL \ VENDA \ j} \leq \text{Energia da migração} \quad (28)$$

$$\text{de consumidores para o ACL} \quad (28)$$

$$0 \leq E_{MCSD \ MENSAL \ COMPRA \ j} \leq 2\% \cdot PC \quad (29)$$

$$0 \leq E_{MCSD \ TROCAS \ LIVRES \ COMPRA \ k} \leq 2\% \cdot PC \quad (30)$$

$$0 \leq E_{MCSD \ TROCAS \ LIVRES \ VENDA \ k} \leq 2\% \cdot PC \quad (31)$$

$$fob \ 3 + \lambda \cdot V_{Lfob} \leq V_{ifob} + V_{Lfob} \quad (32)$$

$$0 \leq \lambda \leq 1 \quad (33)$$

Onde:

$$fob3 = \Omega \cdot (fob1) + (1 - \Omega) \cdot (fob2) \quad (34)$$

$$\begin{aligned} fob1 = & E_{A1}^t \cdot V_{L1n} + E_{LAJ}^t \cdot V_{LAJ} + E_{GD}^t \cdot V_{GD} + E_{MCSD \ 4\% \ VENDA \ y}^t \cdot V_{MCSD \ y} + \\ & E_{MCSD \ MENSAL \ VENDA \ j}^t \cdot V_{MCSD \ j} \end{aligned} \quad (35)$$

$$\begin{aligned} fob2 = & E_{MCSD \ 4\% \ COMPRA \ y}^t \cdot V_{MCSD \ y} + E_{MCSD \ MENSAL \ COMPRA \ j}^t \cdot V_{MCSD \ j} + \\ & E_{MCSD \ TROCAS \ LIVRES \ COMPRA \ k}^t \cdot V_{MCSD \ k} + \\ & E_{MCSD \ TROCAS \ LIVRES \ VENDA \ k}^t \cdot V_{MCSD \ k} \end{aligned} \quad (36)$$

O equacionamento acima mostra a presença das funções de pertinência adotadas e o acoplamento entre restrições por meio do parâmetro λ . O problema continua sendo de minimização do custo da contratação de energia, no entanto, este objetivo principal é determinado indiretamente, já que agora a função objetivo do problema é λ , que deverá ser maximizado. Uma maior proximidade de λ do valor unitário irá reduzir as incertezas [14]. O custo da contratação está agora representado por uma restrição do problema. Em [14] os autores comparam as diferenças nos resultados de acordo com o método de defuzzificação utilizado, desta forma, caso outros métodos sejam utilizados a resposta do problema irá sofrer alterações.

IV. TESTES E RESULTADOS

O problema de otimização proposto foi resolvido com a advenção da ferramenta “solver” do Microsoft Office Excel que utiliza o código de otimização não-linear de gradiente reduzido genérico (GRG2). Para testar a modelagem proposta são realizadas contratações para dois cenários diferentes de consumo.

Nos casos 1 e 2 a contratação é realizada no início do ano de 2016. Em ambos os casos o fator de aversão ao risco Ω será de 5%.

A) Caso 1

No caso 1 é considerado que o consumo cresce a uma taxa entre 4 e 5,5% ao ano (entre os anos de 2016 e 2020). Este cenário representa um mercado de energia elétrica em franca expansão e sem a incidência de grandes eventos que ocasionem variações no consumo, tais como crises econômicas ou até mesmo um racionamento de energia.

Os dados da Tabela I contemplam previsões de consumo, preços de energia, energia já contratada e montante de reposição. Os campos em branco serão definidos no processo de otimização. Assume-se que os preços inseridos na tabela foram baseados em leilões que já ocorreram e tiveram seus resultados homologados. Observa-se quanto a geração distribuída que, dentre as fontes que não representam risco, esta é a mais custosa, tal fato reflete a realidade, pois as chamadas fontes incentivadas têm um custo unitário de geração mais elevado. Com base na Tabela 1 será determinado para os 5 anos observados os montantes de contratação nos leilões A-1 e de ajuste, bem como a compra de geração distribuída. Nota-se que dados dos anos 2014 e 2015, são dados de entrada, ou já conhecidos.

A Tabela II contém os limites das funções de pertinência utilizadas nas 5 simulações para o caso 1. Estes limites definem a influência de incertezas no processo e devem ser escolhidos cuidadosamente. O montante total a ser contratado deverá estar sempre entre a faixa de 100 a 105% do consumo previsto para o respectivo período. Este limite foi definido para evitar prejuízos por sub ou sobrecontratação, sendo que entre 100,8% e 101,5% o grau de pertinência foi considerado igual a 1, assim dentro desta segunda faixa considera-se que a contratação foi satisfatória e inclui uma margem de segurança de 0,8% quanto a subcontratação e de 1,5% para sobrecontratação.

Observam-se na Tabela II os limites estabelecidos para a função de pertinência do custo para a contratação anual. A Discrepância entre os valores para cada ano mostra uma das dificuldades na aplicação da formulação proposta, já que a escolha de tais limites a aplicação de algum método adicional.

Na presente pesquisa tais limites foram obtidos empiricamente através de testes. A estratégia de contratação para o caso 1 está mostrada na Fig. 4.

Com os resultados para a contratação é verificado que para todos os cenários houve a incidência de sobrecontratação, esse fenômeno se deve aos limites da função de pertinência utilizada para o consumo. Ressalta-se, entretanto, que em nenhum dos 60 períodos a sobrecontratação passou de 105%, o máximo atingido foi de 102,19% nos períodos 26 e 31. Este fato acontece devido às grandes variações no consumo. Os períodos 26 e 31 são onde ocorrem as maiores variações no consumo previsto em relação ao período anterior. O resultado da contratação obtida revela que é mais barato manter a sobrecontratação nestes períodos do que acompanhar o consumo previsto.

TABELA I. DADOS DE ENTRADA DO PROBLEMA.

Parâmetros	Horizonte de Tempo Considerado						
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Energia Velha (MWh)	33800	34000	33500	31500	32000	32000	33000
EA50 (MWh)	200	300	200	500	400	1000	1500
EA30 (MWh)	300	350	300	350	600	700	0
EA10 (MWh)	300	400					
EAjuste0 (MWh)	500	150					
EGD0 (MWh)	200	400					
Montante de reposição (MWh)	300	400	3000	2.800	2800	3000	3000
Previsão de consumo (MWh)	35000	37000	41000	42640	44985	47460	49357
VL5 (R\$/MWh)	80	76	80	83	79	78	70
VL3 (R\$/MWh)	100	95	103	105	96	95	98
VL1 (R\$/MWh)	80	77	80	77,00	77	79	74
VLAJ (R\$/MWh)	132	128	109	112	105	105	106
VGD (R\$/MWh)	150	144	126	129	122	122	123

TABELA II. PARÂMETROS LIMITES DAS FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA ADOTADAS.

Parâmetros	Horizonte de Tempo Considerado				
	2016	2017	2018	2019	2020
PC_{Li} (R\$/MW)	0,8%. PCn	0,8%. PCn	0,8%. PCn	0,8%. PCn	0,8%. PCn
PC_i (R\$/MW)	100,8%. PCn	100,8%. PCn	100,8%. PCn	100,8%. PCn	100,8%. PCn
PC_s (R\$/MW)	101,5%. PCn	101,5%. PCn	101,5%. PCn	101,5%. PCn	101,5%. PCn
PC_{Ls} (R\$/MW)	1,5%. PCn	1,5%. PCn	1,5%. PCn	1,5%. PCn	1,5%. PCn
V_{ifob}	20.000,00	10.000,00	8.000,00	20.000,00	9.000,00
V_{lfob}	7.000,00	7.000,00	5.000,00	10.000,00	10.000,00

Ao longo dos 60 períodos o MCS D foi acionado em 5 deles, sendo o MCS D 4% processado duas vezes (ambas para cessão de energia) e o MCS D Mensal processado por três vezes (todas para cessão).

Na Tabela III consta a participação de cada fonte de contratação em relação ao total contratado. A participação de leilões A-5 é crescente ao longo dos anos, o que ocorre por ser uma fonte de baixo custo. Dentre as contratações otimizadas, os leilões A-1 respondem pela maior parcela, o que se deve à necessidade de recontratar no mínimo 96% do montante de reposição. Nota-se também que apesar de ser uma fonte de alto custo a geração distribuída foi inserida com sucesso na estratégia de contratação, chegando a participar com quase 5% do total contratado (em 2016).

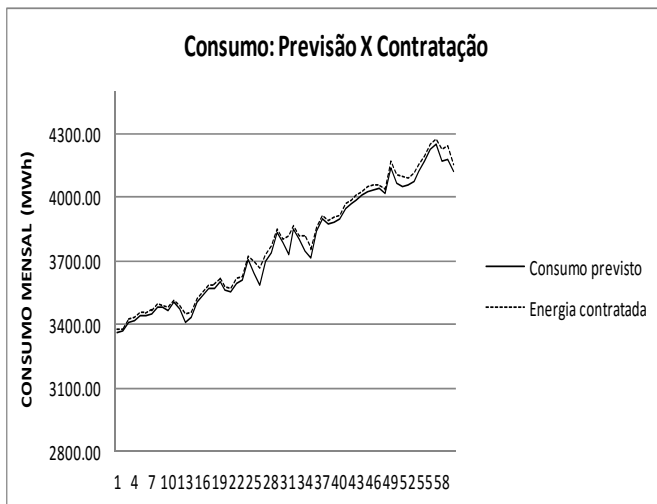


Figura 4. Energia prevista versus contratada para os períodos em análise (MWh) – Caso 1.

Por fim, a Fig. 5 mostra o custo da energia contratada ao longo dos 60 períodos. Nesta figura a influência do prazo de vigência dos contratos é notada no ano de 2019. No cenário 37 (ou janeiro de 2019) é verificado o início de um incremento no custo da contratação. Tal fato ocorre devido aos contratos oriundos de geração distribuída e leilão A-1, que foram pactuados em 2016. Em função de tais contratos terem prazos de vigência de três anos, ao final de 2018 os mesmos são

encerrados, sendo então necessário recontratar a energia correspondente a estes contratos.

TABELA III. CONTRATAÇÃO DE ENERGIA VIGENTE POR ANO E FONTE DE AQUISIÇÃO (%).

Variáveis	Períodos Analisados				
	2016	2017	2018	2019	2020
A-5 (%)	1,69	2,80	3,52	5,45	8,21
A-3 (%)	2,29	3,03	4,18	5,45	5,20
A-1 (%)	9,37	15,14	17,86	17,11	16,35
Ajuste (%)	1,00	0,83	0,38	1,00	0,87
Geração distribuída (%)	4,90	4,78	3,68	3,88	3,32
Energia velha (%)	80,76	73,43	70,39	67,10	66,05

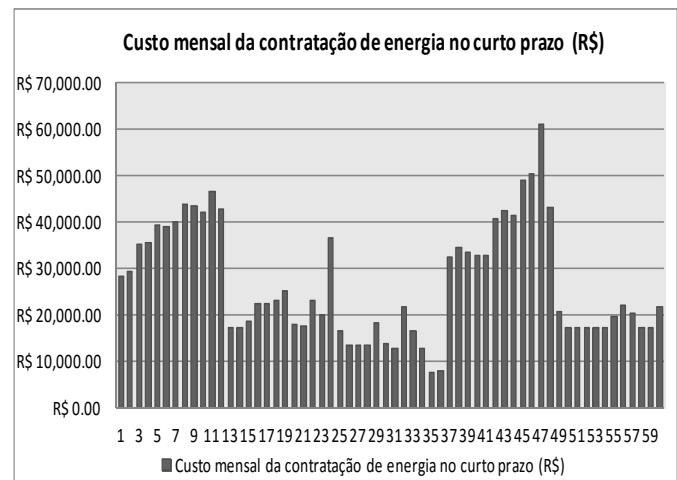


Figura 5. Custo mensal da contratação de energia (R\$).

B) Caso 2

O caso 2 evidencia um mercado de energia elétrica com baixo crescimento, entre 0 e 2,5% ao ano, sendo que entre o terceiro e quarto ano o crescimento é zero. Este cenário leva a uma necessidade de baixa contratação e de grande atenção às pequenas variações, pois o planejamento não está considerando um crescimento no consumo significativo.

Na Tabela IV constam os dados de entrada do problema para o caso 2. Considerando os dados de entrada do problema apresentado na Tabela IV, a estratégia de contratação para o caso 2 está mostrada na Fig. 6.

Pela Fig. 6 é possível verificar a diferença quanto ao caso 1 em relação ao consumo previsto, que desta vez apresenta um crescimento pequeno e irregular. A contratação acompanhou a previsão corretamente até o fim do segundo ano analisado (período 24), a partir do terceiro ano nota-se uma irregularidade na contratação. Estas variações na previsão provocaram sobrecontratações nos anos de 2018 e 2020.

A utilização do MCS D foi intensa em 2018 e 2020, atingindo 12 processamentos em 2018 e 5 em 2020. Estas

utilizações comprovam a importância do MCSD na mitigação de riscos de sub e sobrecontratações que impliquem em prejuízo para a distribuidora.

TABELA IV. DADOS DE ENTRADA DO PROBLEMA

Parâmetros	Horizonte de Tempo Considerado						
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Energia Velha (MWh)	33800	34000	33500	31500	32000	32000	33000
EA50 (MWh)	200	300	300	300	300	400	400
EA30 (MWh)	300	350	200	200	200	250	0
EA10 (MWh)	300	400					
EAdjuste0 (MWh)	500	150					
EGD0 (MWh)	200	400					
Montante de reposição (MWh)	300	400	2500	2500	2500	2500	2500
Previsão de consumo (MWh)	35000	37000	41000	41820	42865	42865	43294
VL5 (R\$/MWh)	80	76	80	83	79	78	70
VL3 (R\$/MWh)	100	95	103	105	96	95	98
VL1 (R\$/MWh)	80	77	80	77,00	77	79	74
VL AJ (R\$/MWh)	132	128	109	112	105	105	106
VGD (R\$/MWh)	150	144	126	129	122	122	123

A Tabela V contém os limites das funções de pertinência utilizadas nas 5 simulações para o caso 2.

TABELA V. PARÂMETROS LIMITES DAS FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA ADOTADAS

Parâmetros	Horizonte de tempo considerado				
	2016	2017	2018	2019	2020
PC_{Li} (R\$/MWh)	0,8%. PCn	0,8%. PCn	0,8%. PCn	0,8%. PCn	0,8%. PCn
PC_i (R\$/MWh)	100,8%. PCn	100,8%. PCn	100,8%. PCn	100,8%. PCn	100,8%. PCn
PC_s (R\$/MWh)	101,5%. PCn	101,5%. PCn	101,5%. PCn	101,5%. PCn	101,5%. PCn
PC_{Ls} (R\$/MWh)	1,5%. PCn	1,5%. PCn	1,5%. PCn	1,5%. PCn	1,5%. PCn
V_{llob} (R\$)	20.000,00	10.000,00	8.000,00	8.000,00	8.000,00
V_{Llob} (R\$)	7.000,00	7.000,00	5.000,00	7.000,00	5.000,00

Na Tabela VI aparecem as participações de cada fonte no total contratado. Em função de um consumo menor previsto ao longo dos anos, a fonte “Energia velha” reduz sua participação de maneira mais tímida e lenta.

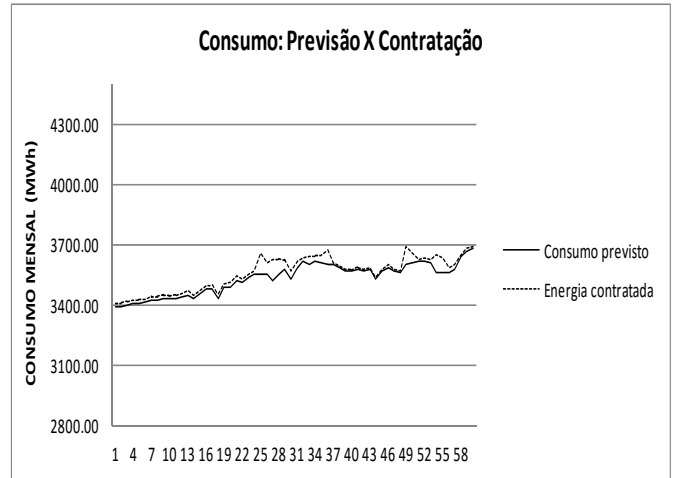


Figura 6. Energia prevista versus contratada para os períodos em análise (MWh) – Caso 2.

TABELA VI. CONTRATAÇÃO DE ENERGIA VIGENTE POR ANO E FONTE DE AQUISIÇÃO (%)

Variáveis	Períodos Analisados				
	2016	2017	2018	2019	2020
A-5 (%)	1,94	2,62	3,21	4,20	5,04
A-3 (%)	2,06	2,50	2,87	3,50	3,44
A-1 (%)	8,21	13,69	15,91	16,24	14,64
Ajuste (%)	1,00	0,94	0,30	0,72	0,78
Geração distribuída (%)	5,49	5,37	4,26	0,68	0,45
Energia velha (%)	81,29	74,90	73,44	74,66	75,65

Já os contratos oriundos de geração distribuída tiveram participação maior no caso 2, chegando a quase 5,5% do total contratado.

Na Fig. 7 o aumento no custo da contratação em 2016, devido a recontração dos contratos de GD e leilão A-1 de 2016, desta vez também é menor em comparação com o caso 1.

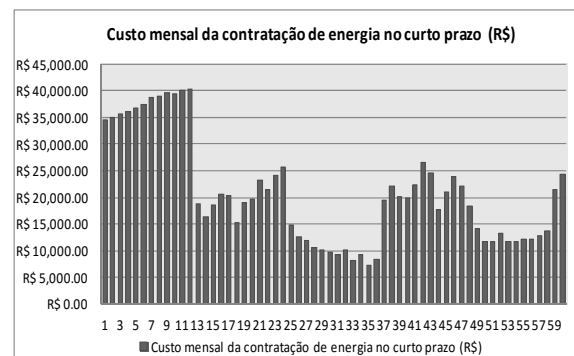


Figura 7. Custo mensal da contratação de energia (R\$).

V. CONCLUSÃO

Foi apresentada neste artigo uma metodologia que tem por objetivo aproximar as simulações computacionais da realidade enfrentada pelos agentes de distribuição no Brasil. A análise com desratização em base mensal possibilita um acompanhamento da contratação de energia em relação ao consumo previsto com maior grau de precisão. Tal fato, aliado a inclusão de incertezas nas previsões de consumo e à presença do Mecanismo de Compensação de Sobras e Déficit (MCSO) ajuda as distribuidoras a decidir quais ações tomar frente a cenários imprevisíveis em seu mercado de energia elétrica.

A inclusão de incertezas através de lógica fuzzy possibilitou uma elaboração robusta e sem grandes complicações.

Os resultados obtidos são satisfatórios no tocante ao objetivo da pesquisa que foi desenvolver uma estratégia para contratação de energia ao menor custo possível. Outro ponto a ser considerado é a presença de geração distribuída (GD), que apesar de na prática a contratação desta fonte por agentes de distribuição ser mínima, a GD mostrou-se competitiva no ACR mesmo com um preço mais caro que as demais fontes.

Como contribuição adicional deste artigo, a modelagem desenvolvida gerou também a sazonalização dos contratos oriundos de leilões A-1, de Ajuste e de chamadas públicas de geração distribuída.

Devido a construção do modelo matemático adotado, o processo de otimização gerou indiretamente a sazonalização dos montantes adquiridos, sendo possível inferir em todos os 60 períodos otimizados quais os montantes de energia vigentes e por fonte de contratação.

Por ser uma fonte de menor porte, a GD perde competitividade devido ao alto custo de geração (prejudicado pela falta de economia de escala), estes valores podem inviabilizar a contratação de energia pela distribuidora interessada, neste caso existe uma necessidade de incentivo à GD para que esta fonte aumente a participação no pool de contratos das distribuidoras.

Por fim, mesmo com uma análise e interpretação adequada da legislação vigente, algumas situações não podem facilmente ser previstas no planejamento da contratação de energia elétrica. Fatores como a variação no consumo previsto levam a alterações na estratégia de maneira a readequar o montante contratado. Alterações na legislação vigente integram os riscos regulatórios, que também levam as distribuidoras a adequar-se às novas regras.

Existem ainda questões associadas ao agente de geração envolvido, como no caso de atraso da entrada em operação comercial de usinas, cujas causas vão desde problemas ambientais até legais, e desta forma não conseguem entregar energia no prazo previsto, assim as distribuidoras envolvidas ficam sem lastro do consumo.

REFERÊNCIAS

[1] BRASIL. Decreto nº 5.163 de 30 de julho de 2004. Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras

- providências. Disponível em: www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/decreto/d5163.htm. Acesso: 01/02/2015.
- [2] BRASIL. Lei nº 10.848 de 15 de março de 2004. Dispõe sobre a comercialização de energia elétrica, e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/lei/110.848.htm.
- [3] CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA – CCEE. Procedimentos de Comercialização. Disponível em: www.ccee.org.br. Acesso: 01/02/2015.
- [4] CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA – CCEE. Regras de Comercialização. Disponível em: www.ccee.org.br. Acesso: 01/02/2015.
- [5] SOUZA, F. C. de. “Dinâmica da Gestão de Riscos no Ambiente de Contratação Regulada do Setor Elétrico Brasileiro”. Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ, Brasil, 2008.
- [6] RAMOS, D. S., SUSTERAS, G. L. Utilização de Algoritmos Genéticos para Previsão da Contratação de Energia pelas Distribuidoras. IEEE Latin America Transactions, v.4, n. 4, 2006.
- [7] GUIMARAES, A. R. Estratégia de contratação das distribuidoras em leilões de energia sob incerteza na demanda. Dissertação de Mestrado, PUC-RJ, Fev. 2006.
- [8] DIAS, I. V. “Estratégias de Gestão de Compra de Energia Elétrica para Distribuidoras no Brasil”. Dissertação de Mestrado, PPGE/UFRJ, Brasil, 2007.
- [9] LAZO, J. G. L.; FIGUEIREDO, K.; LIMA, D. A. “Sistema Inteligente de Contratação de Energia Elétrica no Curto Prazo”. XVIII Congresso Brasileiro de Automática, Brasil, 2010.
- [10] PSR. “Modelo de Estratégias de Contratação para Distribuidoras – Módulo ESTD Versão 5.1, Manual do Usuário”. 2010a.
- [11] PSR. “Modelo de Estratégias de Contratação para Distribuidoras no Curto Prazo – Módulo ESTD-CP Versão 1.0.1, Manual do Usuário”. 2010b.
- [12] Wachsmuth G. M., Avaliação Da Estratégia De Contratação De Energia No Ambiente Regulado Frente Ao Atual Arcabouço Regulatório, COPPE/UFRJ, Junho, 2014.
- [13] CAPANO RODRIGUES, F. F. Programação da Contratação de Energia considerando Geração Distribuída no novo modelo do setor elétrico brasileiro. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Mar.2006.
- [14] F. A. C. Gomide, R. R. Gudwin, e Ricardo Tanscheit. Conceitos fundamentais da teoria de conjuntos fuzzy, lógica fuzzy e aplicações. Sixth International Fuzzy Systems Association World Congress/ Tutorial - IFSA95, pag. 01 – 38. July 1995.
- [15] SILVA, R. C.; CANTÃO, L. A. P.; YAMAKAMI, A. “Métodos Iterativos para Problemas de Programação Matemática com Incertezas”. XXXVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Brasil, 2005.



Clodomiro Unsihuay Vila, Possui Graduação em Engenharia Elétrica pela Universidad Nacional del Centro del Peru (2000), Revalidado pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Maranhão, Brasil (2003), Doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá, Brasil (2009), Doutorado Sanduiche em Engenharia Elétrica na Pontificia Universidad Comillas de Madrid, Espanha (2007-2008). Atualmente é Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Paraná, também é membro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Paraná PPGE-UFRJ. Atualmente, vem desenvolvendo pesquisas nos seguintes temas: (i) Análise e Planejamento da Operação/Expansão de Sistemas Elétricos de Potência no contexto das Cidades Inteligentes e Redes Elétricas Inteligentes- Smart Grids; (ii) Energias Renováveis e Regulação/Comercialização de Energia Elétrica.



Gustavo Perondi é graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), Foz de Iguaçu, Brasil, em 2008. Obteve o título de Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Paraná, Brasil, em 2013. Atualmente trabalha como Engenheiro Eletricista na Companhia Paranaense de Energia (COPEL) onde desenvolve trabalhos de comercialização e gestão de projetos de conexão de usinas, e consumidores conectados em tensão igual ou maior a 69 kV, no sistema elétrico de distribuição.