

MODELO DE OTIMIZAÇÃO POR FLUXO DE TEMPO DE INTERRUPÇÃO PARA ALOCAÇÃO DE CHAVES EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.

Gracielle Heleno da Silva Carvalho

Universidade de Campinas – Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica.
Rua Sérgio Buarque de Holanda, 651 – Cidade Universitária “Zeferino Vaz”. CEP: 13083-859.
Distr. Barão Geraldo – Campinas – SP.
gracielle.matematica@gmail.com

Celso Cavellucci

Universidade de Campinas – Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica.
Rua Sérgio Buarque de Holanda, 651 – Cidade Universitária “Zeferino Vaz”. CEP: 13083-859.
Distr. Barão Geraldo – Campinas – SP.
celsocv@imecc.unicamp.br.

Fábio Luiz Usberti

Universidade de Campinas – Instituto de Computação.
Av. Albert Einstein, 1251 – Cidade Universitária “Zeferino Vaz”. CEP: 13083-852. Distr. Barão
Geraldo – Campinas – SP.
fusberti@ic.unicamp.br.

Resumo

A energia elétrica é produzida e entregue aos consumidores através do sistema composto por usinas de geração, redes de transmissão e distribuição. Um dos objetivos ao se realizar a instalação de chaves em redes de distribuição é ter a possibilidade de reenergizar no menor tempo possível, clientes que foram interrompidos em virtude de uma falha no sistema. Este artigo detalha um modelo exato para o Problema de Alocação de Chaves (PAC) usando o conceito de Fluxo de Tempo de Interrupção em sistemas radiais de distribuição de energia elétrica. O modelo define a instalação de chaves em locais apropriados nas redes, a fim de melhorar a confiabilidade do sistema. Experimentos computacionais são realizados com 5 redes da literatura. Os resultados mostram soluções ótimas com a economia significativa nos investimentos na alocação de chaves.

PALAVRAS-CHAVE: Alocação de Chaves, Confiabilidade e Fluxo de Tempo de Interrupção.

Abstract

The consumers of power receive electrical energy by a complex system constituted of generation, transmission and distribution subsystem. One objective to install switches in the distribution networks is the possibility to reenergize interrupted clients due faults by the minimum time. This article details a exact model of the Switch Allocation Problem used the concept of Interruption Time Flow to radial systems of the electrical energy distribution. The model defines appropriate locations to install switches for improve the system reliability. Computational experiments are carry out with five networks of the literature. The results show optimal solutions with significant savings defined install locations to the switches.

KEY WORD: Switch Allocation, Reliability and Interruption Time Flow.

1. Introdução

A energia elétrica consagrou-se como a forma de energia mais utilizada pelas sociedades do mundo contemporâneo. Desse modo, há a necessidade de encaminhar a energia gerada nas usinas até os centros urbanos onde será consumida. A confiabilidade em um sistema de distribuição de energia implica no fornecimento interrupto de energia elétrica aos consumidores. Para que o sistema consiga atender às demandas dos clientes, todos os componentes entre os clientes e a subestação de energia devem estar operando normalmente. A falha de um componente pode causar a interrupção do fornecimento de energia e, conseqüentemente, a redução dos indicadores de confiabilidade do sistema (Assis, 2014).

A decisão sobre a quantidade e localização de chaves deve seguir critérios operacionais e econômicos, visando contribuir para a melhoria dos índices que medem a confiabilidade do sistema de distribuição, com o menor custo possível. A confiabilidade dos sistemas são avaliadas por um conjunto de índices, que fornecem informações de médias anuais obtidas de dados da rede de distribuição.

Este trabalho discute o Problema de Alocação de Chaves (PAC) utilizando o conceito de Fluxo de Tempo de Interrupção (FTI), cuja solução irá nos fornecer as posições ótimas para a instalação de chaves nas redes de distribuição de energia elétrica. A formulação tem o objetivo de minimizar o custo da Energia Não Distribuída (END) somado ao custo de alocação de chaves.

O artigo está organizado da seguinte maneira. Seção 2: descrição do sistema de distribuição. Seção 3: cálculo da confiabilidade por fluxo de interrupção e exemplo numérico. Seção 4: o problema de alocação de chaves. Seção 5: experimentos computacionais. Seção 6: conclusão e trabalhos futuros.

2. A Descrição do Sistema de Distribuição.

Os sistemas elétricos podem ser subdivididos em três grandes blocos (Kagan, Oliveira e Robba, 2010):

Geração: tem por função converter alguma forma de energia em energia elétrica, por exemplo, mecânica em elétrica.

Transmissão: responsável pelo transporte da energia elétrica dos centros de geração aos centros de consumo.

Distribuição: entregar a energia elétrica recebida da transmissão aos grandes, médios e pequenos consumidores, seguindo padrões de qualidade exigidas pela regulamentação.

Após percorrer um longo caminho entre as usinas e os centros consumidores, a energia elétrica chega às subestações iniciando o processo de distribuição. Para que esse processo seja realizado com sucesso, os componentes da rede de distribuição tem que estar em perfeito funcionamento. Que são eles (Kagan, Oliveira e Robba, 2010):

- **Subestação:** geralmente, a Subestação (SE) de distribuição está localizada perto dos consumidores finais e é responsável pela transformação da tensão de transmissão (138 kV) para a de distribuição primária (13,8 kV). As SEs possuem um barramento que pode direcionar a energia para várias cargas. Normalmente, são instalados disjuntores e chaves que possibilitam desconectar as SEs da rede de transmissão ou mesmo desligar linhas que saem das subestações, quando necessário.

- **Disjuntor:** é designado para proteger um circuito elétrico de danos causados por sobrecarga ou curto circuito. Sua função básica é detectar uma condição de falha, interrompendo o circuito e isolando os equipamentos.

- **Cabos:** são condutores de energia elétrica. Existem vários tipos de cabos, que podem ser construídos por materiais como o alumínio ou cobre, e podem ter diferentes bitolas, que definem suas capacidades e perdas elétricas.

- **Chaves Seccionadoras:** são dispositivos, normalmente fechado (NF), que podem ser acionadas (aberto) quando uma falha ocorre. Seu objetivo é isolar a falha para o menor número de clientes possível e possibilitar a restauração da energia para a região da rede a montante da falha.

Um conceito importante para o cálculo da confiabilidade é definir setores na rede de energia. Um setor é o conjunto de trechos de rede entre chaves ou dispositivos de proteção. A Fig. 2 ilustra a divisão em setores da rede de distribuição mostrada na Fig 1.

Figura 1: Redes com chaves.

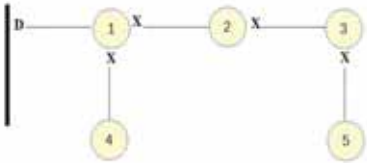
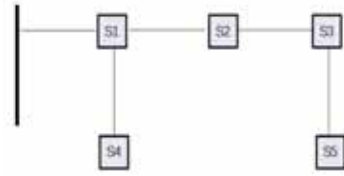


Figura 2: Divisão em setores.



Três indicadores de confiabilidade são adotados neste trabalho. FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora), definido pela razão entre o número total de consumidores interrompidos no setor pelo número total de consumidores na rede. DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora), caracterizada pela razão entre a duração total de interrupções dos consumidores atendidos em cada setor da rede, pelo número total de consumidores atendidos e END (Energia Não Distribuída) é definida pela energia não distribuída ao longo de um ano (período de planejamento adotado neste trabalho). Estes índices são formulados na Eq. 1.

$$FEC = \frac{\sum_{k=1}^S (\lambda_k N_k)}{\sum_{k=1}^S N_k}, DEC = \frac{\sum_{k=1}^S (U_k N_k)}{\sum_{k=1}^S N_k}, END = \sum_{k=1}^S U_k L_k, \quad (1)$$

sendo S o número de setores na rede, λ_k a taxa média de falha no setor k , N_k o número de clientes atendidos no setor k , U_k a duração total de interrupções para cada setor k e L_k é a carga média anual do setor k .

A confiabilidade em sistemas de distribuição de energia implica no fornecimento de energia elétrica aos consumidores sem interrupção. A decisão sobre a quantidade e localização de chaves, visa contribuir para a melhoria dos índices que medem a confiabilidade do sistema de distribuição, com o menor custo possível. A confiabilidade dos sistemas são avaliadas por um conjunto de índices, que fornecem informações de médias anuais obtidas de dados estatísticos, definidos para um certo conjunto de consumidores, cargas atendidas e componentes de rede.

3. Trabalhos Anteriores.

O problema de alocação ótima de chaves em uma rede de distribuição operada radialmente pertence à família de problemas de otimização combinatória. Esses problemas podem ser difíceis de se resolver otimamente usando técnicas de programação matemática (Assis, 2014).

Carvalho, Ferreira & da Silva (2005) tratam de um método baseado em algoritmos evolutivos, para o problema de alocação de chaves de manobra automáticas em rede de distribuição de energia, capaz de resolver instâncias reais de grande porte. Essa abordagem utiliza como heurística o algoritmo memético. O problema é dividido em três estágios: avaliação do benefício de cada chave alocada na rede através END; divisão da rede em subconjuntos independentes através de um algoritmo de particionamento polinomial e a resolução do PAC em cada um dos subconjuntos utilizando programação dinâmica.

A formulação proposta é baseada em um vetor binário indicando onde as chaves serão alocadas, as chaves RCS permitem o isolamento das falhas aumentando a qualidade do sistema de serviço. Os autores propõem testes incluem uma análise de sensibilidade do algoritmo como, o custo da energia, o orçamento máximo disponível para comprar e instalar chaves, e o prazo de amortização do investimento, tendo como função objetivo maximizar END. O algoritmo foi aplicado a uma rede urbana real com 15kV, considerando 11 candidatas a receber chaves de manobra (nós), selecionando arcos com altas taxas de falha e que representam lugares de difícil acesso. Consequentemente, as perdas são reduzidas devido à compensação do componente de fluxo de potência, permitindo diminuir em média 97% a quantidade de avaliações necessárias.

Celli & Pilo (1999) apresentam um algoritmo de programação dinâmica para encontrar a solução ótima do problema de alocação de chaves seccionadoras automáticas em redes de distribuição radial e cíclica. Dada a natureza combinatória do problema, os autores aplicaram apenas para redes de pequeno porte. Para avaliação do método proposto foram examinados dois casos: o primeiro com uma rede radial existente e o segundo com ciclos. Um pré-processamento procura diminuir o espaço de busca, considerando o benefício de se alocar uma única chave na rede em cada posição candidata. O algoritmo proposto é aplicado em estudos para alocação de 1, 2, 3 ou 4 chaves na rede. Os resultados obtidos reduziram o custo da energia não distribuída em 40,51%.

Levitin, Mazal-Tov & Elmakis (1995) propõem um procedimento de alocação ótima de chaves seccionadoras em sistemas de distribuição radiais, este procedimento visa minimizar a energia não fornecida causada por falhas na rede e o investimento com a instalação de chaves. Os autores consideram duas abordagens diferentes – O algoritmo realiza a alocação de um número específico de chaves seccionadoras quando as chaves de manobra já estão alocadas no sistema; É realizada a alocação de uma quantidade fixa de chaves de manobra e seccionadoras. O procedimento é sugerido para dois algoritmos genéticos: um padrão (AG) e um modificado (AGM). Comparando os dois algoritmos, o custo da energia não distribuída é menor utilizando o AGM.

4.Cálculo da Confiabilidade por Fluxo de Interrupção.

A rede de distribuição de energia elétrica operada radialmente pode ser associada a uma árvore orientada e conexa $T(V, A)$, enraizada na subestação (nó zero), sendo V o conjunto de nós associados aos pontos de carga da rede e A o conjunto de arcos associados aos disjuntores, chaves e trechos. Um arco $(i, j) \in A$, $i, j \in V$, segue a orientação do fluxo de corrente da subestação ao ponto de carga (Usberti, Cavellucci e Lyra Filho; 2014).

Cada nó $j \in V \setminus 0$ tem um nó antecessor i , ou simplesmente, $i = pred(j)$, pela definição de árvore, existe um único caminho direcionado ligando a raiz a cada um dos nós do grafo (Ahuja, Magnanti e Orlin; 1993).

Um conjunto de nós e arcos que representam o caminho direcionado ligando os nós i e j é representado por $caminho(i, j)$. Se tal caminho não existe então $(i, j) = \phi$ ou $(i, i) = i$. Para cada par ordenado de nós i e j , se o $caminho(i, j) \neq \emptyset$, j é a jusante de i , caso contrário, j é a montante de i .

Para calcular a carga a jusante de um nó i \tilde{l}_i , usamos a Eq. 2.

$$\tilde{l}_i = \sum_{j \in V_i} l_j, \quad (2)$$

sendo l_j a carga própria do nó j e V_i o conjunto de nós a jusante do nó i . Se $V_i = \{i\}$, i é uma folha da árvore T .

O tempo de interrupção das falhas locais do nó i (aquelas ocorridas no próprio nó), θ_i , é a duração esperada de interrupções do fornecimento de energia de um nó i durante o período de um ano. O tempo de interrupção θ_i é calculado usando a Eq. 3.

$$\theta_i = \lambda_i t, \quad (3)$$

sendo λ_i a taxa de falhas anuais associada ao nó i .

Determinando o tempo de interrupção própria de cada nó i , pode-se calcular o tempo de interrupção $\tilde{\theta}_i$ a jusante do nó i , conforme Eq. 4.

$$\tilde{\theta}_i = \theta_i + \sum_{(i,j) \in A \setminus A_s} \tilde{\theta}_j, \quad (4)$$

sendo A_s o conjunto de arcos $(i, j) \in A$ que tenham uma chave seccionadora instalada.

O fluxo de tempo de interrupção (Eq. 5) do nó j para o nó i (inverso da orientação de arco), é o tempo de interrupção esperado no nó i devido a falhas originadas nos nós $k \in V_j$, sendo $\tilde{\theta}_j = \theta_j + \sum_{k \in V_j} \tilde{\theta}_k$.

$$f_{ij} = \begin{cases} 0 & (i, j) \in A_s \\ \tilde{\theta}_j & (i, j) \in A \setminus A_s \end{cases} \quad (5)$$

Conforme demonstrado em Usberti, Cavellucci e Lyra Filho (2014), pode-se expressar a END como na Eq. 6.

$$END = \sum_{(i,j) \in A} (\tilde{l}_i - \tilde{l}_j) f_{ij} + \sum_{i \in V} \tilde{l}_i \theta_i \quad (6)$$

Observa-se também que os limites inferior E_{lb} e superior E_{ub} da energia não distribuída são encontrados através das igualdades relacionadas abaixo e devem ser respeitadas para que possamos encontrar a solução ótima do problema. A existência dos limitantes estão demonstrados em Usberti, Cavellucci e Lyra Filho (2014).

$$\sum_{i \in V} \tilde{l}_i \theta_i = E_{lb} \leq END \leq E_{ub} = \tilde{l}_0 \sum_{i \in V} \theta_i \quad (7)$$

A expressão do DEC, que será apresentada na Seção 4, é descrita na Eq. 8.

$$DEC = \frac{1}{\tilde{n}_0} \left(\sum_{(i,j) \in A} (\tilde{n}_i - \tilde{n}_j) f_{ij} + \sum_{i \in V} \tilde{n}_i \theta_i \right) \quad (8)$$

4.1 Exemplo Numérico

A seguir é fornecido um exemplo do cálculo da END por fluxo de tempo de interrupção. A rede tem cinco nós e cinco arcos. O cenário 1 possui apenas o disjuntor na subestação, o cenário 2, além do disjuntor, possui chaves instaladas nos arcos (1, 4) e (3, 5) conforme mostra a Fig. 3.

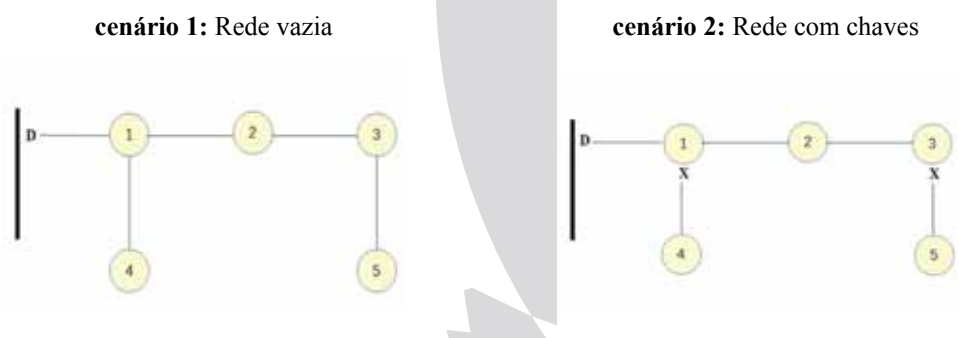


Figura 3: Rede vazia e rede com chaves alocadas.

A END pode ser calculada utilizando a Eq. 6. Para a rede da Fig. 3 tem-se:

$$END = (\tilde{l}_1 - \tilde{l}_2) f_{12} + (\tilde{l}_1 - \tilde{l}_4) f_{14} + (\tilde{l}_2 - \tilde{l}_3) f_{23} + (\tilde{l}_3 - \tilde{l}_5) f_{35} + \tilde{l}_1 \theta_1 + \tilde{l}_2 \theta_2 + \tilde{l}_3 \theta_3 + \tilde{l}_4 \theta_4 + \tilde{l}_5 \theta_5$$

Como exemplo, a Tabela 1 apresenta os valores dos parâmetros necessários ao cálculo da END.

Tabela 1: Pontos de Carga

/	1	2	3	4	5
l_i	0	0	0	5.000	4.000
λ_i	0.2	0.1	0.3	0.2	0.2
t	4	4	4	2	2

Fonte: Usberti *et al* (2014) e Billinton *et al* (1996).

A Tabela 2 mostra os cálculos efetuados usando as Equações 2 a 7 e os valores da Tabela 1.

Tabela 2: Cálculos Realizados

\	1	2	3	4	5
l_i	0	0	0	5.000	4.000
λ_i	0.2	0.1	0.3	0.2	0.2
t	4	4	4	2	2
θ_i	0.8	0.4	1.2	0.2	0.4
\tilde{l}_i	9.000	4.000	4.000	5.000	4.000
$\tilde{\theta}_i(1)$	3	2	1.6	0.2	0.4
$\tilde{\theta}_i(2)$	2.4	1.6	1.2	0.2	0.4

Os fluxos de tempo de interrupção nos arcos para os cenários 1 e 2 são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3: Cálculo do Fluxo por Arco

Cenários	(1, 2)	(1, 4)	(2, 3)	(3, 5)
$x_{ij}(1)$	2	0.2	1.6	0.4
$x_{ij}(2)$	1.6	0.2	1.2	0.4

Obtidos todos os parâmetros necessários pode-se calcular a END nos cenários 1 e 2. E_{lb} é o limite inferior da energia não distribuída, ou seja, representa a perda de energia inerente à rede. Utilizando a Eq. 7 tem-se:

$$E_{lb} = \sum_{i \in V} \tilde{l}_i \theta_i$$

$$E_{lb} = \tilde{l}_1 \theta_1 + \tilde{l}_2 \theta_2 + \tilde{l}_3 \theta_3 + \tilde{l}_5 \theta_5 = (9.000 \times 0.8) + (4.000 \times 0.4) + (4.000 \times 1.2) + (5.000 \times 0.2) + (4.000 \times 0.4) = 7.200 + 1.600 + 4.800 + 1.000 + 1.600 = 16.200$$

Calculando E_{lb} pode-se determinar a END por meio da Eq. 6.

Cenário 1:

$$END = (9.000 - 4.000) \times 2 + (9.000 - 5.000) \times 0.2 + (4.000 - 4.000) \times 1.6 + (4.000 - 4.000) \times 0.4 = 10.000 + 800 + 0 + 0 + E_{lb} = 10.800 + E_{lb} = 10.800 + 16.200 = 27.000$$

Cenário 2:

$$END = (9.000 - 4.000) \times 1.6 + (9.000 - 5.000) \times 0.2 + (4.000 - 4.000) \times 1.2 + (4.000 - 4.000) \times 0.4 = 8.000 + 800 + 0 + 0 + E_{lb} = 8.800 + E_{lb} = 8.800 + 16.200 = 25.000$$

A partir desses resultados, é possível afirmar que com apenas duas chaves alocadas na rede houve uma economia de 7,40% da energia não distribuída na rede.

5. Problema de Alocação de Chaves (PAC).

O modelo proposto até onde conhecemos da literatura é o primeiro modelo PLI para resolver o problema de alocação de chaves, que tem como solução, definir os arcos que devem receber as chaves seccionadoras para melhorar a confiabilidade do sistema ao menor custo. Os parâmetros utilizados no cálculo são: c_e custo da energia (R\$ 1.53), \tilde{n}_0 número de clientes acumulados no nó raiz (subestação) \tilde{n}_i o número de clientes no nó i , DEC_{limite} é o valor máximo permitido para o DEC (horas/ consumidor/ ano) e c_s o custo anualizado da chave seccionadora, incluindo o custo de aquisição, instalação e manutenção (R\$ 1.358).

O modelo possui a variável de decisão, x_{ij} , que representa alocar ($x_{ij} = 1$) ou não ($x_{ij} = 0$) uma chave seccionadora na rede. Usando as definições apresentadas até aqui, o modelo PAC pode ser formulado matematicamente da seguinte maneira:

Modelo PAC

$$\text{MIN } c_e \left(\sum_{(i,j) \in A} (\tilde{l}_i - \tilde{l}_j) f_{ij} + E_{lb} \right) + c_s \left(\sum_{(i,j) \in A} x_{ij} \right) \quad (9)$$

sujeito a:

$$\frac{1}{n_0} \left(\sum_{(i,j) \in A} (\tilde{n}_i - \tilde{n}_j) f_{ij} + DEC_{min} \right) \leq DEC_{limite} \quad (10)$$

$$f_{ij} - \sum_{(j,k) \in A} f_{jk} + M_j x_{ij} \geq \theta_j \quad (i, j) \in A \quad (11)$$

$$f_{ij} \geq 0 \quad (i, j) \in A \quad (12)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad (i, j) \in A \quad (13)$$

O parâmetro M_i é definido para cada nó i , $M_i = \sum_{j \in V_i} \theta_j$.

O modelo proposto utiliza na função objetivo (9), o custo da energia multiplicada pela energia não distribuída, somada com o custo das chaves instaladas na rede. A restrição (10) garante que o valor do índice de confiabilidade DEC, seja limitado por DEC_{limite} . O problema possui solução apenas se o DEC_{limite} está contido no intervalo $[DEC_{lb}, DEC_{ub}]$, sendo o DEC_{lb} o valor da confiabilidade obtida atribuindo uma chave em cada arco da rede e DEC_{ub} o valor da confiabilidade sem nenhuma chave alocada na rede. O cálculo do tempo do fluxo de interrupção é mostrado na equação (11). A equação (12) garante que os fluxos de interrupção f_{ij} sejam positivos e a equação (13) a integralidade das variáveis de decisão.

6. Experimentos Computacionais

O modelo PAC foi resolvido com um conjunto composto por cinco redes da literatura chamadas de R3, R4, R5, R6 e R7. Na primeira e segunda linha da Tabela 4 estão os valores dos nós e arcos referente a cada rede. A terceira linha contém os consumidores atendidos. Os limites inferior e superior da energia não distribuída foram calculados utilizando a Eq. 7 e são mostrados na quarta e quinta linha.

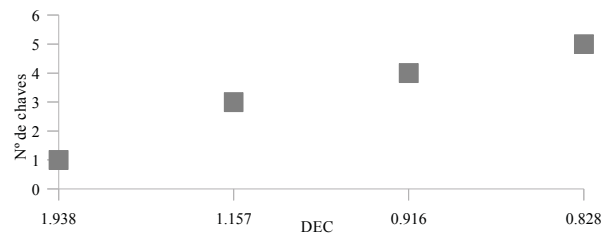
\	R3	R4	R5	R6	R7
Nós	33	94	143	204	880
Arcos	32	83	135	201	873
Consumidores	1.816	14.076	7.987	12.975	59.698
E_{lb}	0.569	0.082	0.204	0.052	2.136
E_{ub}	3.002	0.150	0.769	0.251	12.238

Tabela 4: Instâncias de redes usadas para avaliar o modelo do PAC

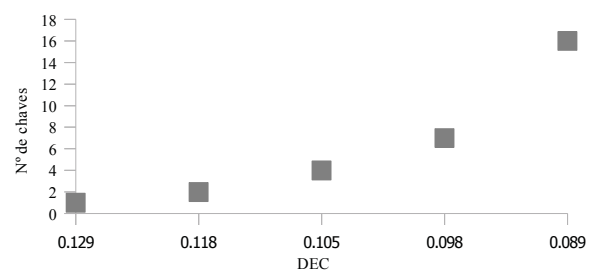
Através de uma pesquisa de mercado, estipulamos o custo da energia e das chaves de seccionamento, que foi apresentada no começo da sessão 5. Para resolver o modelo PAC proposto na Seção 4 foi utilizado o solver comercial Gurobi versão 5.6.3, com linguagem Java. Os experimentos foram realizados em um computador com processador Intel Core i5 – 3317U, 1.7 GHz com 6 GB de memória RAM. Cada rede de estudo foi testada sem limite de tempo estimado. Os resultados são apresentados nas Tabelas 5 a 9 e nas Figuras de 4 a 8.

Tabela 5: Resultados das Simulações com a rede R3

DEC_{lim}	F. Objetivo	Nº Chaves	DEC Solução	Tempo
0.569	45.265,061	32	0.569	0.00s
0.9	9.958,533	5	0.828	0.02s
1	8.601,083	4	0.916	0.00s
1.5	7.244,413	3	1.157	0.00s
2	4.533,061	1	1.938	0.00s
2.5	4.533,061	1	1.938	0.00s
2.9	4.533,061	1	1.938	0.00s
3.002	3.180,931	0	3.002	0.02s

Figura 4: DEC x Nº de chaves para rede R3

Tabela 6: Resultados das Simulações com a rede R4

DEC_{lim}	F. Objetivo	Nº Chaves	DEC Solução	Tempo
0.082	78.270,691	83	0.082	0.00s
0.09	25.308,997	16	0.089	0.01s
0.10	13.087,398	7	0.098	0.00s
0.11	9.013,685	4	0.105	0.00s
0.12	6.298,241	2	0.118	0.02s
0.13	4.940,754	1	0.129	0.00s
0.14	4.940,754	1	0.129	0.00s
0.150	3.583,601	0	0.150	0.01s

Figura 5: DEC x Nº de chaves para rede R4

Tabela 7: Resultados das Simulações com a rede R5

DEC_{lim}	F. Objetivo	Nº Chaves	DEC Solução	Tempo
0.204	152.397,550	135	0.204	0.00s
0.30	34.254,213	21	0.299	0.00s
0.40	20.676,889	11	0.395	0.00s
0.50	12.531,826	5	0.499	0.01s
0.60	9.817,355	3	0.554	0.00s
0.70	7.104,405	1	0.662	0.01s
0.75	7.104,405	1	0.662	0.00s
0.769	5.749,406	0	0.769	0.02s

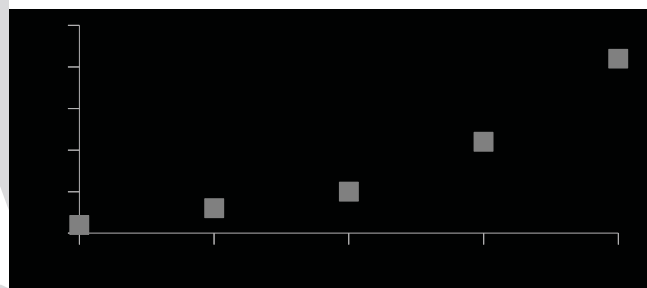
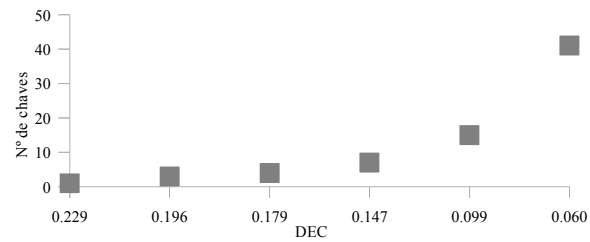
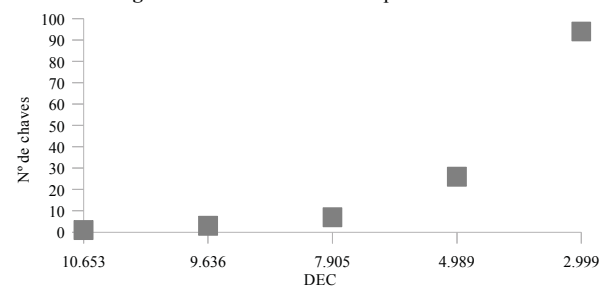
Figura 6: DEC x Nº de chaves para rede R5


Tabela 8: Resultados das Simulações com a rede R6

DEC_{limite}	F. Objetivo	Nº Chaves	DEC Solução	Tempo
0.052	192.319,573	201	0.052	0.00s
0.06	57.876,586	41	0.060	0.03s
0.10	22.571,551	15	0.099	0.03s
0.15	11.709,609	7	0.147	0.02s
0.18	7.636,944	4	0.179	0.00s
0.20	6.279,642	3	0.196	0.02s
0.24	3.565,052	1	0.229	0.00s
0.251	2.207,980	0	0.251	0.00s

Figura 7: DEC x Nº de chaves para rede R6.

Tabela 9: Resultados das Simulações com a rede R7

DEC_{limite}	F. Objetivo	Nº Chaves	DEC Solução	Tempo
2.136	1.583.457,261	873	2.136	0.02s
3	537.962,057	94	2.999	1247.08s
5	443.278,875	26	4.989	129.39s
8	418.033,312	7	7.905	166.77s
10	412.920,458	3	9.636	93.92s
11	410.397,895	1	10.653	0.00s
12	410.397,895	1	10.653	0.00s
12.238	409.344,844	0	12.238	0.02s

Figura 8: DEC x Nº de chaves para rede R7.


Nas Tabelas 5 a 9 a primeira coluna contém o valor de DEC_{limite} , na primeira linha é mostrado o valor do DEC_{lb} e na última linha o valor do DEC_{ub} . A segunda coluna mostra o valor da Função Objetivo. Na terceira é apresentado o número ótimo de chaves a serem alocadas. A quarta coluna mostra o valor DEC de cada intervalo. A última coluna mostra o tempo de execução. Observe que para as redes R3 a R6 o tempo computacional foi no máximo 0.03s. A maior rede R7 foi resolvida após 4 minutos, que é adequado considerando o tamanho da instância.

Suponhamos que a rede R3 esteja com o índice $DEC = 3.002$ com nenhuma chave alocada na rede e queira melhor seu índice de confiabilidade 2.433, assim o $DEC = 0.569$. Para isso, a empresa precisa investir 1.323,427% na alocação de chaves. O intervalo de maior investimento para alocar duas chaves foi o $DEC = 1.938$, que com um ganho de 0.781 no índice de confiabilidade, precisa investir 59,805% em alocação de chaves na rede, alocando três chaves. Podemos perceber porque o ganho na confiabilidade tem que ser feita gradativamente, pois os investimentos necessários tem custo elevado a cada ganho no índice DEC do sistema.

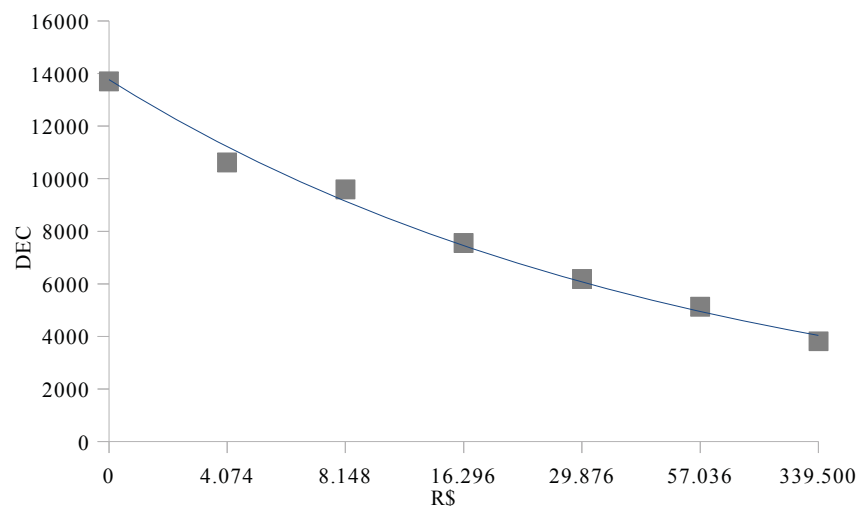
Escolhendo a rede R4, faremos uma análise de cada intervalo. Temos o índice $DEC = 0.15$ (o limitante superior da rede) com nenhuma chave alocada. Para obtermos uma melhoria de 0.021 no DEC, iremos alocar uma chave na rede, e para isso necessitamos investir 37,873%. Agora o índice $DEC = 0.129$ e temos uma chave alocada na rede. Continuando a melhorar o índice de confiabilidade da rede queremos um ganho de 0.011 no DEC, alocando mais uma chave. Com isso aumentamos o custo em 27,489%, e temos o $DEC = 0.118$, com duas chaves na rede. Aumentando a confiabilidade da rede em 0.013 o novo $DEC = 0.105$ e temos quatro chaves alocadas, mais para isso, é necessário um investimento de 43,108%. Agora com um ganho de 0.007 na confiabilidade do sistema, a rede fica com sete chaves alocadas, logo o novo $DEC = 0.098$, e para isso houve um investimento de 45,201% na rede. Para conseguirmos um ganho de 0.009 no DEC, necessita-se investir 93,382% em alocação de chaves na rede, com isso a rede fica com 16 chaves alocadas. Para termos mais um ganho na confiabilidade de 0.007, o índice fica $DEC = 0.082$, para isso precisa-se investir 209,269% na alocação de chaves, alocando chaves em todos os arcos da rede (limitante inferior da rede). Essas análises podem ser realizadas para todas

as redes em estudo através dos gráficos apresentados.

Pequenos ganhos no índice de confiabilidade exigem grandes investimentos em chaves, então, quanto mais chaves alocadas maior é a confiabilidade da rede, porém, a empresa precisa realizar maiores investimentos. Nos gráficos apresentados nas Fig. 4 a 8, temos a relação DEC com o número de chaves alocadas em cada rede. Os gráficos são excelentes ferramentas na tomada de decisão. Dependendo do quanto a empresa pode investir no momento ou a necessidade do ganho na confiabilidade do sistema, analisando os gráficos, o decisor irá obter a melhor estratégia para o momento.

Elaborando um estudo da confiabilidade da rede, supõe-se que as redes R3 a R5 fazem parte de um sistema de distribuição. Deseja-se obter a confiabilidade desse sistema relacionando-a com o custo. Para isso, é possível traçar uma curva da média obtida do (custo x DEC) do sistema. Cada ponto dessa curva corresponderá ao DEC e custo da média entre as redes R3 a R5.

Figura 9: A média do (custo x DEC) das redes R3, R4 e R5.



Analisando o gráfico apresentado na Fig. 9, é possível notar o compromisso que existe entre o custo da alocação de chaves e a confiabilidade da rede. Assim, pode-se escolher uma solução que privilegie a confiabilidade do sistema ou investimento em chaves.

7. Conclusão e Trabalhos Futuros.

A principal contribuição deste trabalho é a proposta de um modelo exato para solução do PAC usando o conceito de fluxo de tempo de interrupção. A partir desse modelo é possível obter o número e a localização ótima de chaves que devem ser alocadas em uma rede de distribuição. Os experimentos computacionais foram realizados utilizando cinco instâncias de redes de distribuição de energia elétrica. Os resultados demonstraram que a metodologia é capaz de economizar recursos e manter níveis desejados de confiabilidade com uma alocação de chaves criteriosa. A metodologia proposta pode ser usada como uma ferramenta para auxiliar tomadas de decisões nas áreas de planejamento, reconfiguração da rede, isolamento de falhas e restauração da rede em sistema de distribuição de energia.

Para trabalhos futuros será realizado experimentos computacionais com redes reais e estudos de planejamento a longo prazo, ou seja, onde e quanto alocar chaves na rede dentro de um horizonte de planejamento.

8. Referências Bibliográficas

ABRADEE – A Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica. Cartilha – Comparação Internacional de Tarifas de Energia Elétrica. Edição 2013.

Ahuja, K. R., Magnanti, L. T., e Orlin, B. J. Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications. Editora Prentice Hall, 1993.

ANEEL – A Agência Nacional de Energia Elétrica. Atlas de energia elétrica do Brasil, 2010.

Assis, L. S. Otimização de Alocação de Chaves em Redes de Distribuição de Energia Elétrica. Universidade Estadual de Campinas – Unicamp, Campinas – SP, 2014.

Billinton, R. e Allan, R. N. Reliability Evaluation of Power System. Plenum Press – New York, 2nd edn, 1996.

Carvalho, P. M. S., Ferreira, L. A. F. M. & da Silva, A. J. C. (2005). A decomposition approach to optimal remote controlled switch allocation in distribution systems, IEEE Transactions on Power Delivery 20(2): 1031–1036. doi: 10.1109/TPWRD.2004.838470.

Celli, G. & Pilo, F. (1999). Optimal sectionalizing switches allocation in distribution networks, IEEE Transactions on Power Delivery 14(3): 1167–1172. doi: 10.1109/61.772388.

Levitin, G., Mazal-Tov, S. & Elmakis, D. (1995). Genetic algorithm for optimal sectionalizing in radial distribution systems with alternative supply, Electric Power Systems Research 35: 149–155. doi: 10.1016/0378-7796(95)01002-5.

Usberti, F. L., Cavellucci, C., e Lyra Filho, C. A strong mixed integer formulation for a switch allocation problem. Anais do Congresso Brasileiro de Pesquisa Operacional, XXVIII SBPO, 2014.

Kagan, N., Oliveira, C. C. B, e Robba, E. J. Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. Blucher, 2ª edição – SP, 2010.