



## XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2008 - 06 a 10 de outubro

Olinda - Pernambuco - Brasil

### Aplicação da Teoria de Conjuntos Difusos para Determinação do Risco de Contratação dos Agentes de Distribuição no Ambiente de Contratação Regulado - ACR

**Jonas Linhares Melo**  
CELG Distribuição S/A – CELG D  
jonas.lm@celg.com.br

#### Palavras-chave

Contratação de energia elétrica  
Ambiente de Contratação Regulado – ACR  
Análise de risco  
Conjuntos difusos (*fuzzy sets*)

#### Resumo

O presente artigo tem como objetivo principal apresentar uma metodologia de cálculo dos riscos de subcontratação e sobrecontratação das empresas de distribuição brasileiras baseada na teoria de conjuntos difusos. A necessidade de se determinar os riscos de contratação surgiu como novo marco regulatório do setor elétrico nacional quando passou a se exigir dos agentes de distribuição a contratação de todo o seu mercado, estabelecendo penalidade e limites de repasse para a tarifa caso a empresa estivesse subcontratada ou excessivamente sobrecontratada.

A principal razão da escolha da teoria dos conjuntos difusos ou nebulosos (*fuzzy*) para solução do problema foi a sua capacidade de lidar com graus de incerteza, subjetivismos e até mesmo incomensurabilidades de modo relativamente simples.

A proposta deste trabalho é apresentar uma ferramenta capaz de calcular os riscos inerentes à contratação de modo simples sem a necessidade de aplicação de cálculos sofisticados nem do desenvolvimento de sistemas computacionais específicos para a tarefa proposta.

Esta metodologia pode ser aplicada para obtenção do risco de uma carteira de contratos já definida, como é o estudo de caso aqui apresentado ou no auxílio da definição dos montantes a serem contratados nos próximos leilões, com a minimização dos riscos envolvidos.

#### 1. Introdução

Neste artigo são apresentadas de forma sucinta as principais regras de contratação de energia elétrica, introduzidas pelo novo marco regulatório do Setor Elétrico Brasileiro, definidas pela Lei nº 10.848, de 16/03/2004, que exige que as distribuidoras contratem a totalidade de seu mercado, concentrando-se nos limites de contratação e de repasse e nas penalidades definidos na Lei e respectivo regulamento. Maior parte do desenvolvimento do texto é dedicada à avaliação e quantificação do risco, com especial atenção para a teoria de conjuntos difusos aplicada na determinação do risco na forma difusa. Para mostrar a aplicabilidade da proposta metodológica foi desenvolvido um estudo de caso com base nos dados de mercado e da carteira de contratos da CELG logo após a realização do primeiro leilão de energia elétrica proveniente de empreendimentos existentes ocorrida em dezembro de 2004. Para

validação do modelo, os resultados obtidos no estudo de caso, foram comparados com os resultados obtidos por outra metodologia, que consistiu na análise estatística de um grande número de séries sintéticas equiprováveis de mercado. A comparação mostrou que as duas metodologias apontaram para a mesma tendência de risco, validando, portanto, o modelo proposto.

Finalizando, os resultados obtidos indicaram que a metodologia proposta foi capaz de calcular os riscos inerentes à contratação de modo relativamente simples, e que, além de ser aplicada para obtenção do risco de uma carteira de contratos já definida, ela pode ser empregada no auxílio da definição dos montantes a serem contratados nos próximos leilões, com foco na minimização dos riscos envolvidos.

## **2. Contratação de energia elétrica no Ambiente de Contratação Regulado - ACR**

No atual modelo regulatório do Setor Elétrico Brasileiro, os agentes de distribuição estão obrigados a contratar a totalidade de seu mercado consumidor com cinco anos de antecedência. Caso o agente contrate menos que seu mercado este sofre penalização. Porém o distribuidor não está livre para contratar qualquer valor acima de seu mercado, ao estar sobrecontratado o montante de energia que excede ao mercado é comercializado na Câmara de Comercialização de Energia Elétrica - CCEE (mercado *spot*) ao Preço de Liquidação das Diferenças – PLD, antes conhecido como preço MAE (preço *spot*), caso o preço *spot* seja inferior ao preço médio dos contratos, haverá prejuízo para o agente de distribuição, para evitar este prejuízo é permitido o repasse desta diferença para a tarifa final, porém existe uma limitação do valor que pode ser repassado, este limite é de 3% do mercado consumidor da distribuidora. O que for contratado acima deste limite não é repassado à tarifa, no caso em que o contrato esteja mais valorizado que o PLD, a empresa terá que absorver a diferença entre o preço de contrato e o preço do mercado *spot*. Na situação inversa, ou seja, o PLD ser maior que o preço médio dos contratos, haverá lucro na venda do excedente de energia no mercado *spot*, neste caso o ganho não é do distribuidor, ele é transferido para o consumidor final na forma de redução do índice tarifário, ou seja, contribui com a modicidade tarifária.

Com a obrigação de contratação antecipada de energia elétrica por um horizonte de cinco anos de antecedência, a previsão de mercado passa a ser um elemento crítico para a determinação dos montantes a serem contratados futuramente. O desvio que ocorrer entre os valores previstos e realizados do mercado pode levar a uma situação de sobrecontratação ou subcontratação que acarretarão em prejuízos para a distribuidora.

A probabilidade de ocorrer prejuízo para a empresa, seja por subcontratação ou sobrecontratação será tratada neste artigo como sendo o risco, cuja metodologia de cálculo será proposta.

## **3. Avaliação de riscos**

O processo de previsão de mercado de energia elétrica de uma distribuidora, pela sua complexidade e abrangência, envolve graus de incerteza, subjetivismos e até mesmo incomensurabilidades. Existe, entretanto, a necessidade de introduzir mecanismos capazes de lidar com este caráter impreciso. Dentre as metodologias apropriadas para lidar com este caráter impreciso, a teoria dos conjuntos difusos ou nebulosos (*fuzzy*) tem se mostrado adequada.

As incertezas que envolvem as atividades humanas implicam em riscos, entendendo-se por risco a probabilidade ou possibilidade da ocorrência de situações indesejáveis ou adversas. Assim, as incertezas propiciam a convivência, inevitável, com o risco, convivência esta que precisa ser explicitada para identificação e mensuração da intensidade do risco, e se possível, sua prevenção, minimização ou mitigação. A análise de risco compreende, de forma geral quatro etapas (GALVÃO & VALENÇA, 1999):

- identificação dos riscos;

- quantificação dos riscos;
- minimização dos riscos;
- remediação dos efeitos dos riscos.

Este trabalho se concentra na fase de quantificação dos riscos.

### 3.1. Risco probabilístico

A análise do risco da contratação envolve duas variáveis: o montante contratado  $C$  e o mercado consumidor da concessionária  $M$ . O que se deseja é que sempre  $C$  seja igual a  $M$ , como nem sempre isto será possível, é mais plausível que se deseje que a contratação  $C$  seja superior ou igual ao mercado  $M$  e inferior ou igual a 103% de  $M$ , ou seja,  $C \geq M$  e  $C \leq 1,03 \cdot M$ . Desta forma identificamos dois tipos de risco: o risco de subcontratação e o risco de sobrecontratação. Sendo  $M$  uma variável aleatória, o risco probabilístico será:

$$R_{sub} = P ( C < M ) \quad (1)$$

$$R_{sobre} = P ( C > 1,03 \cdot M ) \quad (2)$$

Onde:

$R_{sub}$  é o risco probabilístico de subcontratação;

$R_{sobre}$  é o risco probabilístico de sobrecontratação;

$P(x)$  é a função probabilidade, ou seja, a probabilidade da ocorrência de  $x$ .

Resultados idênticos são obtidos se considerarmos apenas o índice de contratação, definido como sendo:

$$Ic = \frac{C-M}{M} \quad (3)$$

Como  $Ic$  é função de  $C$  e  $M$  e  $M$  é uma variável aleatória  $Ic$  também será uma variável aleatória. A partir de  $Ic$  podemos redefinir, em função de  $Ic$ , os riscos de sub e sobrecontratação, conforme apresentado a seguir:

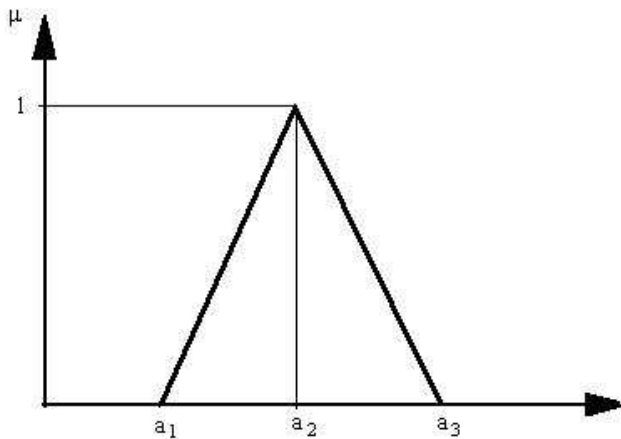
$$R_{sub} = P ( Ic < 0 ) \quad (4)$$

$$R_{sobre} = P ( Ic > 0,03 ) \quad (5)$$

### 3.2. Risco difuso

O conceito de conjuntos difusos (*fuzzy sets*) foi proposta como uma generalização da teoria clássica dos conjuntos, onde cada elemento tem uma pertinência que vale 0 ou 1, que quer dizer que o elemento pertence ou não ao conjunto. Um conjunto difuso permite diversos graus de pertinência ( $\mu$ ) que é definido no intervalo [0,1]. Quando um conjunto difuso representa um valor numérico é denominado número difuso. Os números difusos geralmente são representados por funções de pertinência triangulares (ROSS, 1997), definidos pela equação (6) e representada pelo Gráfico 1.

$$A = ( a_1, a_2, a_3 ) \quad (6)$$



**Gráfico 1** - Número Difuso.

Outra abordagem para cálculo do risco é considerar  $Ic$  como um número difuso, incorporando as incertezas de suas estimativas através da teoria de conjuntos difusos, onde o risco difuso pode ser definido como etapas (GALVÃO & VALENÇA, 1999):

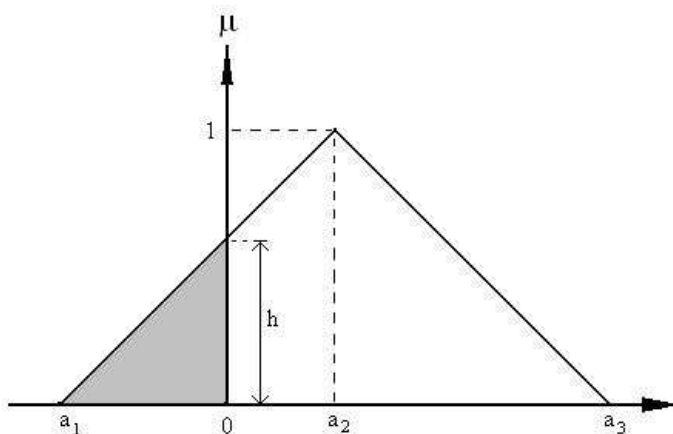
$$Rd = \frac{\int_{M < 0} \mu(m) dm}{\int_M \mu(m) dm} \quad (7)$$

Onde:

$Rd$  é o risco difuso e

$\mu(m)$  é a função de pertinência da variável  $m$ .

Em outras palavras, a equação (7) de cálculo do risco difuso é a relação entre a área sob a função de pertinência correspondente a valores menores que uma dada referência e a área total do triângulo do número difuso. No Gráfico 2 o risco do número difuso  $A$  ser menor que zero será a relação entre a área do número difuso onde os valores são negativos, representada pela área cinza do Gráfico 2 e a área total do triângulo do número difuso com vértices  $(a_1, 0)$ ,  $(a_2, 1)$  e  $(a_3, 0)$ .



**Gráfico 2** - Risco Difuso.

### 3.3. Modelagem do número difuso – índice de contratação – Ic

O índice de contratação é calculado pela equação (3) em função do montante contratado  $C$  e do mercado consumidor  $M$ , em MWh ou MW médios. O mercado consumidor é uma série estimada de valores esperados para o futuro, estando portanto sujeito a variações decorrentes das incertezas das premissas assumidas quando da determinação da previsão do mercado, premissas como crescimento econômico, crescimento demográfico, renda per capita e elasticidade PIB/consumo de energia elétrica. Desta forma o mercado está sujeito a um erro de projeção  $\varepsilon$  que será incorporado à variável  $M$  difusa da seguinte forma:

$$M_{ano_1} = (M_{ano_1(1)}, M_{ano_1(3)}, M_{ano_1(3)}); \quad \text{no primeiro ano} \quad (8)$$

Onde:

$M_{ano_1}$  é o mercado projetado para o ano 1 na forma difusa;

$$M_{ano_1(1)} = proj_{ano_1} \cdot (1 - \varepsilon);$$

$$M_{ano_1(2)} = proj_{ano_1};$$

$$M_{ano_1(3)} = proj_{ano_1} \cdot (1 + \varepsilon);$$

$proj_{ano_1}$  é o mercado projetado para o ano 1;

$\varepsilon$  é o erro de projeção de mercado.

e

$$M_{ano_i} = (M_{ano_i(1)}, M_{ano_i(3)}, M_{ano_i(3)}); \quad \text{nos demais anos } i > 1 \quad (9)$$

Onde:

$M_{ano_i}$  é o mercado projetado para o ano  $i$  na forma difusa ( $i > 1$ ).

$$M_{ano_i(1)} = \frac{M_{ano_{(i-1)}(1)} \cdot proj_{ano_i} \cdot (1 - \varepsilon)}{proj_{ano_{(i-1)}}};$$

$$M_{ano_i(2)} = proj_{ano_i};$$

$$M_{ano_i(3)} = \frac{M_{ano_{(i-1)}(3)} \cdot proj_{ano_i} \cdot (1 + \varepsilon)}{proj_{ano_{(i-1)}}};$$

$proj_{ano_i}$  é o mercado projetado para o ano  $i$ ;

$proj_{ano_{(i-1)}}$  é o mercado projetado para o ano  $i-1$ ;

$\varepsilon$  é o erro de projeção de mercado.

O montante contratado é composto por uma série de valores determinísticos correspondentes aos montantes efetivamente contratados anualmente em MWh ou MW médios, porém estes montantes somente devem ser aplicados para o cálculo do risco de sobrecontratação, pois no cálculo do risco de subcontratação deve ser levada em consideração a compra frustrada da distribuidora, que é a parcela declarada pela distribuidora ao Ministério de Minas e Energia para compra e não atendida por falta de oferta por parte dos agentes de geração.

Sendo a variável montante contratado  $C$  determinística e a do mercado consumidor  $M$  difusa, a variável índice de contratação –  $Ic$  – será difusa, seguindo as regras da aritmética difusa e a equação (3) a variável difusa do índice de contratação será definida como:

$$Ic_{ano_i} = \left( \frac{C_{ano_i} - M_{ano_i(3)}}{M_{ano_i(3)}}, \frac{C_{ano_i} - M_{ano_i(2)}}{M_{ano_i(2)}}, \frac{C_{ano_i} - M_{ano_i(1)}}{M_{ano_i(1)}} \right) \quad (10)$$

Onde:

$C_{ano_i}$  é o montante contratado para o ano  $i$ ;

$M_{ano_i(1)}, M_{ano_i(2)}, M_{ano_i(3)}$  é o mercado na forma difusa conforme especificado nas equações (8) e (9).

Finalmente o cálculo do risco de sobrecontratação é calculado aplicando-se a equação (7) à variável difusa índice de contratação  $Ic > 0,03$  e o risco de subcontratação é calculada para  $Ic < 0$ , considerando a compra frustrada.

#### 4. Estudo de caso

Como estudo de caso da aplicação da metodologia proposta, serão utilizados dados de mercado e contratação da CELG após a realização do primeiro leilão de energia elétrica proveniente de empreendimentos existentes, realizado em 2004, apresentados na Tabela 1. O erro de projeção de mercado  $\varepsilon$  será considerado como sendo  $\pm 1,2\%$  ao ano. Aplicando a regra para obtenção do mercado, como um número difuso, indicado pelas equações (8) e (9) obtemos os valores mostrados na Tabela 2.

A partir dos valores das Tabelas 1 e 2 é possível calcular o índice de contratação difuso, conforme a equação (10) e determinar os riscos de subcontratação e sobrecontratação que, conforme seção anterior, correspondem à probabilidade desta variável ser menor que zero e maior que três por cento respectivamente, levando em consideração, no cálculo do risco de subcontratação, a premissa de considerar a compra frustrada da distribuidora. Os resultados obtidos para os valores do índice de contratação utilizados para determinar o risco de sobrecontratação e o risco de subcontratação são mostrados nas Tabelas 3 e 4, respectivamente. Os riscos foram calculados de acordo com a equação (7), que corresponde à relação entre as áreas conforme apresentado no Gráfico 2, a título de ilustração o Gráfico 3 mostra a representação gráfica do índice de contratação –  $Ic$  – para cálculo do risco de subcontratação e sobrecontratação no ano de 2007, que são as relações das áreas dos triângulos sólidos, vermelho e preto respectivamente, e a área dos triângulos, da mesma cor, aos quais estes estão inscritos. Os valores dos riscos obtidos estão apresentados na Tabela 5 e no Gráfico 4. Os resultados indicam que os riscos de exposição da contratação nos dois primeiros anos do período de análise são mínimos e crescem a partir do terceiro ano da análise. O principal responsável pelo aumento do risco com o tempo é a incerteza existente na previsão do mercado que cresce quanto mais distante no futuro for a previsão, esta característica é pronunciada nos três primeiros anos do estudo, onde o risco é praticamente inexistente nos anos 2005 e 2006, e no ano 2007 existe um risco de cerca de 11% de sobrecontratação e 3% de subcontratação. O fato de que, em 2007, o risco de sobrecontratação calculado foi maior que o risco de subcontratação é devido que ao fato do montante contratado ser maior que o valor esperado de mercado em, aproximadamente, 1,0%. Nos dois anos finais do período estudado, ou seja, em 2008 e 2009, o risco se concentrou na subcontratação, o que ocorreu por não ter havido oferta de energia para 2008 e 2009 no referido leilão. Esta ausência de oferta não deu à empresa oportunidade de atualizar a carteira de contratos de compra de energia elétrica com início de

suprimento nos anos 2008 e 2009, que estavam, respectivamente 4% e 12,5% abaixo do mercado esperado para cada ano. Na realidade novos leilões foram realizados nos quais houve oferta para estes anos, por razões didáticas estes leilões foram desconsiderados neste estudo. Vale ressaltar que mesmo não havendo atualização das carteiras de contratação nos dois últimos anos da análise existiu uma probabilidade de sucesso neste período, mais significativa no ano de 2008, com 82% de chance de sucesso, e menos significativa em 2009 cuja chance de sucesso foi reduzida para 26%.

Para efeito de comparação dos resultados obtidos pela metodologia proposta neste trabalho, foi calculado o risco de contratação por outra metodologia, que consistiu na análise estatística de séries sintéticas equiprováveis de mercado para o período 2005 a 2009. Foram geradas e analisadas duas mil séries sintéticas, o resultado obtido está apresentado na Tabela 6. Comparando os riscos obtidos pelos dois métodos observamos que, embora os valores sejam diferentes, a mesma tendência foi evidenciada nos dois resultados, ou seja, riscos mínimos de exposição da contratação nos dois primeiros anos do período de análise e maiores a partir do terceiro ano da análise, nos dois anos finais do período estudado, o risco se concentrou na possibilidade de subcontratação. O fato dos valores dos riscos serem diferentes nos resultados obtidos pelas duas metodologias não invalida nenhuma delas, nesta análise de validação é importante verificar se a tendência do risco é a mesma nos dois casos.

**Tabela 1** - Variáveis  $M$  mercado previsto e  $C$  montante contratado anualmente em MW médios, na forma determinística.

Ano	2005	2006	2007	2008	2009
Mercado previsto $M$	958	1.032	1.097	1.160	1.226
Total Contratado por ano (MW médio) $C$	967	1.041	1.108	1.114	1.072
Total Contratado por ano (MW médio) $C$ Inclusive frustrações	971	1.061	1.128	1.181	1.204

**Tabela 2** - Variável  $M$  mercado em MW médios, na forma difusa para  $\varepsilon = 0,012(1,2\%)$ .

Ano	2005	2006	2007	2008	2009
$M_{ano(1)}$	946	1.007	1.058	1.105	1.154
$M_{ano(2)}$	958	1.032	1.097	1.160	1.226
$M_{ano(3)}$	969	1.057	1.137	1.216	1.302

**Tabela 3** - Variável índice de contratação  $Ic$ , na forma difusa, para cálculo do risco de sobrecontratação ( $Ic > 3\%$ ).

Ano	2005	2006	2007	2008	2009
$Ic_{ano(1)}$	-0,26%	-1,48%	-2,54%	-8,43%	-17,64%
$Ic_{ano(2)}$	0,93%	0,90%	1,01%	-3,95%	-12,58%
$Ic_{ano(3)}$	2,16%	3,37%	4,73%	0,80%	-7,14%

**Tabela 4** - Variável índice de contratação  $Ic$ , na forma difusa, para cálculo do risco de subcontratação ( $Ic < 0\%$ ) – foram consideradas as frustrações na carteira de contratos.

Ano	2005	2006	2007	2008	2009
$Ic_{ano(1)}$	0,15%	0,42%	-0,78%	-2,91%	-7,49%
$Ic_{ano(2)}$	1,35%	2,85%	2,84%	1,83%	-1,81%
$Ic_{ano(3)}$	2,58%	5,36%	6,63%	6,87%	4,30%

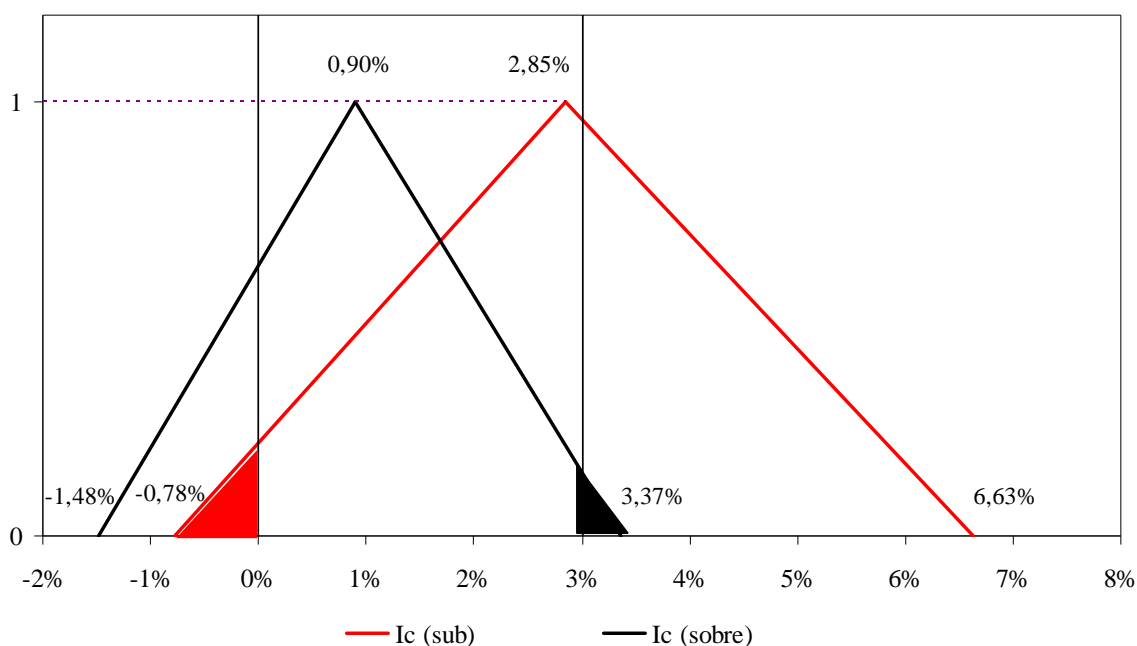
**Tabela 5** - Riscos de sobrecontratação e de subcontratação, obtida pela aplicação da teoria de conjuntos difusos.

Ano	2005	2006	2007	2008	2009
Risco de sobrecontratação	0,0%	1,1%	11,1%	0,0%	0,0%
Risco de subcontratação	0,0%	0,0%	2,3%	18,3%	74,3%

**Tabela 6** - Riscos de sobrecontratação e de subcontratação, obtido a partir de da análise estatística de séries sintéticas equiprováveis de mercado.

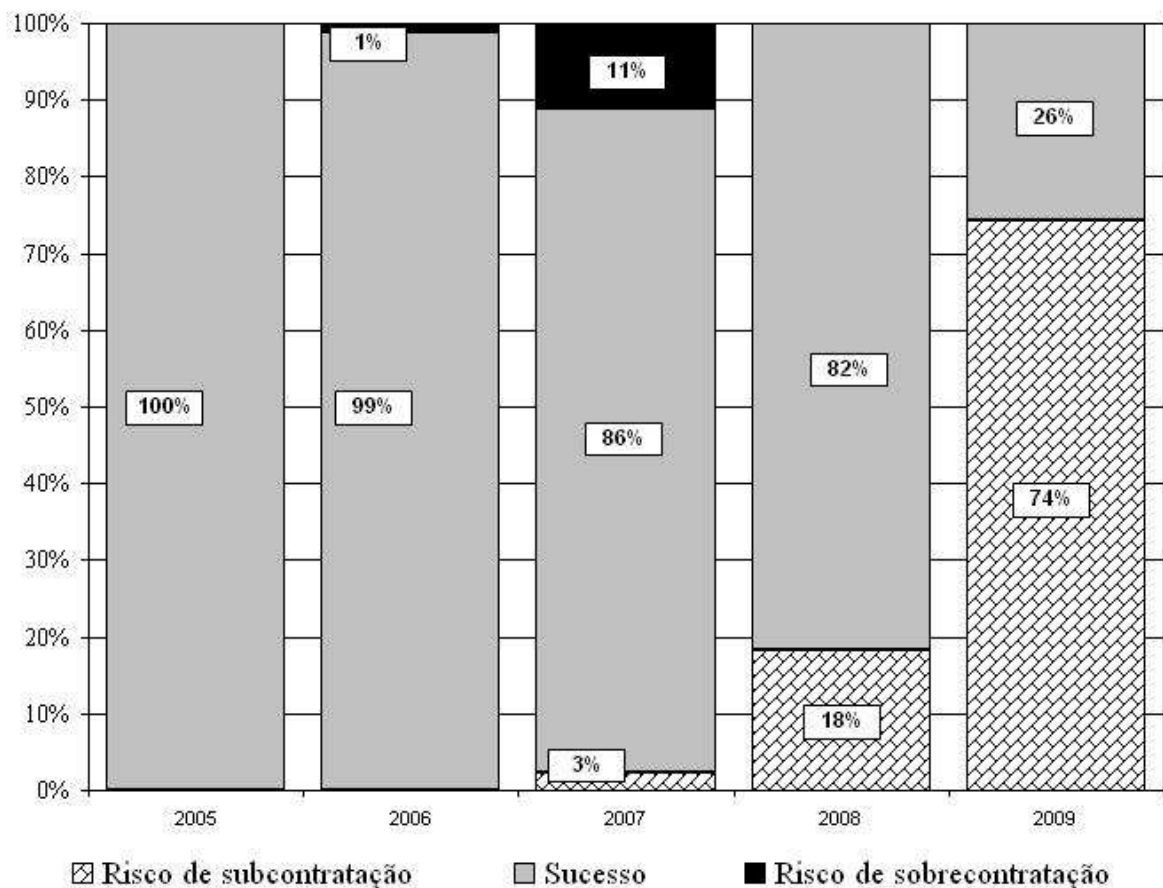
Ano	2005	2006	2007	2008	2009
Risco de sobrecontratação	0,0%	0,7%	4,7%	0,0%	0,00%
Risco de subcontratação	0,0%	0,0%	0,4%	9,4%	88,4%

**$Ic$  - Índice de contratação - ano = 2007**



**Gráfico 3** – Variável  $Ic$  para cálculo do risco de subcontratação e sobrecontratação para o ano 2007.





**Gráfico 4** - Riscos de contratação, obtida pela aplicação da teoria de conjuntos difusos.

## 5. Conclusões e recomendações

A metodologia proposta é capaz de determinar o risco de contratação ao qual uma empresa de distribuição de energia elétrica está sujeita no atual modelo de contratação do setor elétrico nacional, de maneira simples sem o emprego de cálculos sofisticados nem do desenvolvimento de sistemas computacionais específicos para a tarefa proposta. A comparação com outro método de determinação de risco mostrou que a metodologia proposta obteve resultados adequados.

A maior incerteza, observada do problema, é inserida pelo erro decorrente da previsão do mercado para os próximos anos, este erro deve ser investigado em detalhes para que o modelo gere resultados mais precisos.

A metodologia proposta pode ser aplicada para verificação do risco da carteira atual de contratação. Esta metodologia, associada a modelos de otimização, pode auxiliar no processo de quantificação dos montantes que serão adquiridos nos próximos leilões de compra antecipada de energia elétrica, com o objetivo de minimizar os riscos de subcontratação e sobrecontratação futuros.

## 6. Referências bibliográficas

- GALVÃO, C. O. e VALENÇA, M. J. S. Orgs. *Sistemas Inteligentes*. Editora da Universidade/UFRGS, Porto Alegre / RS, 1999.
- ROSS, T. J. *Fuzzy Logic with Engineering Applications*. Mc Graw Hill, New York, 1997.