

ALGORITMO BASEADO EM PROGRAMAÇÃO INTEIRA E ANÁLISE ESTATÍSTICA DE CORRENTE PARA ESCOLHA DE RELIGADORES EM SISTEMAS COM SELF HEALING

RAFAEL R. C. VAZ, RICARDO A. P. FRANCO, FLÁVIO H. T. VIEIRA, SÉRGIO G. ARAÚJO, MARCELO S. CASTRO, GETÚLIO A. D. JÚNIOR

Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, Universidade Federal de Goiás Av. Universitária, n.º 1488 - quadra 86 - bloco A - 3º piso - Setor Leste Universitário, Goiânia - Goiás - CEP: 74605-010

E-MAILS: ENGRAFAELRCV@GMAIL.COM, RICARDOFRANCO3@GMAIL.COM, FLAVIO@EMC.UFG.BR, GRANATO@EMC.UFG.BR, MCASTRO@EMC.UFG.BR, GETULIO@EMC.UFG.BR

Abstract— This paper proposes an algorithm for determining the priority of clusters of remotely controlled switches for use in Self-Healing systems. This algorithm considers current in the conductor, continuity indicators and number of consumers. The proposed algorithm for ranking clusters is based on statistical analysis of current values by Decision theory and Binary Linear Programming for cluster choosing. The results show that the algorithm of cluster choice has great impact in case of financial resource constraints, in terms of number of served consumers, failure rates and compensation for the system.

Keywords— *Self-Healing*, Reclosers, Binary Linear Program, Hypotheses Test, Decision theory, Continuity Indicators

Resumo— Este trabalho propõe um algoritmo para determinação de prioridades dos agrupamentos (clusters) de chaves manobráveis remotamente para aplicação em sistemas com *Self-Healing* (Auto-recuperável). Este algoritmo considera tanto a corrente nos cabos como indicadores de continuidade e número de consumidores. O algoritmo de ranqueamento proposto dos clusters se baseia em uma análise estatística dos valores de corrente através da teoria da Decisão e na Programação Linear Binária para escolha dos clusters. Os resultados mostram que o algoritmo de escolha tem grande impacto, em casos de restrições orçamentárias, em termos de número de consumidores atendidos, taxas de falha e compensações para o sistema.

Palavras-chave— Self -Healing, Religadores, Programação Linear Binária, Teste de Hipótese, Teoria da Decisão, Indicadores de Continuidade.

1 Introdução

Os Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (SDEEs) são responsáveis pela administração do fornecimento de energia elétrica aos Centros Urbanos e às Áreas Rurais, atendendo desde pequenos consumidores residenciais a grandes indústrias. Eles são constituídos por subestações (SEs), alimentadores ou redes de distribuição (RDs), transformadores, equipamentos de proteção, equipamentos de manobra, dentre outros.

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é o órgão responsável por acompanhar, regular e fiscalizar as atividades e procedimentos das concessionárias de energia elétrica. A ANEEL acompanha a qualidade do serviço prestado pelas empresas por meio de Indicadores de Continuidade do Serviço de Distribuição de Energia Elétrica, que também são chamados de “índices de confiabilidade”.

As concessionárias que não cumprirem as metas estabelecidas estarão sujeitas a sanções, tais como o pagamento de compensações financeiras (multas). A cada ano, as metas se tornam mais exigentes, obrigando a empresa a realizar investimentos cada vez maiores na estruturação, proteção e gestão de sua rede de distribuição (Zambon, 2006) (Melo, et. al. 2011).

A variação da carga pode ultrapassar a capacidade limite dos cabos de distribuição, provocando superaquecimento e a consequente abertura do circuito, ou até mesmo danos físicos. Esses eventos interrom-

pem o fornecimento de energia elétrica aos consumidores, gerando grandes transtornos para a sociedade e multas para a concessionária. Portanto, é necessário mapear quais circuitos estão sobrecarregados e quais são capazes de receber mais carga com o objetivo de aplicar o *Self-Healing* (Auto-Recuperação) no sistema para que as transferências de carga sejam realizadas de forma segura.

O conceito de *Self-Healing* refere-se à capacidade da rede, ao encontrar um distúrbio, de: isolar o problema; reduzir o máximo de clientes afetados e retornar ao seu estado normal (Ohara, 2009). Desta forma, se fazem necessários mecanismos que transformem uma simples rede elétrica em uma rede inteligente, com a utilização de tecnologias mais adequadas ao sistema e à região. É importante que a operação da rede seja otimizada por meio de algoritmos que realizem manobras na rede e tomadas de decisão, aumentando a confiabilidade da concessionária ao prover o serviço.

Alguns trabalhos como (Kondo, 2015) (Petersen, et. al., 2007) propõem métodos para alocação de religadores, mas sem analisar fatores como a probabilidades de a corrente ultrapassar a corrente de *pickup* e sem apresentar um ranqueamento para escolha de religadores. Em (Sperandio, 2008), é apresentada uma metodologia para se determinar quais pontos serão automatizados, mas não se define um ranking de prioridades para escolha. Em nosso trabalho, propomos uma metodologia inovadora para determinação de quais pontos e religadores tem maior prioridade de escolha para serem utilizados para a automação da rede, analisando simultaneamente DEC, Número

de Consumidores, Compensação e Probabilidades da corrente ultrapassar a corrente de *pickup*. Para tal, propomos utilizar o conceito de *cluster* de religadores e não de religadores de forma isolada.

Este trabalho descreve uma metodologia escalável para aplicação em concessionárias de distribuição de energia visando elencar e estabelecer uma ordem de prioridade dos agrupamentos de chaves manobráveis remotamente (*clusters*) para aplicação de sistemas de *Self-Healing* tanto do ponto de vista de carga (fator excludente) como dos indicadores de continuidade. Tal metodologia parte da premissa que os religadores já estão instalados e devidamente coordenados. É realizada uma análise estatística dos valores de corrente baseada em Teoria da Decisão e Programação Linear Binária no intuito de classificar os *clusters*.

As próximas seções estão dispostas da seguinte forma: a seção 2 aborda o conceito de *Cluster* utilizado na metodologia; na seção 3 é descrita a metodologia de escolha dos *Clusters* desenvolvida; um estudo de caso é apresentado na seção 4; a conclusão do trabalho é apresentada na seção 5.

2 Cluster de Religadores

Nos sistemas de *Self-Healing* os pontos de manobra podem ser subdivididos em 2 (dois) tipos: elementos *Grid* e *Tie*. Os elementos *Grid* se encontram no caminho do alimentador ou nas saídas das subestações e têm o estado normalmente fechado. Já os elementos *Tie* se encontram na conexão entre dois circuitos de uma mesma ou diferentes subestações e têm o estado normalmente aberto.

Para a concepção dos sistemas de *Self-Healing* é necessário, ao menos, a abertura de um elemento *Grid* e o fechamento de um elemento *Tie* envolvendo dois circuitos distintos não obrigatoriamente da mesma Sub-Estação (SE). Podemos então dividir os sistemas de *Self-Healing* em *clusters* por número de elementos a partir da unidade mínima. Para definir o tipo do *cluster* utiliza-se a seguinte equação:

$$Tipo = \left[\left(\sum_{i=1}^n G_{1i} \right) + \frac{1}{2} \right] \cup \left[\left(\sum_{i=1}^m G_{2i} \right) + \frac{1}{2} \right] \quad (1)$$

onde n é o número de elementos do tipo *Grid* no Circuito 1, m é o número de elementos do tipo *Grid* no Circuito 2 e $G_{\#i}$ é o G -ésimo elemento do tipo *Grid* do Circuito $\#$ contando o religador da saída do circuito localizado na SE. O valor 0,5, acrescido a cada somatório, representa o elemento *Tie* de forma que somando os números de elementos do cluster sempre teremos um número inteiro.

A unidade mínima de um sistema de *Self-Healing* é dita *cluster* 1.5-1.5, onde para cada alimentador teremos um elemento *Grid* e um *Tie* conectando-os.

Nesse tipo de configuração o elemento *Grid* é, geralmente, o religador da SE. O tipo de *cluster* mais comumente encontrado é o 2.5-2.5. Nessa configuração, além dos religadores da saída da SE, existe em cada circuito um elemento *Grid* e um elemento *Tie* conectando os circuitos. Geralmente é instalado um elemento *Grid* no ponto médio de cada Circuito. A Fig. 1 ilustra um exemplo de *cluster* 2.5-2.5.

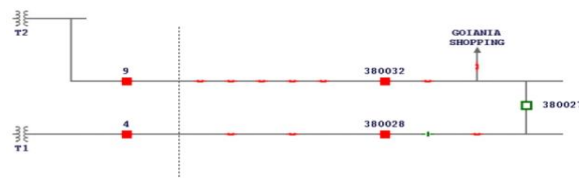


Figura 1. Exemplo de um *cluster* do tipo 2.5-2.5

Além dessas situações, existem os *clusters* mistos como, por exemplo, os *clusters*: 1.5-2.5, 2.5-3.5, entre outros.

3 Metodologia de Escolha de Religadores

Neste trabalho, a metodologia de escolha de religadores para o *Self-Healing* se baseia na análise de indicadores da rede de três formas. Primeiramente é feito um estudo de definição dos *clusters* observando quais manobras são possíveis caso ocorra uma falha considerando a corrente de *pickup* já estabelecida. Em seguida, os *clusters* são avaliados quanto à disponibilidade de manobras em cima de três métricas: máximo da corrente após a transferência, máximo da corrente no horário de maior demanda (08h-19h) e Probabilidade do Erro Tipo I, que serão tratadas posteriormente nesta seção. Por fim, a escolha de *clusters* de religadores é determinada aplicando-se um algoritmo de Programação Linear Binária (PLB) aos índices de Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC), à compensação feita aos consumidores devido a problemas na rede e ao número de consumidores à jusante.

Portanto, será discorrido nas próximas subseções sobre: o índice DEC, a compensação, estudo probabilístico das correntes (teste de hipótese e teoria de decisão), programação linear inteira e o algoritmo proposto.

2.3 Análise de Manobras e Probabilística de Corrente de Pickup

Um teste de hipótese é uma suposição sobre a lei de probabilidade de uma variável aleatória. Sendo as amostras aleatórias $(X_1, \dots, X_n)$ de uma variável aleatória X de pdf: $f(X; \theta) = f(X_1, \dots, X_n; \theta)$ dependente de um parâmetro θ , queremos testar a hipótese $\theta = \theta_0$, contra a hipótese $\theta = \theta_1$. A hipótese $\theta = \theta_0$ é denotada por H_0 e chamada de hipótese nula. A hipótese $\theta = \theta_1$ é de-

notada por H_1 e chamada de hipótese alternativa (Papoulis, et. al., 2012).

$$H_0 : \Theta = \Theta_0 \text{ (hipótese nula)} \quad (2)$$

$$H_1 : \Theta = \Theta_1 \text{ (hipótese alternativa)} \quad (3)$$

O teste de hipótese é um processo de decisão para estabelecer a validade de uma hipótese. O processo de decisão pode ser encarado como uma divisão da observação do espaço R_n em duas regiões R_0 (região de aceitação) e R_1 (região de rejeição).

Neste trabalho, estamos interessados no Erro tipo I: Rejeita-se H_0 (ou aceita-se H_1) quando H_0 é verdadeiro. A probabilidade de se cometer este erro é dada pela seguinte equação:

$$\alpha = P_1 = P(D_1 | H_0) = P(x \in R_1; H_0) = \int_{R_1} f(x | H_0) dx \quad (4)$$

onde R_0 e R_1 são as regiões de decisão.

No Teste MAP (*Maximum a Posteriori*) as regiões de decisão R_0 e R_1 podem ser encontradas utilizando a seguinte equação (Abramovich, et. al., 2006):

$$\Lambda(x) \underset{H_0}{\overset{H_1}{\gtrless}} \underset{H_0}{\overset{H_1}{\eta}} = \frac{P(H_0)}{P(H_1)} \quad (5)$$

onde $\Lambda(x)$ é a razão da máxima verossimilhança que pode ser da seguinte forma:

$$\Lambda(x) = \frac{f(x|H_1)}{f(x|H_0)} \quad (6)$$

2.2 Programação Linear

O objetivo da PL é encontrar a melhor maneira de reproduzir/distribuir os recursos disponíveis, tendo em vista o atendimento a determinado objetivo, em geral, a maximização de lucros ou a minimização de custos. Este objetivo é expresso através da "Função Objetivo", uma função linear que leva em consideração o objetivo estabelecido, assim como cada atividade envolvida no processo em estudo (Souza, 2014).

A PL pode conter em suas variáveis apenas valores inteiros, limitando a função e as restrições a valores que estejam nesse universo de números. A PLB (Programação Linear Binária) é uma extensão da PL, onde as variáveis do modelo somente podem assumir os valores binários (0 ou 1). Ela é utilizada para problemas nos quais os recursos em questão têm apenas duas possibilidades: serem utilizados ou não. Os problemas de PLB são problemas que podem ser expressos como na Eq.7.

$$\min_x f^T x \text{ sujeito a } \begin{cases} Ax \leq b \\ A_{eq}x = b_{eq} \\ x \in \{0,1\} \end{cases} \quad (7)$$

onde x representa o vetor de variáveis a serem determinadas, f , b e b_{eq} são vetores de coeficientes, A e A_{eq} são matrizes de coeficientes, e T representa a matriz transposta. A expressão a ser maximizada ou

minimizada é chamada de Função Objetivo ($f^T x$ nesse caso). As inequações são restrições que especificam o polígono sobre o qual a função objetivo será otimizada.

Neste trabalho, os tipos da função objetivo e das restrições do problema justificam o uso de métodos baseados em gradiente como é o caso da PLB. É possível, através desse algoritmo de otimização, selecionar os clusters de religadores sob a ótica de indicadores de continuidade e número de consumidores sem recorrer a heurísticas diferentes ou mais avançadas.

Para o problema em questão, utilizou-se como restrição a equação de igualdade sendo o valor de b igual ao número de clusters que se deseja escolher e A_{eq} é um vetor de valores unitários de tamanho igual ao número total de clusters. A variável de saída, x , corresponde a um vetor binário de tamanho igual ao número de clusters. Quando x igual a 1 o cluster deve ser selecionado, caso contrário, x é 0. O vetor de coeficientes f corresponde as variáveis avaliadas para escolha dos clusters que se deseja minimizar como por exemplo o valor do DEC.

Neste trabalho, é aplicada a técnica *Branch-and-Bound* para resolver a PLB, descrita resumidamente a seguir (MathWorks, 2015):

- Procura-se por uma solução binária factível, respeitando todas as restrições;
- Atualizam-se os melhores pontos binários factíveis à medida que a árvore de busca cresce;
- Verifica-se se a solução encontrada é a melhor solução factível possível para resolver o problema respeitando as restrições.

2.3 Algoritmo Proposto para Escolha de Clusters

Uma vez definidos os *clusters*, a análise de carga dos mesmos se faz necessária. O algoritmo proposto de classificação dos *clusters* possui duas etapas. Cada etapa é fundamental para determinar o nível de prioridade de cada *cluster* utilizando diferentes técnicas. Na primeira etapa, são analisadas as manobras realizadas, observando-se a probabilidade de a corrente ultrapassar o *pickup*. Além disso, é analisada a disponibilidade da realização das manobras aplicando testes de hipótese e a teoria da decisão. Na segunda etapa, os *clusters* são analisados por meio da programação linear inteira em função da carga, visto que a carga é um fator limitante para se efetuar *Self-Healing*.

- **1ª Etapa:** Análise das Manobras e Análise Estatística sobre Ultrapassagem do Limite Máximo de Operação

A corrente de *pickup* ou corrente de disparo é a máxima corrente suportada no circuito. Esse valor é definido nos religadores a fim de proteger o circuito contra sobrecorrentes. Nesta etapa é realizada uma análise da probabilidade de a corrente total do circuito, após a manobra, ultrapassar a corrente de *pickup* multiplicada por um fator de segurança e também a análise da corrente máxima, ambas agrupadas por

horário e por religador (*NODE*). Os valores de corrente de falta não são considerados na análise. Nesse trabalho, utiliza-se 90% da corrente de *pickup* como limitante.

Uma vez analisados os *clusters* do ponto de vista da carga se faz necessário elencá-los de acordo com a disponibilidade para realização das manobras. Para tanto foram estipuladas 3 métricas: máximo da corrente após a transferência, máximo da corrente no horário de maior demanda e Probabilidade do Erro Tipo I. Em outras palavras, a Probabilidade de Erro do Tipo I é a probabilidade de se rejeitar a hipótese de que a corrente ultrapassará a corrente de *pickup* após manobra quando esta hipótese é verdadeira. Para estimar tal probabilidade, faremos uso de testes de hipóteses e teoria da decisão através das equações 4 e 5 (Berger, 1985).

Para aplicar os testes de hipótese é necessário definir a hipótese nula, H_0 , e, por conseguinte, a hipótese alternativa, H_1 . As mesmas são definidas pelas seguintes equações:

$$H_0: I \geq 0.9 * I_{pickup} \quad (8)$$

$$H_1: I < 0.9 * I_{pickup} \quad (9)$$

onde I é a variável aleatória, corrente, e I_{pickup} é a corrente de *pickup* para cada *NODE*.

Uma vez definidas as hipóteses, procede-se com a aplicação do Teste MAP segundo a Equação 5. O resultado do teste MAP define a região de decisão para o cálculo da probabilidade do Erro tipo I dada pela Equação 4.

Essa etapa atribuirá pontuações aos *clusters*, devido às análises estatísticas, possibilitando determinar, probabilisticamente, quais manobras poderão ocorrer, analisando a corrente pós-manobra, antes dela ocorrer.

• 2ª Etapa: Programação Linear

Nesta etapa é utilizada a PLB para fazer uma classificação de prioridades dos *clusters*. Para a classificação, deve-se definir as variáveis a serem consideradas para a resolução das equações que definem o problema. Na metodologia proposta, são analisadas as seguintes variáveis: DEC, DEC Ponderado, Compensação Total, Compensação Total Normalizada e Número de unidades Consumidoras. Também são consideradas as cargas críticas como fator de decisão na escolha do *cluster*.

No final desta etapa, são obtidas informações sobre cada *cluster* em função das variáveis analisadas, permitindo que se pontue e classifique cada *cluster* em função de seus resultados.

4 Metodologia de Escolha de Religadores

A metodologia proposta foi aplicada em um estudo de caso da concessionária CELG-D. O algoritmo foi aplicado durante a fase de planejamento de implantação de *Self-Healing* dentro de um projeto piloto 368 CELG-D, ANEEL, UFG "Validação de Arquiteturas de Automação na Rede de Distribuição

via Técnicas Avançadas de *Self-Healing* e Diferentes Tecnologias de Comunicação, dentro do Conceito *Smart Grid*" realizado na cidade de Goiânia, Goiás.

Após a definição da rede em que o sistema atuará, deve-se determinar os *clusters* que serão trabalhados. Neste caso, foram escolhidos 13 (treze) *clusters* representando toda a rede elétrica considerada. Em seguida, deve-se aplicar as duas etapas do algoritmo proposto. A Tabela 1 apresenta os tipos de *cluster* do estudo de caso.

Tabela 1. Tipos de *Clusters* do Estudo de Caso.

Cluster_ID	Tipo	Tie	Nº de Cargas Críticas
1	2.5-2.5	GN13380048	2
2	2.5-2.5	NULL	0
3	2.5-2.5	GN13380045	2
4	2.5-2.5	GN13380040	3
5	2.5-2.5	GN13380043	1
6	1.5-2.5	GN13380033	0
7	2.5-2.5	GN13380031	0
8	2.5-2.5	GN13380027	1
9	2.5-2.5	GN13380002	3
10	1.5-2.5	GN13380049	8
11	2.5-2.5	GN13380008	1
12	NULL	NULL	4
13	2.5-3.5	GN13380029	1

As cargas críticas expressas por *cluster* na Tabela I são unidades consumidoras do Grupo A que impactam no faturamento da concessionária ou na imagem da mesma como hospitais e órgãos públicos. Os valores NULL indicam que o *cluster* não está operacional. Nas análises de manobras, os *clusters* 2 e 12 não foram considerados, pois há elementos nestes *clusters* que não estavam operacionais.

• 1ª Etapa: Análise das Manobras

Realizar a análise de manobras com uma grande quantidade de informações, torna-se esta tarefa complexa. Uma opção é analisar o histograma da série temporal de cada manobra. Portanto, são gerados os histogramas de frequência da corrente ultrapassar o limite de operação para os *clusters*. A Fig. 3 mostra o histograma gerado para os valores da corrente de *pickup* definidos em cada *cluster*.

Pela análise da Fig. 3, pode-se observar que a região de concentração de carga está no período entre as 08 e 19hs sendo que no período noturno há folga. Logo, os *clusters* definidos no piloto apresentam característica de consumo comercial onde o horário de ponta se concentra entre às 14h e 17h.

Para aplicar os testes de hipótese é necessário definir a hipótese nula, H_0 , e, por conseguinte, a hipótese alternativa, H_1 . As mesmas são definidas pelas equações 8 e 9. A fim de avaliar o *cluster* como um todo é realizada a análise obtendo o máximo dos resultados dos testes dentro do mesmo *cluster*. A Fig. 4 apresenta os resultados da análise dos indicadores estatísticos por *cluster*.

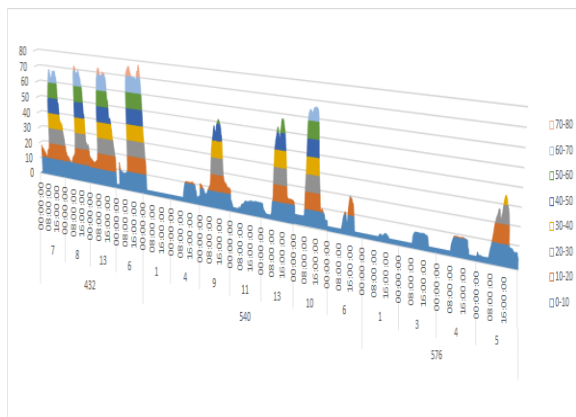


Figura 3. Frequência por horário onde a corrente é maior a máxima corrente de operação do circuito

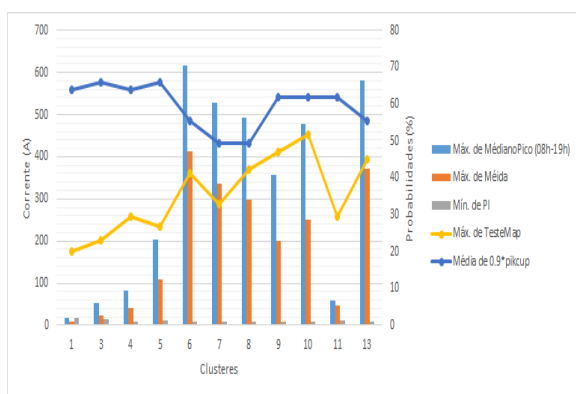


Figura 4. Análise dos indicadores Estatísticos por Cluster

Através da análise da Fig. 4 pode-se observar que a corrente máxima por horário ultrapassa a corrente de 600 A apenas para o cluster 6. Nesse cluster todo o circuito é transferido em caso de falta uma vez que se trata de um cluster 1-5,2-5. Os clusters com os maiores valores máximos de corrente são: 6, 13, 7, 8, 9 e 10. A Figura 5 e mostra a classificação dos clusters a partir dos resultados da Fig. 4.

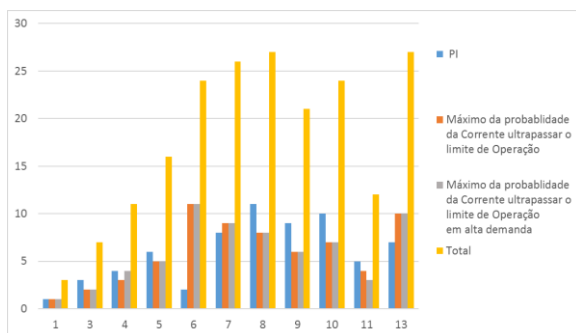


Figura 5. Classificação considerando o máximo da posição de cada Node dentro do Cluster

Ao compararmos os resultados apresentados na Figura 5 podemos verificar que os clusters 13, 8, 7, 6, 10 e 9 apresentaram as maiores pontuações e, portanto, os piores resultados nas métricas estabelecidas.

2ª Etapa: Escolha dos Clusters Utilizando PLB

A PLB desenvolvida utilizou três variáveis normalizadas pelo número de unidades consumidoras a jusante do religador agrupadas no cluster: números de consumidores a jusante do religador, diferença do DEC em relação a meta do conjunto vezes o número de unidades consumidoras a jusante do religador e compensação total. A Tab. 2 apresenta os valores dessas variáveis.

Tabela 2. Variáveis para a PLB.

Cluster_ID	Consumidores	DEC	Compensação
1	1,2622	-0,0142	7,5563
2	1,3463	-0,0155	48,4947
3	1,2964	0,0006	11,8715
4	0,9602	0,0526	14,6125
5	1,7655	-0,0249	13,0316
6	1,5860	0,0132	16,6779
7	0,8798	0,0286	11,1509
8	1,1144	0,0666	50,0294
9	1,3743	0,0878	18,9801
10	2,0000	0,0921	32,9199
11	0,8989	0,0885	21,1789
12	0,6885	0,0569	15,4900
13	1,1781	-99,9090	32,7026

A PLB foi implementada no software MATLAB definindo-se 5 clusters de um total de 13. Ou seja, no problema (7), adotou-se $A_{eq} x = 5$ para que 5 clusters fossem escolhidos, onde A_{eq} é um vetor de valores unitários de tamanho 13. Os resultados são apresentados na Tab.3.

O cluster 10 foi o único comum a todas as variáveis analisadas. Os clusters classificados utilizando alguma das variáveis foram: 2, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 13.

Resultados obtidos

Conforme apresentado nas duas etapas, considerando DEC, Número de Consumidores e Compensação Total combinados, o ranking de clusters é: 8, 9, 10, 11 e 13. Já com relação à probabilidade de ultrapassar a corrente de pickup temos a seguinte ordem (da maior prioridade de escolha para a menor): 1, 3, 11, 4, 5, 6, 9, 7, 10, 8 ou 13.

Dentre os clusters mais importantes em termos de DEC, Número de Consumidores e Compensação Total e que apresentem menor probabilidade de a corrente ultrapassar a corrente de pickup os eleitos foram 1, 3, 4, 5 e 11.

Tabela 3. Resultados da PLB.

Cluster_ID	Consumidores	DEC	Compensação
1	0	0	0
2	0	1	1
3	0	0	0
4	0	0	0
5	0	1	0
6	0	1	0
7	0	0	0
8	1	0	1
9	1	1	0
10	1	1	1
11	1	0	1
12	0	0	0
13	1	0	1

5 Conclusão

Neste trabalho, é proposta uma metodologia de classificação de *clusters* a partir de análise probabilística e da programação linear binária.

A abordagem em *cluster* permite a simplificação das unidades de *Self-Healing* partindo da menor unidade, facilitando a gerência das unidades. Uma vez identificados os *clusters* é realizada a simulação da manobra a fim de fornecer subsídios técnicos ao projetista sobre a viabilidade da implantação do *Self-Healing* para um determinado conjunto de *clusters*. A análise estatística das manobras se mostra uma ferramenta poderosa, possibilitando antever horários de alta demanda e possíveis colapsos do sistema, dando ao projetista maior segurança e previsibilidade na tomada de decisão.

Os indicadores de probabilidade analisam as chances de a corrente máxima ultrapassar o limite de operação, a probabilidade máxima da corrente ultrapassar o limite de operação no horário de pico e probabilidade de rejeitar a hipótese nula. Estes indicadores foram utilizados a fim de classificar os *clusters* quanto à possibilidade de se realizar o *Self-Healing*.

O uso da Programação Linear Binária para a solução do problema de ranqueamento dos *clusters* se mostrou um método viável que permite escalar a solução para futuros projetos de sistemas *Self-Healing* em concessionárias de energia. É possível, através dessa análise, apontar os possíveis pontos candidatos sob a ótica de indicadores de continuidade e número de consumidores.

Pretende-se, como trabalho futuro, integrar a metodologia proposta de planejamento deste trabalho, com algoritmos eficientes de tomada de decisão de automação na fase de operação.

Referências Bibliográficas

- Abramovich F., Angelini C., 2006. "Bayesian Maximum a posteriori Multiple Testing Procedure". *Sankhyā: The Indian Journal of Statistics*, Volume 68, Part 3, pp. 436-460.
- ANEEL, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica Revisão 6. Disponível em http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/M%C3%B3dulo8_Revis%C3%A3o_6_Retifica%C3%A7%C3%A3o_1.pdf. Acessado em 10/08/2015.
- ANEEL, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST Módulo 1 - Introdução Revisão 7. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/PRODIST%20-20M%C3%B3dulo%201_Revisao_7.pdf Acessado em 10/08/2015.
- ANEEL, Resolução Normativa ANEEL nº 166. Disponível em
- <http://www.aneel.gov.br/cedoc/bren2005166.pdf>. Acessado em 10/08/2015.
- Berger, J. O., 1985. "Statistical Decision Theory and Bayesian Analysis". Springer Series in Statistics. Springer New York.
- Kondo, D. V., 2015. "Alocação de Religadores Automatizados em Sistemas de Distribuição". Dissertação de Mestrado - Universidade de São Paulo.
- MathWorks, "Mixed-Integer Linear Programming Algorithms". Disponível em: <http://www.mathworks.com/help/optim/ug/mixed-integer-linear-programming-algorithms.html>. Acessado em 10/08/2015.
- Melo, V. H. C., Silva, S. R., Vaz, R. R. C., 2011. "Melhoria dos Índices de Confiabilidade Através da Coordenação da Proteção da Distribuição". In: IV SBSE - Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2011, Goiânia. IV SBSE Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos.
- Ohara, A. T. 2009. "Sistema de Recomposição Automática de Redes de Distribuição – A aplicação do conceito de Self-Healing", Anais do VI CIERTEC 2009 - Seminário Internacional sobre Smart Grid em Sistemas de Distribuição e Transmissão de Energia Elétrica. Belo Horizonte, Minas Gerais.
- Papoulis A., Pillai S. U., 2012. "Probability, Random Variables and Stochastic Processes". McGraw-Hill Europe 4th edition.
- Petersen, V. C., Medeiros, M. B. D. A. P., Gonçalves, A., Nakahata, M. T., Reichel, A. G., Zambenedetti, V., Klimkowski, M., Wagner, R., 2007. "Metodologia e Software Especialista para o Planejamento da Modernização Operacional e da Qualidade da Energia Elétrica das Redes de Distribuição", Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/biblioteca/citenel2007/pdf/it52.pdf>
- Souza, G. B. C., 2014. "Otimização do Posicionamento de Concentradores GPRS em Redes Elétricas Inteligentes Utilizando Programação Linear e Teoria de Filas". Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Goiás.
- Sperandio, M., 2008. "Planejamento da Automação de Sistemas de Manobras em Redes de Distribuição". Tese de Doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina.
- Zambon, E., 2006. "Otimização de índices de confiabilidade em redes de distribuição de energia elétrica". Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Espírito Santo.