

Determinação de Prioridade na Escolha de Religadores para *Self Healing* Utilizando Programação Inteira e Análise Probabilística de Corrente

Rafael Ribeiro de Carvalho Vaz, Ricardo Augusto Pereira Franco, Flávio Henrique Teles Vieira, Sérgio Granato de Araújo, Marcelo Stehling de Castro, Getúlio Antero de Deus Júnior
Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação
Universidade Federal de Goiás
Goiânia, Brasil

Resumo — Este trabalho tem por objetivo propor uma metodologia escalável para aplicação em concessionárias de distribuição de energia visando elencar e estabelecer uma ordem de prioridade dos agrupamentos (*clusters*) de chaves manobráveis remotamente para aplicação de sistemas de *Self Healing* (Auto-recuperável). Esta metodologia considera tanto a carga (fator excludente) como indicadores de continuidade e número de consumidores. É realizada uma análise estatística dos valores de corrente baseada em teoria da Decisão e Programação Linear Binária no intuito de classificar os *clusters*. Os *clusters* são avaliados quanto à disponibilidade de manobras de acordo com três métricas: média da corrente após a transferência, média da corrente no horário de maior demanda e Probabilidade do Erro Tipo I (probabilidade de se rejeitar uma hipótese verdadeira).

Abstract — This paper aims to propose a scalable methodology for application in power distribution utilities in order to enable and establish choice priorities to the remoted-controlled clustered switches for application in Self Healing systems. In the proposed methodology, it is considered both the charge (excluding factor) and the continuity indicators. It is carried out a statistical analysis of current values based on the theory of decision and Binary Linear Programming in order to sort the clusters. Clusters are evaluated for availability of maneuvering based on three metrics: average current after the transfer, average current in the increased demand period and Type I Probability Error (probability of reject a true hypothesis).

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

I. INTRODUÇÃO

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” [1].

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 [2, 3].

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 interrompem 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 [4]. 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 [5][6], propõem métodos para alocação de religadores mas sem analisar fatores como a probabilidade da corrente ultrapassar a corrente de *pickup* e sem apresentar um ranqueamento para escolha de religadores. Em [7], 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. É realizada uma análise estatística dos valores de corrente baseada em Teoria da Decisão e é aplicada Programação Linear Binária no intuito de classificar os *clusters*.

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

II. 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 $G_{\#i}$ -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.

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

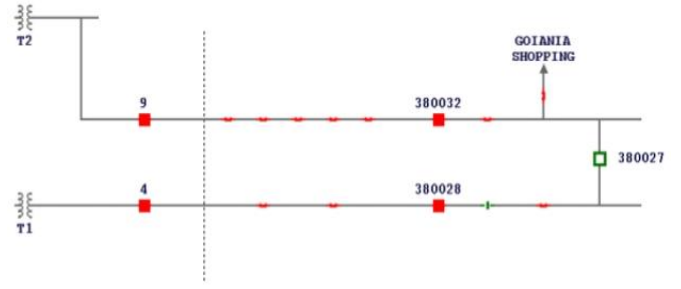


Fig. 1. Exemplo de um *cluster* do tipo 2.5-2.5.

III. METODOLOGIA DE ESCOLHA DE RELIGADORES

Neste trabalho, a metodologia de escolha de religadores 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: média da corrente após a transferência, média da corrente no horário de maior demanda e Probabilidade do Erro Tipo I (seção III.A), 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 de escolha de religadores.

A. 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 denotada por H_1 e chamada de hipótese alternativa [8].

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

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

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:

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

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 [9]:

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

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

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

B. 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 [10].

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 [11]:

- 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.

C. 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. 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 média, ambas agrupadas por horário e por religador (NODE). Nesse trabalho, utiliza-se 90% da corrente de *pickup*.

Uma vez analisados os clusters do ponto de vista da carga é necessário elencá-los de acordo com a disponibilidade para realização das manobras. Para tanto foram estipuladas 3 métricas: média da corrente após a transferência, média 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 [12].

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 que compõe a matriz de coeficientes 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. Define-se também um número de *clusters* a serem escolhidos através do vetor de coeficientes. Foram utilizadas apenas as equações de igualdade. Também são consideradas as cargas críticas como fator de decisão na escolha do *cluster*.

Ao final desta etapa são escolhidos o total de *clusters* definidos no vetor de coeficientes em função das variáveis analisadas, permitindo que se pontue e classifique cada um através de seus resultados.

IV. ESTUDO DE CASO

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 *SelfHealing* e Diferentes Tecnologias de Comunicação, dentro do Conceito *Smart Grid* realizado na cidade de Goiânia, Goiás.

Foram analisados um total de 21 alimentadores da região central de Goiânia. A potência total instalada é de 49,331 MVA divididos em consumidores Residenciais, comerciais e Industriais perfazendo um total de 122.451. Após a definição da

rede em que o sistema atuará, determinam-se os *clusters*. 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.

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* 6, 2 e 12 não foram considerados, pois havia 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.2, 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.

Através da análise da Fig. 3, pode-se observar que a corrente média por horário ultrapassa a corrente de 600 A apenas para o *cluster* 10. Nesse *cluster* todo o circuito é transferido em caso de falta. Os *clusters* com os maiores valores médios de corrente são: 13, 10, 8, 7 e 9.

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 a média dos resultados dos testes dentro do mesmo *cluster*. O resultado é apresentado na Fig. 4.

Os *clusters* 7, 8, 9, 10 e 13 possuem uma alta probabilidade de a corrente ultrapassar o limite de operação da ocorrência de uma manobra. A Figura 5 e a Tabela 2 mostram a classificação

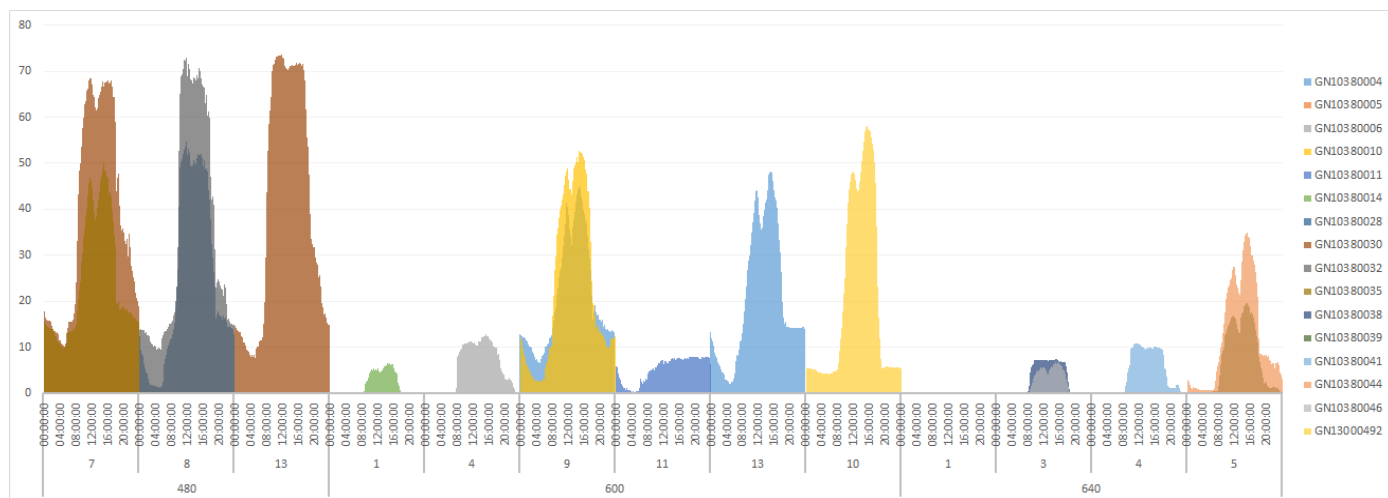


Fig. 2. Frequência por horário onde a corrente é maior a máxima corrente de operação do circuito por religador do *cluster* agrupados pela corrente de *pickup*.

dos clusters a partir dos resultados da Fig. 4.

Ao compararmos os resultados apresentados na Tab. 2 podemos verificar que os clusters 13, 10, 8, 7 e 9 apresentaram as maiores pontuações e, portanto, os piores resultados nas métricas estabelecidas. Ao comparar o resultado da classificação utilizando a média com o resultado da soma dos nodes houve uma inversão na primeira posição entre os clusters 8 e 13, o que indica que na média o cluster 13 apresentou resultados piores do que o 8.

TABELA 1. TIPOS DE CLUSTERS DO ESTUDO DE CASO

Cluster_ID	Tipo	Tie	Número 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	NULL	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

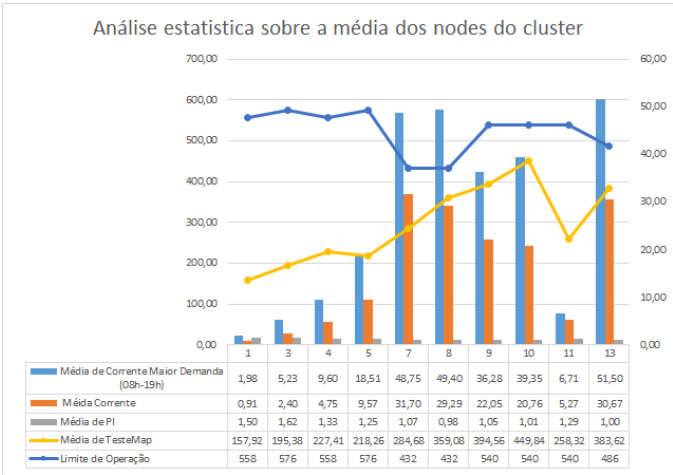


Fig. 3. Análise dos indicadores Estatísticos por Cluster.

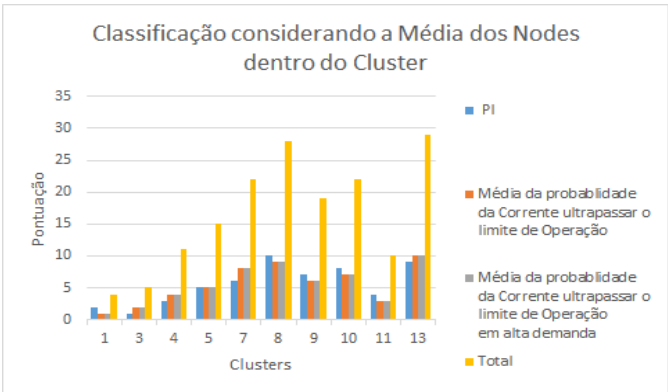


Fig. 4. Classificação considerando a Soma da posição de cada Nodes dentro do Cluster.

TABELA 2. PONTUAÇÃO DOS CLUSTER AVALIADOS DE ACORDO COM AS MÉTRICAS ESTABELECIDAS

Cluster_ID	PI	Média da probabilidade da Corrente ultrapassar o limite de Operação	Média da probabilidade da Corrente ultrapassar o limite de Operação em alta demanda	Total
1	2	1	1	4
3	1	2	2	5
4	3	4	4	11
5	5	5	5	15
7	6	8	8	22
8	10	9	9	28
9	7	6	6	19
10	8	7	7	22
11	4	3	3	10
13	9	10	10	29

• 2ª Etapa: Escolha dos Clusters Utilizando PLB

A PLB desenvolvida utilizou três variáveis normalizadas pelo número de unidades consumidoras do alimentador agrupadas no cluster: números de consumidores a jusante do religador, diferença do DEC em relação a meta do conjunto vezes o número de unidades consumidores a jusante do religadore compensação total. Ao final foram combinados os resultados de 3 minimizações das funções objetivo $f^T x$ para escolha dos clusters. A Tab.3 apresenta os valores dessas variáveis.

TABELA 3. 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	-99,909	32,7026

A PLB foi implementada no software MATLAB definido-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.4.

TABELA 4. VARIÁVEIS PARA A 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

CLUSTER_ID	CONSUMIDORES	DEC	COMPENSAÇÃO
9	1	1	0
10	1	1	1
11	1	0	1
12	0	0	0
13	1	0	1

O *cluster* 10 foi o único comum a todas as variáveis analisadas. Os *clusters* classificados neste método, da maior prioridade para a menor, foram: 2, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 13.

• Resultados obtidos

Conforme apresentado nas duas etapas, considerando DEC, Número de Consumidores e Compensação Total, o *ranking* de *clusters* é (da maior prioridade para menor prioridade de escolha): 8, 9, 10, 11, 13, 5 e 6, sendo que a prioridade do *cluster* 5 foi superior ao 6 simplesmente porque apresenta uma carga crítica a mais. Já com relação à probabilidade ultrapassar a corrente de *pickup*, temos a seguinte ordem (da maior prioridade de escolha para a menor): 1, 3, 11, 4, 5, 9, 10, 7, 8, 13.

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

V. CONCLUSÕES

Neste trabalho, é proposta uma metodologia de classificação de *clusters* a partir de análise probabilística e da programação linear binária. A análise das manobras é realizada a nível dos religadores GRID.

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 nos permitem analisar as chances da corrente média ultrapassar o limite de operação, a probabilidade média da corrente média 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. O algoritmo respondeu de forma rápida sem a necessidade de utilização de heurísticas mais avançadas.

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.

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), à Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação e à CELG-D e FUNAPE pelo suporte ao projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] 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.
- [2] Zambon, E., "Otimização de índices de confiabilidade em redes de distribuição de energia elétrica". Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Espírito Santo, dezembro de 2006
- [3] MELO, V. H. C.; SILVA, S. R.; VAZ, R. R. C., "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, 2011.
- [4] OHARA, A. T. "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: 2009.
- [5] Kondo, D. V., "Alocação de Religadores Automatizados em Sistemas de Distribuição". Dissertação de Mestrado - Universidade de São Paulo, janeiro de 2015.
- [6] V. C. Petersen, M. B. D.A.P. Medeiros, A. Gonçalves, M. T. Nakahata, A. G. Reichel, V. Zambenedetti, M. Klimkowski, R. Wagner, 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>
- [7] Sperandio, M., "Planejamento da Automação de Sistemas de Manobras em Redes de Distribuição". Tese de Doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina, dezembro de 2008.
- [8] Papoulis A., S. Unnikrishna Pillai. "Probability, Random Variables and Stochastic Processes". McGraw-Hill Europe 4th edition 2012.
- [9] Abramovich F., Angelini C. Bayesian Maximum a posteriori Multiple Testing Procedure. Sankhyā : The Indian Journal of Statistics 2006, Volume 68, Part 3, pp. 436-460.
- [10] G. B. C. Souza, Otimização do Posicionamento de Concentradores GPRS em Redes Elétricas Inteligentes Utilizando Programação Linear e Teoria de Filas. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Goiás, junho de 2014.
- [11] 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.
- [12] Berger, J. O., "Statistical Decision Theory and Bayesian Analysis". Springer Series in Statistics. Springer New York 1985.