

Estudo Econômico da Melhoria da Qualidade de Redes Elétricas

Arango, L.G., Deccache, E., Bonatto, B. D., Arango, H.

UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá - CERIn – Centro de Excelência em Redes Inteligentes – Itajubá-MG, Brasil
lucasarango10@yahoo.com.br; elciodeccache@yahoo.com.br; bonatto@unifei.edu.br; hector.arango@uol.com.br;

Vasconcelos, G. F.

Matrix Engenharia em Energia – Rua Purpurina, 287 – Sumarezinho – São Paulo– SP 05435-030, Brasil
gil.vasc@matrixenergia.com.br;

Resumo — A presença de árvores no percurso das redes elétricas é uma das principais causas de interrupções de serviço e de eventuais multas por violação dos índices individuais. O objetivo do artigo é avaliar o desenvolvimento de acessórios para transformar a rede compacta instalada dentro das copas das árvores em rede isolada. Nesse contexto, os custos evitados pelo projeto são, dentre outros, relativos à diminuição da frequência das podas e a diminuição dos indicadores de continuidade. O estudo econômico sob condições de risco será feito considerando três cenários diferentes de DIC e frequência de poda nas árvores, com determinada probabilidade de ocorrência. Como resultado deseja-se determinar a expectativa de viabilidade econômica do projeto para uma concessionária de energia elétrica.

Palavras-chaves — Continuidade, DIC, Interrupções, Rede Isolada, Viabilidade Econômica.

I. INTRODUÇÃO

Conforme [1]-[6] as concessionárias de energia elétrica cada vez mais buscam a redução de seus custos para se enquadrar dentro das metas da ANEEL de maximização de valor social.

Com a redução de custos a empresa de energia elétrica adquire ganhos de produtividade mensurados pelo fator X. Estes ganhos após término de um período de revisão tarifária podem ser utilizados para reduzir a tarifa cobrada do consumidor, resultando desta maneira em uma elevação do excedente dos mesmos e consequentemente em um aumento do valor social.

Desta maneira, as concessionárias em geral buscam projetos que geram valor adicionado positivo. Neste contexto, surge o projeto de transformação da rede em isolada conforme [7], com o intuito de diminuir índices de continuidade e a frequência de poda das árvores que impactam diretamente na rede elétrica, podendo ocasionar interrupções para os consumidores de energia.

Sabe-se que as companhias de eletricidade pagam compensações a seus consumidores quando os limites de continuidade ultrapassam os valores estabelecidos por norma [8]. Assim, surge a necessidade de investimentos na rede com o intuito de se adequar aos índices de continuidade estabelecidos e melhorar a confiabilidade da energia entregue para o consumidor final.

Segundo [7], a Rede de Distribuição Aérea Isolada é um tipo de rede bastante protegida, pois os condutores são encapados com isolamento suficiente para serem trançados e ficarem próximo aos galhos das árvores, sem risco de provocar curto-circuito.

Conforme [7], a rede secundária isolada, comparativamente à rede aérea convencional, apresenta vantagens que podem redundar em um melhor desempenho, a saber:

- Melhoria do DEC/FEC;
- Melhor utilização da altura do poste;
- Dificulta o furto de energia;
- Melhora a estética da rede;
- Melhora a condição do meio ambiente e reduz a área de poda;
- Aumenta a segurança contra o choque elétrico;
- Redução da queda de tensão ao longo da rede (redução da impedância com a configuração pré-reunida);
- Aumento da vida útil do transformador (redução de curtos-circuitos na rede).

Sabendo que os projetos, frequentemente incluem riscos, um estudo mais elaborado considerando diferentes cenários de ocorrência será conduzido com o fim de se determinar a expectativa de ganhos ou perdas para a empresa elétrica.

II. REFERENCIAL TEÓRICO

A. Conceitos Básicos

No intuito de formular com propriedade uma modelagem financeira do impacto do projeto sobre os agentes do mercado de fornecimento elétrico, deve-se levar em consideração o seguinte aspecto: a especificação dos cenários probabilísticos relativos à quantificação do impacto. Os índices DIC, FIC, DMIC têm como causa principal subjacente, estados da natureza associados ao clima.

Admitindo que a isolamento da rede compacta produz uma expectativa de diminuição de $\Delta DIC\%$ em interrupções e $\Delta p\%$ em frequência de podas, podem-se definir os cenários probabilísticos conforme Tabela I:

TABELA I. CENÁRIOS DO PROJETO DE REDE ISOLADA.

Cenários	Probabilidade p(x) %	DIC (h/ano)	tp (Anos)
Otimista	P _O	DIC _O	t _O
Mais Provável	P _M	DIC _M	t _M
Pessimista	P _P	DIC _P	t _P

B. Cenários e Payoffs

O cálculo exato do efeito econômico sobre a continuidade depende dos índices reais percebidos pelos clientes afetados cujo fornecimento ocorre através de linhas compactas.

Considerando uma densidade de clientes constante por comprimento de linha, a diminuição do DIC se dará sobre um percentual do DIC da empresa elétrica para uma determinada potência ou energia interrompida [8]-[9]. As fórmulas (1)-(3) expressam esta redução para os três cenários considerados:

$$R_{DIC_O} = \Delta_{DIC} DIC_O \quad (1)$$

$$R_{DIC_M} = \Delta_{DIC} DIC_M \quad (2)$$

$$R_{DIC_P} = \Delta_{DIC} DIC_P \quad (3)$$

A tarifa de interrupção corresponde normalmente a um valor 15 vezes maior que a tarifa cobrada pela concessionária, conforme (4):

$$T_i = 15T \quad (4)$$

Considerando uma determinada de potência interrompida, então o custo de interrupção pode ser equacionado por (5):

$$C_i = P_i T_i \quad (5)$$

Portanto, o custo evitado com a redução do DIC pode ser calculado pelas fórmulas (6)-(8), para os três cenários considerados:

$$CEV_{DIC_O} = R_{DIC_O} \cdot C_i \quad (6)$$

$$CEV_{DIC_M} = R_{DIC_M} \cdot C_i \quad (7)$$

$$CEV_{DIC_P} = R_{DIC_P} \cdot C_i \quad (8)$$

O custo evitado advindo da diminuição da poda pode ser aferido a partir do custo total (I_p) investido na manutenção das árvores que interferem na operação das linhas. Admitindo que a poda é proporcional à longitude destas últimas, o custo atribuível à parcela compacta 1% do total I_p .

$$I_p = l_p p_p \quad (9)$$

Assim, o custo evitado com a poda pode ser calculado por (10):

$$CEV_p = \Delta_p I_p \quad (10)$$

A frequência que o CEV_p incidirá sobre o fluxo de caixa deverá ser igual a frequência de poda. Ou seja, se a frequência de poda é anual então o custo evitado será anual, se a frequência de poda é a cada 3 anos, então o custo evitado com a poda será de três em três anos, e assim por diante.

Ainda, o custo médio da poda pode ser calculado através de uma média simples referente à frequência de podas conforme (11):

$$CEV_{MédioPoda} = \frac{CEV_p}{t_p} \quad (11)$$

Este resultado exprime a estrutura probabilística do custo evitado pelo projeto. No intuito de aproveitar este resultado para uma avaliação dos méritos da proposta, deve-se estudar:

- A viabilidade econômica do projeto.
- A prioridade na criação do valor financeiro para a empresa elétrica.

C. O Cálculo da Expectativa do Custo Evitado

O custo evitado da tabela é equivalente a um *payoff* anual por tempo indefinido que deve ser descontado a uma taxa dada pelo custo de capital da empresa elétrica e contrastado com o investimento exigido pelo projeto.

Assim sendo, a análise financeira deve ser realizada para cada um dos cenários probabilísticos contemplados (O, M, P). Ou seja, para sequências de *payoffs*:

$$CEV_O = CEV_{DIC_O} + CEV_{p_O} \quad (12)$$

$$CEV_M = CEV_{DIC_M} + CEV_{p_M} \quad (13)$$

$$CEV_P = CEV_{DIC_P} + CEV_{p_P} \quad (14)$$

Cada sequência de *payoffs* deve ser investigada para a obtenção do VPL, *Payback* e TIR correspondente utilizando a matemática financeira habitual a partir dos resultados.

D. Investimento para transformar a Rede em Isolada

O foco principal do projeto consiste em transformar a rede compacta em rede isolada através da instalação de acessórios que possibilitam a isolamento da rede, não permitindo que os galhos de árvores provoquem curto-circuito na rede e consequentemente interrupções de fornecimento de energia elétrica.

Desta maneira, deve-se determinar qual é o investimento nos acessórios que transformam a rede compacta em rede isolada. Sabe-se que o investimento é proporcional ao comprimento da rede ao qual será feita a instalação dos acessórios de isolamento, do número de acessórios e do preço de cada acessório. A fórmula (15) expressa este investimento:

$$I_A = n p_A l_A \quad (15)$$

E. Cálculo da Taxa de Desconto

Para a determinação da taxa de desconto do projeto de rede isolada, será utilizada a metodologia CAPM proposta por Sharpe em [10]-[11] que considera o risco do ativo e do mercado e a correlação de ambos, além dos retornos do mercado e do ativo livre de risco.

Para os três cenários considerados, deve-se calcular o custo evitado anual e consequentemente a expectativa de custo evitado através de (16):

$$E(CEV) = \pi_O CEV_O + \pi_M CEV_M + \pi_P CEV_P \quad (16)$$

Consequentemente, calcula-se a variância e o risco do projeto através de (17):

$$\sigma^2 = \pi_O (CEV_O - E(CEV))^2 + \pi_M (CEV_M - E(CEV))^2 + \pi_P (CEV_P - E(CEV))^2 \quad (17)$$

E o risco normalizado conforme (18):

$$\sigma_{Normalizado} = \frac{\sigma}{E(CEV)} \quad (18)$$

Ainda, deve-se calcular o risco não diversificável (β), através de (19):

$$\beta = \rho \frac{\sigma}{\sigma_m} \quad (19)$$

E então a expectativa de retorno do projeto que pode ser utilizada como taxa de desconto conforme (20):

$$r_p = r_f + \beta(r_m - r_f) \quad (20)$$

F. Cálculo da Expectativa dos Indicadores Econômicos de Retorno

Adotando o conceito de árvores de decisão [12], representados pelas Fig. 1-3 é possível de calcular a expectativa dos indicadores econômicos conforme expressões (21)-(23). A vantagem de se adotar as árvores de decisão é a visualização gráfica das consequências de decisões atuais e futuras bem como os elementos aleatórios associados, permitindo a conceptualização e controle de uma grande gama de problemas de investimento sob condições de risco.

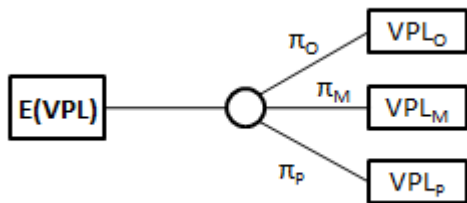


Fig. 1. Árvore de Decisão para o VPL.

Desta forma é possível de analisar a rentabilidade do projeto através da expectativa dos resultados ou indicadores econômicos considerando os cenários de risco.

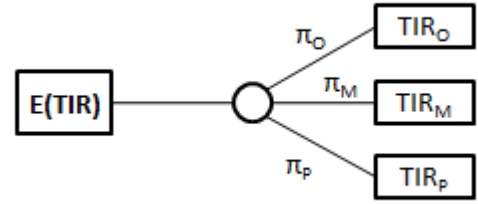


Fig. 2. Árvore de Decisão para a TIR.

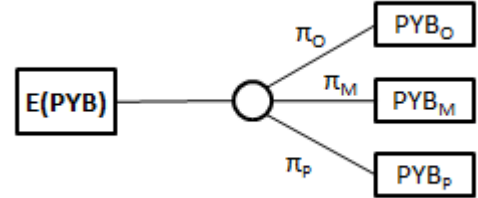


Fig. 3. Árvore de Decisão para o PYB.

$$E(VPL) = \pi_O VPL_O + \pi_M VPL_M + \pi_P VPL_P \quad (21)$$

$$E(TIR) = \pi_O TIR_O + \pi_M TIR_M + \pi_P TIR_P \quad (22)$$

$$E(PYB) = \pi_O PYB_O + \pi_M PYB_M + \pi_P PYB_P \quad (23)$$

Uma análise de risco mais aprofundada poderia ser executada calculando-se o desvio padrão dos indicadores econômicos (VPL, TIR, PYB) referente aos cenários. Assim, ter-se-ia os valores de expectativa de retorno e risco dos indicadores econômicos. Estes valores de expectativa e retorno poderiam ser plotados no plano de Marcowicz e através do coeficiente de aversão ao risco da empresa decidir se o projeto é viável ou não.

Porém, para este trabalho adotou-se a decisão de viabilidade econômica do projeto baseada somente na expectativa de retorno dos indicadores econômicos.

G. Análise de Viabilidade de um Projeto de Risco

Sintetizando o processo utilizado para a análise de risco da proposta:

- Em primeiro lugar foi estabelecido o impacto do risco climático sobre o custo evitado (CEV).
- Posteriormente foi estabelecido o impacto do risco sobre a frequência de poda
- Determinam-se os cenários previsíveis e o valor de (CEV) para cada um.
- Determinam-se o investimento e o (CEV) anual para cada cenário (*Cash-flow*).
- Calcula-se o VPL, PYB e TIR de cada *cash-flow* e a partir dos resultados, as expectativas correspondentes.

Considerando a frequência de poda para cada cenário proposto, chega-se a Tabela II:

TABELA II. FREQUÊNCIA DE PODA PARA OS TRÊS CENÁRIOS.

Cenários	Otimista	Mais Provável	Pessimista
tp (Anos)	3	2	1

Desta forma é possível representar graficamente os fluxos de caixa conforme Fig. 4, 5 e 6:

Com uma duração que corresponde ao período entre a implementação do projeto e a primeira revisão tarifária posterior a ela.

Deste modo, para cada cenário é gerada uma sequência de ganhos líquidos de duração variável. Entretanto, não deve esquecer-se que o mérito de um projeto de pesquisa aplicada sob a perspectiva da agência não se limita às suas bondades com respeito à empresa, pelo contrário, seus efeitos benéficos devem referir-se ao bem-estar público gerado pelo projeto, que abrange tanto o lucro da concessionária como o excedente de seus consumidores.

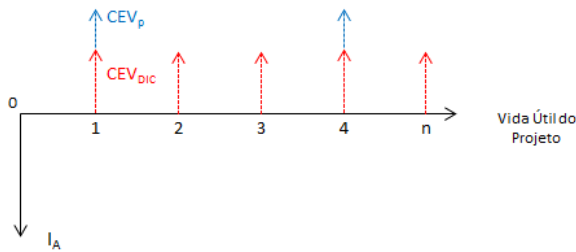


Fig. 4. Fluxo de Caixa para o Cenário Otimista.

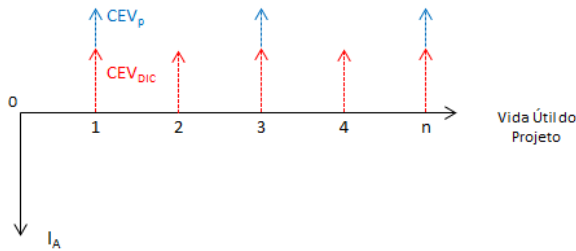


Fig. 5. Fluxo de Caixa para o Cenário mais Provável.

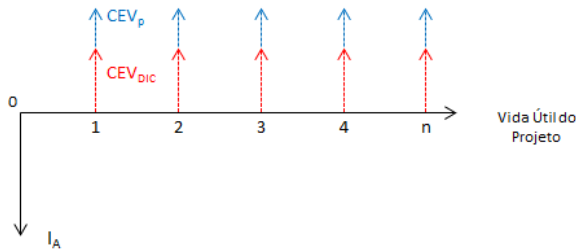


Fig. 6. Fluxo de Caixa para o Cenário Pessimista.

Considerando o período pós-projeto até a revisão tarifária, a empresa auferirá uma parcela (dependente do fator X vigente) e os clientes o restante. Já no período pós-revisão tarifária, a empresa não usufrui mais do ganho, entretanto, a mesma induz uma diminuição tarifária que, por sua vez, eleva o excedente dos clientes em um valor geralmente maior que o ganho original da empresa, sendo que este aumento os beneficia à perpetuidade.

III. ESTUDO DE CASO

A seguir, será executado um estudo de caso em um projeto piloto cujo objetivo é de transformar a rede compacta em rede isolada. Seguem na Tabela III, os dados de entrada para a execução da análise econômica:

TABELA III. DADOS DE ENTRADA DO PROJETO.

Variável	Dados de Entrada	
Δ_{DIC}	% Redução DIC	30%
T	Tarifa (R\$/MWh)	300
P_i	Potência Interrompida (MW)	50
Δ_p	% Redução de Freq. De Poda	50%
l_p	Comprimento de linha correspondente a poda (Km)	50
p_p	Valor da Poda/Km.ano	10.000
n	Número de Acessórios/Km	1
p_A	Preço do Acessório de Isolação de Rede (R\$)	100.000
l_A	Comprimento de linha que serão instalados os acessórios (Km)	50
ρ	Coefficiente de Correlação entre projeto e mercado	0,5
$(r_m - r_f)$	Prêmio do Risco	0,1
t	Número de Anos do Projeto	10

A Tabela IV descreve a probabilidade dos três cenários considerados, além do DIC e a frequência de poda:

TABELA IV. DADOS DE ENTRADA DOS CENÁRIOS.

Cenários	Dados de Entrada		
	$P(x)$	DIC	tp
Otimista	25%	20	3
Mais Provável	50%	30	2
Pessimista	25%	40	1

Sabendo que o projeto de rede isolada auferirá um valor de redução de 30% no DIC e que a tarifa de interrupção corresponde a um valor 15 vezes maior que a tarifa cobrada pela concessionária, então:

$$T_i = 15T = 15 \times 300 = 4.500 \text{ R\$/MWh}$$

Considerando o valor de 50 [MW] de potência interrompida, então o custo de interrupção pode ser calculado por (5):

$$C_i = P_i T_i = 50 \times 4500 = 225.000 \text{ R\$/h}$$

Portanto, a redução do DIC pode ser calculada por (1)-(3) e o custo evitado com a redução do DIC pode ser calculado pelas fórmulas (6)-(8). Assim sendo, chega-se à redução do DIC e ao custo evitado com o DIC para os três cenários propostos através da Tabela V:

TABELA V. REDUÇÃO E CUSTO EVITADO COM O DIC PARA OS TRÊS CENÁRIOS PROPOSTOS.

Cenários	Otimista	Mais Provável	Pessimista
R_{DIC} (hs/Ano)	6	9	12
CEV_{DIC} (R\$/Ano)	1350000	2025000	2700000

Existe outro benefício auferido com o projeto, que trata da redução na frequência de podas. Assim sendo, o investimento em podas pode ser calculado por (9):

$$I_p = l_p p_p = 50 \times 10.000 = 500.000 \text{ R\$}$$

Assim, o custo evitado com a poda pode ser calculado por (10):

$$CEV_p = \Delta_p I_p = 0,5 \times 500.000 = 250.000 \text{ R\$}$$

Ainda, deve-se determinar qual é o investimento nos acessórios que transformam a rede compacta em rede isolada. A fórmula (15) expressa este investimento:

$$I_A = n p_A l_A = 1 \times 100.000 \times 50 = 5.000.000 \text{ R\$}$$

Agora, deve-se determinar qual a taxa de desconto a ser utilizada no projeto. Primeiramente, deve-se calcular o custo evitado anual para os três cenários. A Tabela VI ilustra estes cálculos:

TABELA VI. CUSTO EVITADO MÉDIO TOTAL COM O DIC E A PODA PARA OS TRÊS CENÁRIOS PROPOSTOS.

Cenários	Otimista	Mais Provável	Pessimista
CEV Médio da Poda	83.300	125.000	250.000
CEV _{DIC}	1.350.000	2.025.000	2.700.000
Custo Evitado por Ano	1.433.000	2.150.000	2.950.000

Então, calcula-se por (16) a expectativa do custo evitado do projeto:

$$E(CEV) = 0,25 \times 1.433.000 + 0,5 \times 2.150.000 + 0,25 \times 2.950.000 = 2.170.825 \text{ R\$/Ano}$$

Consequentemente, calcula-se a variância e o risco do projeto por (17):

$$\sigma^2 = 0,25(1433000 - 2170825)^2 + 0,5(1433000 - 2170825)^2 + 0,25(1433000 - 2170825)^2$$

$$\sigma = 536638,65$$

E o risco normalizado do projeto por (18):

$$\sigma_{\text{Normalizado}} = \frac{536638,65}{2170825} = 0,2472$$

Considerando a correlação entre o projeto e o mercado igual a 0,5 é possível calcular o beta por (19):

$$\beta = \rho \frac{\sigma}{\sigma_m} = 0,5 \times \frac{0,2472}{0,2} = 0,618$$

Considerando o prêmio do risco igual a 0,1 então o retorno do projeto pode ser calculado e utilizado como taxa de desconto conforme (20):

$$r_p = r_f + \beta(r_m - r_f) = 0,05 + 0,618 \times (0,1) = 0,112$$

Desta forma é possível montar o fluxo de caixa para os três cenários considerados e calcular o VPL, TIR e *payback* do projeto, através da Tabela VII:

TABELA VII. FLUXO DE CAIXA DO PROJETO PARA OS TRÊS CENÁRIOS CONSIDERADOS.

Ano	Fluxo de Caixa (FC) - Cenários		
	Otimista	Mais Provável	Pessimista
0	-5000000	-5000000	-5000000
1	1600000	2275000	2950000
2	1350000	2025000	2950000
3	1350000	2275000	2950000
4	1600000	2025000	2950000
5	1350000	2275000	2950000
6	1350000	2025000	2950000
7	1600000	2275000	2950000
8	1350000	2025000	2950000
9	1350000	2275000	2950000
10	1600000	2025000	2950000
VPL	R\$ 3.484.934,02	R\$ 7.605.461,92	R\$ 12.242.793,47
TIR	26%	42%	58%
PYB	5,552764253	2,794711665	1,983286873

Considerando as probabilidades de ocorrência dos cenários é possível calcular as expectativas de VPL, TIR e *payback* do projeto:

$$E(VPL) = 0,25 \times 3.484.934,02 + 0,5 \times 7.605.461,92 + 0,25 \times 12.242.793,47 = \text{R\$ } 7.734.662,83$$

$$E(TIR) = 0,25 \times 26\% + 0,5 \times 42\% + 0,25 \times 58\% = 42\%$$

$$E(PYB) = 0,25 \times 5,552764253 + 0,5 \times 2,794711665 + 0,25 \times 1,983286873 = 3,2813686 \text{ [Anos]}$$

IV. CONCLUSÃO

A análise de viabilidade econômica do projeto de rede isolada da empresa elétrica estudada sintetizou financeiramente como um projeto com um determinado avanço tecnológico pode produzir benefícios à curto e a longo prazo para uma concessionária de energia elétrica.

Baseado em cenários econômicos com uma determinada probabilidade de ocorrência o projeto foi analisado sob uma ótica estocástica, o que prepara o investidor para resultados menos prováveis, mas que podem ocorrer.

O projeto foi analisado sob três cenários: otimista, mais provável e pessimista. Sob estas possibilidades chegou-se a expectativa do VPL, TIR e *payback*.

O custo de Capital do projeto utilizado para descontar os fluxos de caixa foi determinado com base na metodologia CAPM, proposta por William Sharpe [10]-[11]. Esta metodologia leva em conta a correlação entre os retornos do projeto e do mercado, assim como a variância destes retornos, o prêmio de risco e o retorno do ativo livre de risco.

Assim sendo e através de uma análise clássica com os dados simulados, foi possível chegar à uma expectativa de VPL de quase 8 milhões de reais, uma expectativa de TIR de 42% e uma expectativa de *payback* de aproximadamente 3 anos. Estes resultados demonstram o quão viável é o projeto sob a visão da empresa de energia elétrica.

Com relação à qualidade da energia, o projeto demonstra uma redução no índice de continuidade aferido através do DIC e uma redução na frequência da poda de árvores, beneficiando o consumidor final que passa a receber uma energia com menos interrupções e mais confiabilidade.

V. REFERÊNCIAS

- [1] Martin, J. D. and Petty, J. W., Value Based Management, Harvard Business School Press, Boston, 2000.
- [2] Jehle, G. A. and Reny, J. P., Advanced Microeconomic Theory, 2nd ed., Addison Wesley – Longman, 2000.
- [3] Arango, H., Abreu, J. P. G., Bonatto, B. D., Tahan, C. M. V., Kagan, N. & Gouvea, M. R. (2007), “Introducing Quality into the Electricity Market Economic Model”. VII Brazilian Conference about the Quality of Power (CBQEE 2007), Santos-SP, Brazil, August 05-08, 2007.
- [4] Arango, H., Abreu, J. P. G., Bonatto, B. D., Tahan, C. M. V., Kagan, N. & Gouvea, M. R. (2008), “A Model for Electricity Markets: The Impact of Regulation on Value”. in Proc.: The International Conference on the European Electricity Market (EEM 2008), Lisbon - Portugal, May 28-30, 2008.
- [5] Arango, H., Abreu, J. P. G., Bonatto, B. D., Tahan, C. M. V., Kagan, N. & Gouvea, M. R. (2008), “The Economic Impact of Power Quality and its Optimal Regulation”. VIII International Conference on Industrial Applications (Induscon 2008), Poços de Caldas-MG, Brazil, August 17-20, 2008.
- [6] Arango, H., Abreu, J. P. G., Bonatto, B. D., Tahan, C. M. V., Kagan, N. & Gouvea, M. R. (2008), “Modeling the Influence of Power Quality on the Creation of Market Value”. in Proc.: 13th International Conference on the Quality of Power (ICHQP 2008), Wollongong, New South Wales, Australia, Sept. 28 -Oct. 1st, 2008.
- [7] COPEL, Norma Técnica nº 841200, “Projeto de Redes de Distribuição Secundária Isolada”, - Paraná, Brasil, Maio, 2013.
- [8] ANEEL, *Proceedings of Electrical Energy Distribution in the National Electrical System – PRODIST – Module 8 – Electric Power Quality* (in Portuguese), Jan., 2016. Available in: <http://www.aneel.gov.br>.
- [9] IEEE, *Standard 1159 – IEEE Recommended Practices for Monitoring Electric Power Quality*, March, 2009.
- [10] J. P. Danthine, and J. B. Donaldson, Intermediate Financial Theory, 2nd ed., Elsevier Academic Press, 2005.
- [11] Ross, S., Westerfield, R., & Jaffe, J. (2002). Administração Financeira: Corporate Finance. São Paulo: Atlas
- [12] Bronson, R., Naadimuthu, G., “Theory and Problems of Operations Research”, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, 1997.