

Metodologia de Alocação Otimizada de Dispositivos de Proteção em Alimentadores Baseada em Metodologia Heurística

Anderson H. Uyekita, André Meffe, Dário Takahata, Gabriel Rogatto, Marcelo Maia, Vitor Takeda.

Abstract - This paper presents a methodology for optimal allocation of protection devices along the feeder, so that, in case of a fault, entails the least impact to consumers. Thus it is used a mathematical algorithm that considers several variables located upstream, downstream, and of the bar itself under study, determining the points optimized for installation and allocation of protection elements. It is inferred that, currently, there may be excessive protection elements installed in the network of primary dealers. That diverges from the ideal, perhaps due to the lack of a mathematical methodology which helps the designer to establish the appropriate amount to allocate. Therefore, it is expected that such tool may help to improve the selectivity of the devices, to reduce failure rate with the consequent.

Palavras-chave – Instalação e Alocação otimizada, desempenho otimizado, dispositivos de proteção, índices de confiabilidade.

I. INTRODUÇÃO

Os sistemas de distribuição de energia elétrica vêm a cada dia incorporando novas metodologias para o aumento do desempenho dos sistemas, isto é, diminuir o tempo e a frequência com que os clientes ficam sem energia elétrica. Isto se deve à necessidade do atendimento das metas propostas pelo agente regulador e da satisfação aos clientes.

Um problema visto na alocação de proteções é a determinação da quantidade otimizada de dispositivos necessários para a proteção e a localização destes em um alimentador, visto suas características estruturais, indicadores técnicos, a dependência destes em relação às interferências ambientais, etc. O método propõe determinar a quantidade otimizada e localização destes, com o objetivo de evitar uma alocação desnecessária ou a falta de proteções.

A proposta do trabalho é a de apresentar um algoritmo matemático, que propõe a distribuição inteligente dos dispositivos de proteção (chaves-fusíveis, religadores, seccionadores etc.) ao longo de um alimentador. Para isso, será

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL.

A. H. Uyekita, A. Meffe, D. Takahata, G. Rogatto e V. Takeda trabalham na Daimon Engenharia e Sistemas (e-mails: anderson.uyekita@daimon.com.br; andre.meffe@daimon.com.br; dario@daimon.com.br; gabriel.rogatto@daimon.com.br; vitor.takeda@daimon.com.br).

M. Maia trabalha na CPFL Paulista (e-mail: mmaia@cpfl.com.br)

empregado um método de busca em profundidade com o método do gradiente para a obtenção das configurações e posteriormente utilizar-se-á um índice de mérito para avaliação/quantificação dos melhores pontos de instalação e suas vantagens.

Normalmente, a metodologia e critérios de alocação de dispositivos de proteção são definidos pela área de Proteção da concessionária (esse órgão tem como objetivo definir critérios/regras para a instalação dos dispositivos de proteção). A nova metodologia tem também como objetivo secundário, avaliar os atuais critérios/regras, através de uma nova alocação de dispositivos de proteção de um alimentador já existente, melhorando onde possível, a robustez do sistema.

II. OBJETIVOS

Este artigo apresenta uma metodologia de alocação otimizada de dispositivos de proteção ao longo do alimentador que, na ocorrência de uma falha, acarrete o menor impacto aos clientes. Utiliza-se assim, um algoritmo matemático que pondera algumas variáveis localizadas à montante, à jusante e da própria barra em estudo, determinando-se os pontos otimizados para alocação dos elementos de proteção. Infere-se que, atualmente, existam excessivos elementos de proteção instalados na rede primária das concessionárias, divergentes da ideal, motivados, talvez, pela falta de uma metodologia matemática que auxilie o projetista a alocá-los na quantidade correta. Espera-se assim que tal ferramenta auxilie na melhora da seletividade dos dispositivos, diminuição da taxa de falhas e a melhora nos indicadores de continuidade dos alimentadores.

III. METODOLOGIA [2]

Essencialmente, esta metodologia contempla o compromisso entre três variáveis: Uma da própria barra (que, na verdade reflete o custo de alocação de um determinado tipo de proteção na mesma), uma à montante, e outra à jusante da barra.

A primeira variável está relacionada com o custo de instalação, realocação ou remoção do dispositivo de proteção da barra em análise.

A segunda variável (à montante) considera o dispositivo de proteção com a funcionalidade de um “protetor” e, sendo assim, quanto mais “variáveis protegidas” houver à montan-

te, melhor será o seu desempenho como tal. Esta característica, portanto, faz com que o elemento de proteção seja instalado no final do alimentador.

A terceira variável considera o dispositivo de proteção como um “detector” e, sendo assim, quanto mais “variáveis a serem detectadas” estiverem à jusante, melhor também será seu desempenho. Esta característica, portanto, faz com que o elemento de proteção seja instalado no início do circuito.

Desta forma, pretende-se encontrar um local ótimo para a alocação deste elemento, de forma a atender estas três características de natureza conflitante.

A rede de distribuição de energia elétrica brasileira é predominantemente aérea e radial, e a probabilidade de algum defeito ocorrer é proporcional à extensão dos mesmos. Logo, pode-se utilizar o comprimento das redes como uma variável que expressará a probabilidade do defeito, sendo portanto, um exemplo de variável à jusante a ser “detectada”.

O exemplo mais imediato para a variável à montante (variável a ser protegida) é a quantidade de unidades consumidoras, pois deseja-se que o menor número delas seja atingida pelos defeitos. Alternativamente, pode-se pensar em outras variáveis a serem “protegidas”, como a potência instalada, ou a energia consumida, etc. Evidentemente, pode-se aperfeiçoar a lista de variáveis, tanto à montante, quanto à jusante, contemplando-se outros fatores. Por exemplo, à montante (variáveis a serem protegidas), poder-se-ia considerar consumidores preferenciais, compensações por transgressão aos indicadores de continuidade, etc.

Para a metodologia foram inseridas algumas restrições que deverão atender os critérios de instalações de equipamentos de proteção. Os critérios abaixo são uma pequena listagem das normas e procedimentos técnicos importantes para alocação de proteção:

- Alocação de religadores e seccionadores serão permitidos apenas em troncos urbanos;
- Chaves repetidoras somente serão alocadas em redes rurais;
- O número máximo de chaves fusíveis em série não deverá ultrapassar a quatro, com base na coordenação e seletividade;
- Na zona protegida pela unidade instantânea dos relés dos alimentadores, deve-se evitar o uso de elos fusíveis, pois, com defeitos transitórios, haveria a queima de elo e ainda uma operação automática do disjuntor.

Para auxiliar a explanação do algoritmo, utilizar-se-á a figura 1, que é uma rede fictícia apenas com o disjuntor. Inicialmente, consideram-se como consumidores as variáveis x, y, z e w , e como comprimentos dos trechos, as variáveis a, b, c e d .

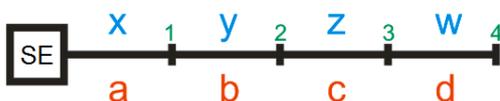


Figura 1: Rede simplificada.

Os locais candidatos à alocação de dispositivos de proteção são as barras 1, 2 e 3. A tabela 1 apresenta os resultados das simulações de defeitos nos quatro trechos, apenas com o disjuntor instalado inicialmente.

Tabela 1: Consumidores afetados pelo defeito em cada trecho.

Trecho do defeito	Proteção atuada	Cientes protegidos
a	Disjuntor	0
b	Disjuntor	0
c	Disjuntor	0
d	Disjuntor	0

No caso de contingências em uma rede apenas com o disjuntor instalado, todos os consumidores do alimentador serão afetados e para mitigar a quantidade de consumidores atingidos pelo defeito, instala-se um dispositivo de proteção. A tabela 2 apresenta os casos da instalação desta proteção e o efeito dela na rede ao se simular defeitos nos trechos da rede fictícia. O comprimento de cada trecho será utilizado para ponderar a probabilidade de acontecer o defeito. A função objetivo do algoritmo é a de maximizar a probabilidade de proteção aos clientes, e esse índice será chamado de Desempenho Máximo do Alimentador (DMA).

Tabela 2: Consumidores afetados pelo defeito em cada trecho.

Local Instalação	Trecho do defeito				Clientes protegidos	Probabilidade (DMA)
	a	b	c	d		
1	0	x	x	x	x	$x \cdot (b+c+d)$
2	0	0	(x+y)	(x+y)	(x+y)	$(c+d) \cdot (x+y)$
3	0	0	0	(x+y+z)	(x+y+z)	$d \cdot (x+y+z)$

Para o caso de uma proteção instalada na posição 1, tem-se que o Desempenho Máximo do Alimentador é a somatória das parcelas de valores esperados de todos os trechos. Isto é, multiplica-se o comprimento pela quantidade de consumidores protegidos. A figura 2 ilustra o conceito de consumidores à montante e o comprimento à jusante.

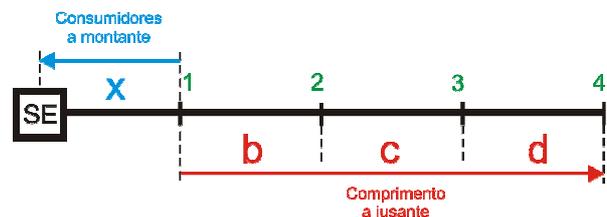


Figura 2: Ilustração do cálculo do DMA.

Conforme a figura 2, pode-se simplificar o cálculo do DMA usando-se o conceito de consumidores à montante e comprimento à jusante, a partir do local de instalação da proteção. A equação (1) apresenta o cálculo do DMA.

$$DMA_{\text{clientes}} = \underbrace{x \cdot b}_{\text{trecho b}} + \underbrace{x \cdot c}_{\text{trecho c}} + \underbrace{x \cdot d}_{\text{trecho d}} = x \cdot (b + c + d) \quad (1)$$

Adotar-se-á a notação alternativa do DMA_{clientes} conforme (2) para a implementação computacional.

$$DMA_{clientes} = \sum_1^k \left(\sum_1^{n_k} C_i \cdot \sum_n^m L_i \right) \quad [\text{Clientes x Km}] \quad (2)$$

onde,

- n_k : barra com a proteção alocada;
- m : número total de barras;
- C_i : quantidade de clientes no trecho i ;
- L_i : comprimento do trecho i ;
- k : número de proteções instaladas ao longo do alimentador.

Conforme a quantidade de proteções a serem instaladas, e considerando-se que todos os trechos são possíveis candidatos, a quantidade de soluções se torna de natureza fatorial, isto é, a explosão combinatória torna a busca pela solução ótima, uma tarefa proibitiva, forçando a utilização de um algoritmo de otimização.

Portanto, adotou-se o Método de Busca em Profundidade para diminuir o tempo computacional, e assim tornar o problema de alocação de dispositivos de proteção em tempo factível. No Método de Busca em árvore em Profundidade, a cada nível da árvore serão analisadas todas as n possibilidades e posteriormente será escolhida a melhor solução. Após a escolha da melhor opção para um dado nível, este terá $n-1$ filhos que deverão ser analisados analogamente ao pai. A figura 3 exemplifica este procedimento.

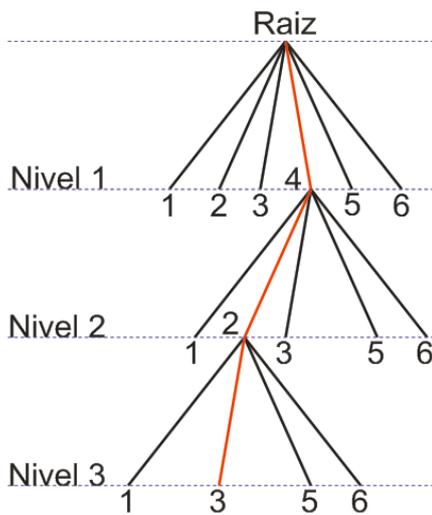


Figura 3: Exemplo de busca em profundidade com o método do gradiente (trajetória otimizada em vermelho).

Note-se no exemplo que, a raiz possui seis candidatos, e a escolha da barra 4 se deve ao critério de avaliação. O nível de parada é a quantidade de proteções instaladas ao longo do alimentador (alternativamente poder-se-ia utilizar outro critério de parada, como por exemplo, a diferença do ganho entre uma iteração e outra posterior). Um aspecto positivo dessa metodologia é o tempo computacional reduzido, comparado com as técnicas de busca exaustiva. Um estudo aprofundado de busca em profundidade pode ser encontrado em [1].

De acordo com o método de otimização adotado, o fluxograma da figura 4 expressa de forma sucinta, os passos da ferramenta computacional.

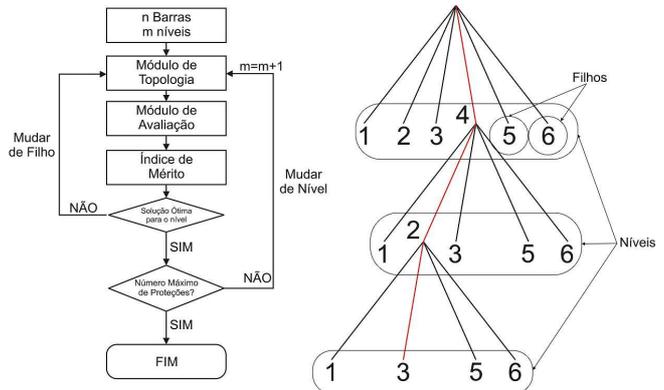


Figura 4: Fluxograma da metodologia adotada.

Pode-se aumentar a quantidade de variáveis em estudo, tanto à montante, quanto à jusante, substituindo-se o comprimento pelas ocorrências ou os consumidores por consumo de energia. A figura 5 apresenta as variações de parâmetros possíveis, assim como a introdução do custo associado à alternativa proposta.

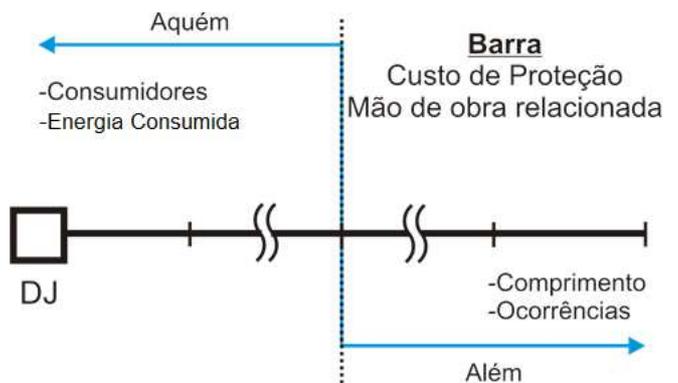


Figura 5: Variáveis passíveis de implementação do DMA.

Desta forma para contemplar a relevância do consumo de energia do consumidor pode-se analogamente ao caso do $DMA_{clientes}$, utilizar a energia consumida ao invés de clientes (alternativamente, a variável a ser analisada poderia ser a potência instalada, ou a Energia Não Distribuída - END). A equação (3) apresenta o $DMA_{energia}$.

$$DMA_{energia} = \sum_1^k \left(\sum_1^n P_i \cdot \sum_n^m L_i \right) \quad (3)$$

onde,

- P_i : potência instalada no trecho i ;

Para solucionar o problema de alocação de dispositivos de proteção, considerando multiobjetivos (minimizar custo de alocação e realocação, maximizar $DMA_{cliente}$, $DMA_{energia}$, $DMA_{ocorrências}$, clientes (normais ou preferenciais), custos de instalação, etc.), onde cada parâmetro é ponderado por um peso. A equação (4) é um exemplo de uma função multi-objetivo.

$$\text{Maximizar } \left\{ \text{Índice de Mérito} = \frac{x \cdot (1 - \text{Custo}) + y \cdot \text{DMA}_{\text{cliente}} + z \cdot \text{DMA}_{\text{energia}}}{x + y + z} \right\} \quad (4)$$

onde,

x, y e z : são os pesos de cada parâmetro;
 $x+y+z=1$.

Note-se que os valores inseridos na função “Índice de Mérito” devem ser necessariamente normalizados para efeito de análise, caso contrário, haverá comparações entre dados de dimensões/unidades distintas.

Após as várias abordagens do DMA (Clientes, Energia Consumida, etc.) pode-se analisar o comportamento do desempenho (robustez do alimentador) conforme a Figura 6. Este possui uma característica de saturação após a inserção demasiada de proteções, ou seja, deve-se impor um limite da quantidade de dispositivos de proteção, analisando-se a relação Custo/Benefício da alocação de uma nova proteção.

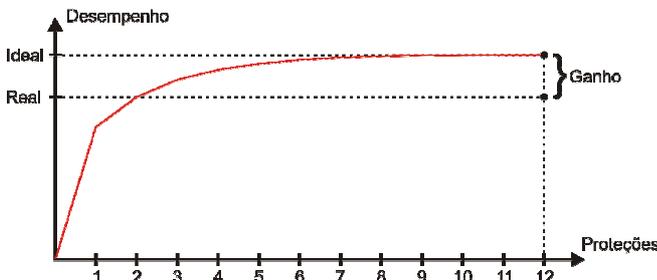


Figura 6: Curvas de Desempenho para dois casos hipotéticos, (nota-se que a curva em vermelho satura em um risco elevado diferentemente da curva em verde, onde o desempenho assume um valor baixo).

O DMA no caso real, representa um ponto, para a quantidade de dispositivos de proteção instalados em campo (no caso exemplo da Figura 6, um circuito com 12 proteções). A diferença entre as curvas “ideal” e “real” deve-se principalmente à distribuição espacial das variáveis analisadas (Energia Consumida, Cliente, etc.) ao longo do circuito. O objeto de análise deste projeto é o de identificar aqueles alimentadores que apresentem diferenças significativas entre o DMA real e o DMA ideal, para uma mesma quantidade de proteções alocadas, podendo-se assim obter ganhos, quer seja pelos investimentos evitados, quer seja pela melhoria na distribuição de recursos de inspeção e manutenção de circuitos.

Ressalte-se, entretanto que, para determinados circuitos, poderá não haver uma melhora na performance, pois existem alimentadores que possuem um desempenho naturalmente inferior. Isso pode ocorrer quando o número de clientes e/ou a potência instalada no final de um circuito é elevado (Por exemplo, um condomínio de alto padrão isolado da cidade). Uma solução para o aumento da performance deste sistema seria o atendimento deste condomínio por um outro alimentador que esteja mais próximo.

Para exemplificar a metodologia, utilizar-se-á a rede fictícia da figura 7. Observe-se que esta rede é ramificada e pos-

sui quatro proteções. Assim sendo, a função do $\text{DMA}_{\text{cliente}}$ será a de determinar uma nova disposição dos dispositivos de proteção.

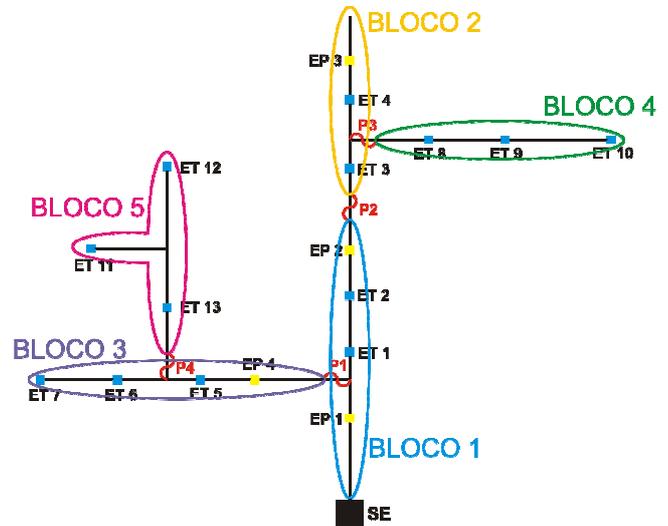


Figura 7: Rede fictícia utilizada para simulações.

A tabela 3 apresenta a quantidade de consumidores e comprimento presentes em cada bloco, facilitando-se assim os cálculos do DMA.

Tabela 3: Consumidores de cada bloco e comprimento do bloco.

	Consumidores	Comprimento
Bloco 1	23	212
Bloco 2	10	131
Bloco 3	21	184
Bloco 4	17	179
Bloco 5	14	179

Conforme (1), calcula-se o $\text{DMA}_{\text{cliente}}$. A equação (5) a seguir apresenta o cálculo do $\text{DMA}_{\text{cliente}}$ para a rede com quatro proteções.

$$\text{DMA}_{\text{cliente,real}} = \frac{50 \cdot 363}{P_1} + \frac{58 \cdot 310}{P_2} + \frac{10 \cdot 179}{P_3} + \frac{21 \cdot 179}{P_4} = 41.679 \quad (5)$$

Normalizando-se o $\text{DMA}_{\text{cliente,real}}$ pelo comprimento total e consumidores total tem-se (6).

$$\text{DMA}_{\text{cliente,real}} = \frac{41.679}{85 \cdot 885} = 0,554 \quad (6)$$

Para realizar uma comparação igualitária, o $\text{DMA}_{\text{cliente,ideal}}$ deverá também ter apenas quatro proteções instaladas. Utilizando-se a ferramenta computacional DMA, obtém-se os locais otimizados dos dispositivos de proteção, conforme apresentados na figura 8 e na tabela 4, com os locais de instalação de proteção otimizados.

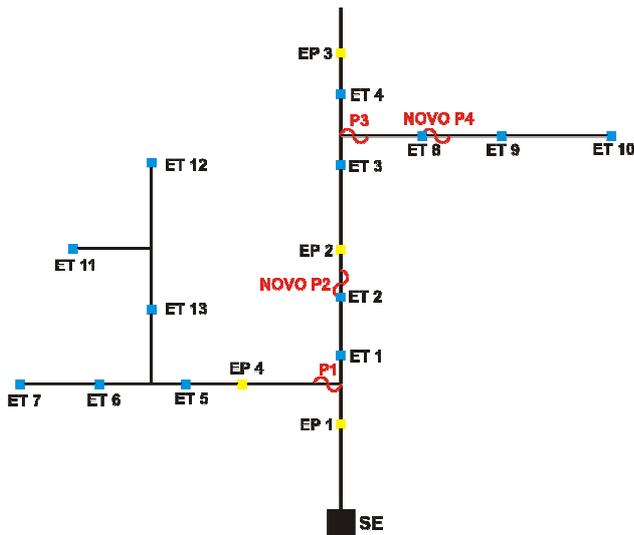


Figura 8: Rede fictícia após a alocação otimizada de proteções.

Tabela 4: Valores de $DMA_{cliente,ideal}$

Local de Instalação	Comprimento à jusante	Consumidores à montante	DMA parcial
Novo P2	371,44524	56	20801,97
P1	364,33964	49	17851,62
P3	179,94932	21	3778,93
Novo P4	140,95734	19	2678,30
$DMA_{cliente,ideal}$			45110,83

Normalizando-se o $DMA_{cliente,ideal}$ pelo comprimento total e consumidores total, tem-se (7).

$$DMA_{cliente,ideal} = 0,60 \quad (7)$$

Assim sendo, o ganho entre as posições ideais e reais dos dispositivos de proteção está apresentado conforme (8):

$$Ganho = DMA_{cliente,ideal} - DMA_{cliente,real} \quad (8)$$

$$Ganho = 0,60 - 0,554 = 0,046$$

Logo, utilizando-se o software DMA pode-se obter um ganho normalizado de 0,046, inferindo-se que com quatro proteções, a diferença (ganho) entre a alocação das proteções ideal e real seja da ordem de 4%.

Similarmente, faz-se uma análise semelhante para todos os alimentadores em estudo, de forma a se ter uma relação de ganhos (diferença entre o DMA ideal e o DMA real), de forma a permitir que o usuário tenha condições de avaliar qual(is) alimentador(es) deverá(ão) ter os dispositivos de proteção instalados ou realocados, de acordo com a sua restrição orçamentária.

IV. RESULTADOS – SOFTWARE IMPLEMENTADO [3]

A. Cálculo do DMA Real e do DMA Ideal

Será apresentado um caso exemplo, com a carga de todos os alimentadores da SE VPL com o intuito de calcular o valor de DMA de todos eles, e verificar qual, ou quais que apresentam a melhor perspectiva de intervenção para se otimizar o indicador de continuidade FEC. Esta sinalização será dada para o(s) alimentador (es) que possui(em) a maior diferença relativa.

Assim, será mostrado o passo-a-passo para o cálculo do DMA dos alimentadores da SE VPL:

a) Selecionar todos os circuitos: Este procedimento está apresentado na figura 9 a seguir.

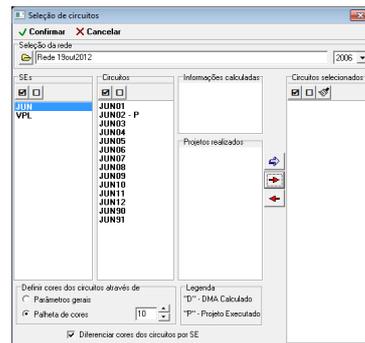


Figura 9: Tela de Seleção dos Alimentadores da SE VPL.

Assim, a tela da Ferramenta DMA com todos os alimentadores da SE VPL está mostrada na figura 10 a seguir.

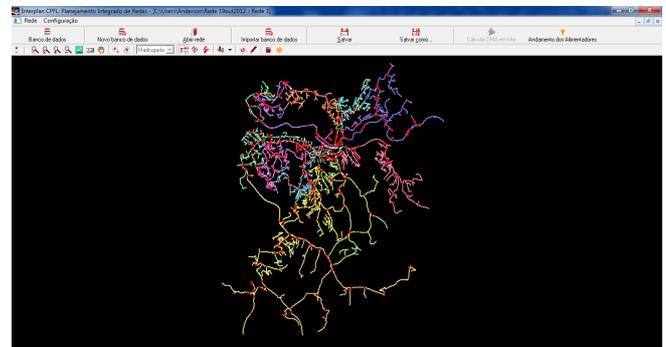


Figura 10: Alimentadores da SE VPL.

Após eliminar-se as bases-fusíveis de transformadores, através do ícone (ícone de relé), processa-se o cálculo do DMA, através do ícone (ícone de engrenagem), e produz-se a tela da figura 11 a seguir.

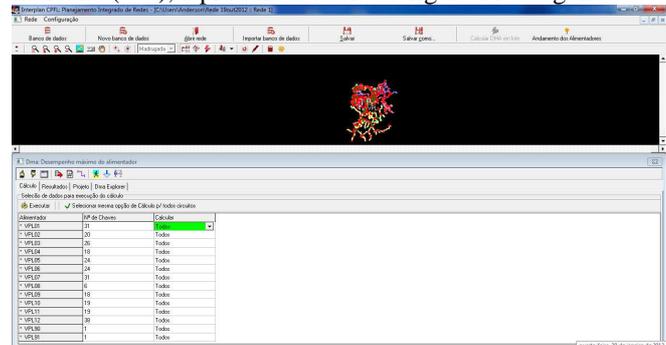


Figura 11: Relação de Alimentadores da SE VPL, Respective Dispositivos de Proteção e Cálculo de Todos os Tipos de DMA.

Os resultados do cálculo do DMA estão apresentados a seguir, conforme as figuras 12, 13 e 14 a seguir:

a) Delta DMA Consumidor

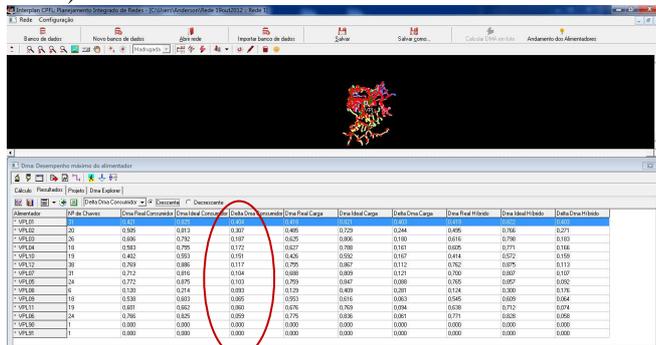


Figura 12: Resultado da Hierarquização do DMA pela Diferença entre o Valor Ideal e o Valor Real dos Alimentadores da SE VPL, pelo Critério DMA Consumidor.

b) Delta DMA Carga

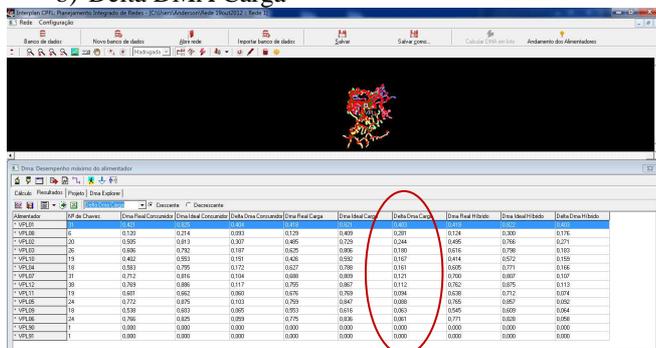


Figura 13: Resultado da Hierarquização do DMA pela Diferença entre o Valor Ideal e o Valor Real dos Alimentadores da SE VPL, pelo Critério DMA Carga.

c) Delta DMA Híbrido

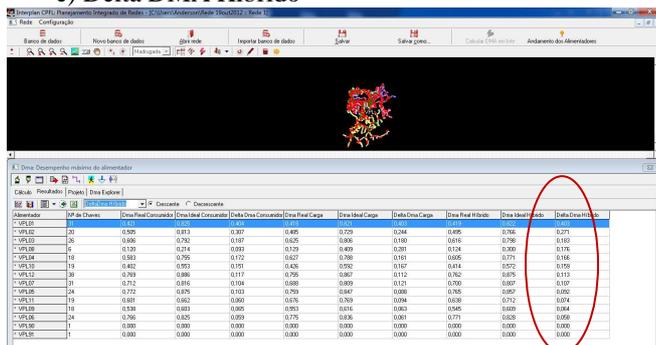


Figura 14: Resultado da Hierarquização do DMA pela Diferença entre o Valor Ideal e o Valor Real dos Alimentadores da SE VPL, pelo Critério DMA Híbrido.

Alternativamente, pode-se ver os resultados em forma de relatório, conforme mostrado na Figura f5 a seguir, com relação à hierarquização do DMA realizada pela diferença entre o valor ideal do DMA e o seu respectivo real, dos alimentadores da SE VPL, pelo critério DMA consumidor.



DMA Consumidor		Lista de Circuitos:		
Circuito:	Dma Real:	Dma Ideal	Diferença:	
VPL01	0,421	0,825	0,404	
VPL02	0,505	0,813	0,307	
VPL03	0,606	0,792	0,187	
VPL04	0,583	0,755	0,172	
VPL10	0,402	0,553	0,151	
VPL12	0,769	0,886	0,117	
VPL07	0,712	0,816	0,104	
VPL05	0,772	0,875	0,103	
VPL08	0,120	0,214	0,093	
VPL09	0,538	0,603	0,065	
VPL11	0,601	0,662	0,060	
VPL06	0,766	0,825	0,059	
VPL30	0,000	0,000	0,000	
VPL31	0,000	0,000	0,000	

Figura 15: Resultado em Forma de Relatório, da Hierarquização do DMA pela Diferença entre o Valor Ideal e o Valor Real dos Alimentadores da SE VPL, pelo Critério DMA Consumidor.

Verifica-se que se o critério escolhido for o do DMA consumidor, o circuito VPL-01 é o que apresenta a maior diferença (0,404) e portanto, maiores ganhos para se realizar uma intervenção, alocando-se os dispositivos de proteção conforme sugeridos pelo DMA ideal.

B. Cálculo do DMA Projeto

Conforme mencionado no final do subitem anterior, após o cálculo do DMA Real e do DMA Ideal, deve-se realizar um estudo mais detalhado do circuito, levando-se em consideração, fatores mais realistas. Assim, utilizando-se a Aba “Projeto” da Ferramenta DMA, é possível calcular valores de DMA mais condizentes com as condições reais de campo. A figura 16 a seguir, apresenta o alimentador escolhido VPL-01, para se realizar estes ajustes.

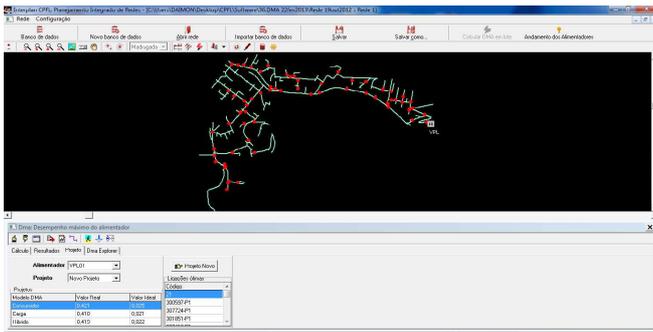


Figura 16: Alimentador VPL-01, Abordado para Projeto.

Como a função “Projeto” é individualizada, deve-se além de escolher o alimentador, também o tipo de DMA a ser aplicado no projeto. A figura 17 a seguir apresenta em detalhes o local de seleção destes parâmetros. Neste caso será a opção DMA consumidor, que obteve o maior ganho (delta = 0,404, conforme os resultados da figura 15) entre todos os circuitos da subestação Várzea Paulista.

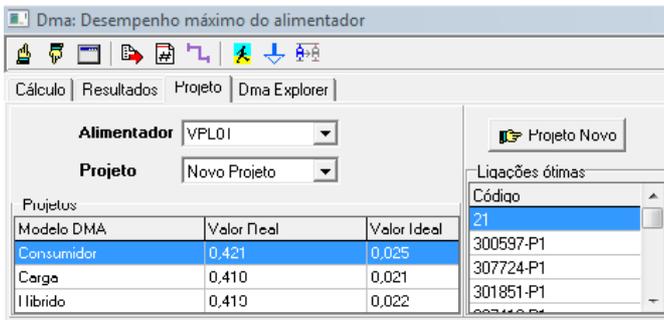


Figura 17: Seleção de Parâmetros de Projeto para o Alimentador VPL-01.

Posteriormente, deve-se clicar no botão Projeto Novo (Projeto Novo) e definir um nome para o projeto. A figura 18 apresenta a Janela de Nome do Projeto, com o nome escolhido “PROJETO VPL-01” para o projeto do alimentador VPL-01.

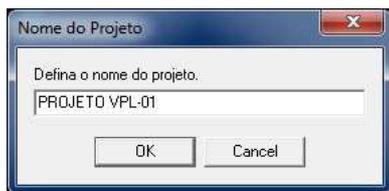


Figura 18: Nome “PROJETO VPL-01” Escolhido para o Projeto do Alimentador VPL-01.

Após a definição do nome, haverá um processamento realizado de forma automática que estabelecerá uma relação entre as proteções do DMA Projeto e as proteções da rede real (DMA Real). Esta relação se dará conforme a distância elétrica e a variação relativa do trecho frente ao alimentador. A configuração dos parâmetros deve ser feita na Janela de Configuração do DMA, apresentada na figura 19 a seguir.

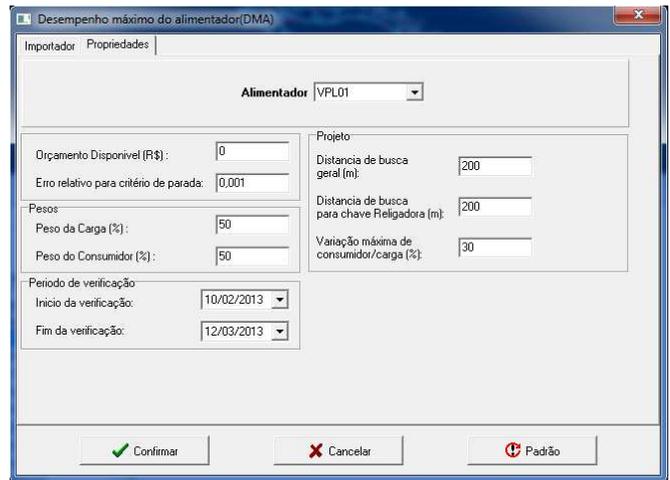


Figura 19: Janela de Configuração de Propriedades do DMA.

Esta janela permite a parametrização das seguintes variáveis:

- Seleção do alimentador;
- Valor do orçamento disponível;
- Erro relativo do DMA ideal para critério de parada;
- Pesos das variáveis carga e consumidor;
- Período a ser considerado para as ocorrências a serem importadas;
- No caso do DMA projeto, distância para busca de bases-fusíveis (valor default = 200 m);
- No caso do DMA projeto, distância para busca de religadores (valor default = 200 m);
- Variação máxima de associação para consumidor/carga (valor default = 30 %).

A figura 20 mostra a relação estabelecida pelo algoritmo de projeto automático.

Ligações do Projeto		Resultados do Projeto		
Código	Tipo	Nº Proteção	Código da ligação	Tipo de Proteção
21	21(Disjuntor)	1	300597-P1	Proteção ainda não definida
300597-P1	Instalar proteção	2	307724-P1	Proteção ainda não definida
307724-P1	Instalar proteção	3	347675	Equipamento existente na rede
347675	347675(Chave Fusível)	4	307418-P1	Proteção ainda não definida
307418-P1	Instalar proteção	5	347635	Equipamento existente na rede
347635	347635(Chave Fusível)	6	300378-P1	Proteção ainda não definida
300378-P1	Instalar proteção	7	443636	Equipamento existente na rede
443636	443636(Religador)	8	300596-P1	Proteção ainda não definida
300596-P1	Instalar proteção	9	347651	Equipamento existente na rede
347651	347651(Chave Fusível)	10	300377-P1	Proteção ainda não definida
300377-P1	Instalar proteção	11	303145-P1	Proteção ainda não definida
303145-P1	Instalar proteção	12	340362	Equipamento existente na rede
340362	340362(Chave Fusível)	13	340363	Equipamento existente na rede
340363	340363(Chave Fusível)	14	347662	Equipamento existente na rede
347662	347662(Chave Fusível)	15	301041-P1	Proteção ainda não definida
301041-P1	Instalar proteção	16	301247-P1	Proteção ainda não definida
301247-P1	Instalar proteção	17	307207-H4-P1	Proteção ainda não definida
307207-H4-P1	Instalar proteção	18	305227-P1	Proteção ainda não definida
305227-P1	Instalar proteção	19	305387-P1	Proteção ainda não definida
305387-P1	Instalar proteção	20	299189-P1	Proteção ainda não definida
299189-P1	Instalar proteção	21	302556-P1	Proteção ainda não definida
302556-P1	Instalar proteção	22	307420-P1	Proteção ainda não definida
307420-P1	Instalar proteção	23	306263-P1	Proteção ainda não definida
306263-P1	Instalar proteção	24	304636-P1	Proteção ainda não definida
304636-P1	Instalar proteção	25	307111-P1	Proteção ainda não definida
307111-P1	Instalar proteção	26	347632	Equipamento existente na rede
347632	347632(Chave Fusível)	27	307621-H4-P2	Proteção ainda não definida
307621-H4-P2	Instalar proteção	28	307713-P1	Proteção ainda não definida
307713-P1	Instalar proteção	29	347650	Equipamento existente na rede
347650	347650(Chave Fusível)	30	304635-P1	Proteção ainda não definida
304635-P1	Instalar proteção	31		

Figura 20: Relacionamento Estabelecido entre as Proteções do DMA Real e do DMA Projetado.

Na parte esquerda da tela da figura 20, observa-se no item “Ligações do Projeto” que foram associadas 10 (dez) proteções do caso real (incluindo-se o disjuntor), com as proteções do DMA Projetado (O termo associação refere-se à aproximação topográfica entre as proteções existentes no campo, com aquelas do projeto do DMA, de acordo com as parametrizações adotadas).

Após a realização das associações, pode-se realizar outras associações de proteções que não foram contempladas na lista de proteções do Projeto, realizadas de forma automática. Na figura 21 a seguir, clicando-se em “Instalar proteção”, na coluna tipo, ativa-se uma lista com as novas bases-fusíveis (a serem instaladas), e uma lista com as bases-fusíveis existentes (passíveis de serem realocadas).

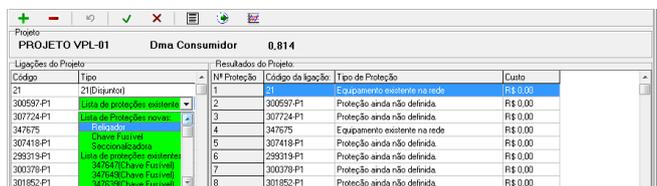


Figura 21: Lista de Proteções Novas e de Proteções Existentes.

Entretanto, as proteções em destaque na figura 21 poderão ser objeto de realocações. Desta forma, através do conhecimento das questões de cadastro, da área de Proteção, das informações de campo, etc, poderia optar-se pela seguinte solução, considerando as 30 proteções de rede existentes:

- Manter a associação sugerida pelo DMA Projeto, do religador 443696;
- Manter a associação sugerida pelo DMA Projeto das 8 BF's: 347675, 347695, 347651, 340362, 340363, 347662, 347692 e 347650, e;
- Realocar as demais bases-fusíveis.

Assim, ter-se-ia os locais otimizados das proteções, apresentada na figura 22 a seguir. Observe-se que na coluna “Tipo”, das Ligações do Projeto, as proteções que foram automaticamente associadas estão deslocadas para a margem esquerda, enquanto que a lista com a realocação de bases-fusíveis existentes, sugerida de forma manual, está centralizada na coluna.

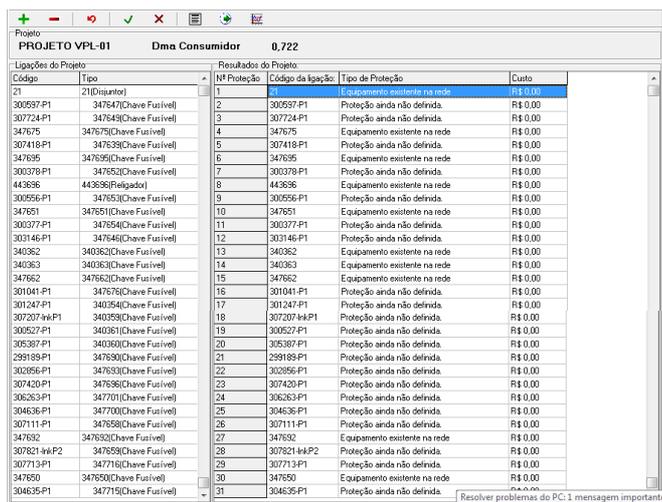


Figura 22: Alocação de Proteções Sugeridas pelo PROJETO VPL-01.

Ao clicar-se no botão (✓), recalcula-se o valor do DMA, considerando-se o rol de providências da figura 22. A figura 23 a seguir apresenta o resultado deste projeto, que resultou no DMA Projetado de 0,722, com custo de realocação de 21 bases-fusíveis de R\$ 9.677,85.

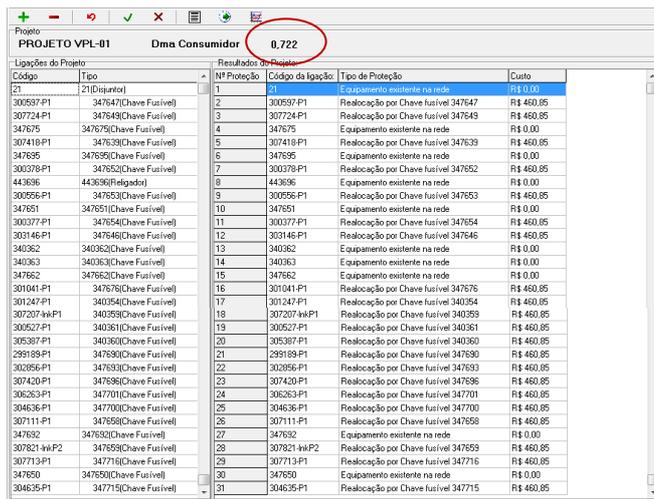


Figura 23: Tela de Resultado do PROJETO VPL-01.

C. Influência das Ocorrências no Cálculo do DMA dos Alimentadores da Subestação Várzea Paulista

As ocorrências terão contribuição direta nos cálculos de FEC, cuja informação terá a finalidade de ser um contraponto aos resultados do DMA. Ressalte-se que os dados importados de ocorrências são provenientes dos Sistema de Gerenciamento de Ocorrência da CPFL (Saigon). A análise feita neste item considerou ocorrências apuradas em alguns meses do ano de 2012.

A tabela 5 apresenta os resultados dos cálculos dos melhores circuitos ranqueados da Subestação VPL, onde se poderão comparar os valores calculados pelo DMA Real, DMA Ideal, DMA Projetado, FEC Real e FEC Projetado.

Tabela 5: Tabela comparativa dos DMA Real, DMA Ideal, DMA Projetado, FEC Real e FEC Projetado.

Circuito	DMA			FEC	
	Real	Ideal	Proj	FEC - Real	FEC - Proj
VPL-02	0,505	0,813	0,807	1,399	0,420
VPL-07	0,712	0,816	0,764	0,459	0,343
VPL-12	0,769	0,886	0,859	0,532	0,474
VPL-06	0,766	0,825	0,815	0,277	0,223
VPL-08	0,120	0,213	0,162	1,093	1,025
VPL-11	0,601	0,662	0,624	0,527	0,513
VPL-01	0,420	0,825	0,722	0,134	0,132
VPL-05	0,772	0,875	0,868	0,359	0,358

Desta forma, observou-se que os alimentadores VPL-2, VPL-07 e VPL-06 são os que apresentaram a maior diminuição percentual do valor de FEC, em relação aos próprios alimentadores. Note-se que a informação da tabela supracitada não estão apresentados os dados referentes aos custos envolvidos para atingir a alocação otimizada. Adicionalmente, para uma análise mais acurada, ponderou-se o FEC pela quantidade de consumidores da subestação. Assim, a tabela 6 a seguir, apresenta os custos da alocação otimizada e o Delta FEC ponderado, além da relação do Custo/FEC Pon-

derado e do Delta DMA (diferença entre o DMA Ideal e DMA Real).

Tabela 6: Tabela de Custo por FEC Ponderado.

Circuito	Delta FEC Pond (%)	Custo (R\$)	Delta DMA	Custo/FEC Pond
VPL-02	69,98	5.069,35	0,308	72,44
VPL-07	25,27	6.912,75	0,104	273,56
VPL-12	10,7	8.756,15	0,117	818,33
VPL-06	19,49	4.147,65	0,059	212,81
VPL-08	6,22	1.382,55	0,093	222,27
VPL-11	2,66	3.225,95	0,061	1.212,76
VPL-01	1,49	9.677,85	0,405	6.495,20
VPL-05	0,28	6.479,61	0,103	23.141,46

Desta forma, ao se analisar a relação entre custo dispendido e diminuição no valor do FEC, o alimentador VPL-02 teria a preferência de intervenção, pois os dispêndios com realocação de dispositivos de proteção são da ordem de R\$ 5.000,00, com uma redução no FEC de cerca de 70 %.

O FEC Ponderado é calculado considerando todos os consumidores da subestação em que o circuito em análise está conectado. Desta forma, observa-se que o Custo/FEC Ponderado será determinante na escolha do alimentador de melhor relação Custo/Benefício, pois com esta informação ter-se-á um balizador de investimento, frente ao ganho no Índice de Continuidade.

Note-se que o circuito com o maior Delta DMA (VPL-01) não foi o mesmo que apresentou o melhor Custo/FEC Ponderado (VPL-02). Isto decorre do fato de que o alimentador VPL-2 apresentou uma melhor relação Custo/Benefício que o alimentador VPL-1, tópico não analisado quando somente se compara apenas o Delta DMA. Ressalte-se assim, a necessidade de estudos mais detalhados para a escolha das alternativas que sejam mais factíveis do ponto de vista financeiro.

Finalmente, ressalte-se a metodologia de alocação otimizada trouxe vários benefícios diretos e indiretos para a concessionária, dentre os quais, um *software* de auxílio na decisão de intervenção de campo para a diminuição dos valores de FEC (Ferramenta DMA). Adicionalmente, o projeto de P&D respectivo propiciou aos seus participantes, a oportunidade de melhoria na capacitação profissional, através de curso de Mestrado, e também da divulgação do trabalho na comunidade técnico-científica, através da submissão de inúmeros artigos para eventos técnicos nacionais e internacionais, ao longo da vigência do projeto de P&D.

V. COMENTÁRIOS FINAIS

No cenário anterior de indicadores técnicos [4], o incentivo de investimentos estava sendo direcionado para que as concessionárias tivessem mais zelo com o conglomerado de unidades consumidoras considerados de forma coletiva

(DEC/FEC), como por exemplo, os bairros residenciais. Com a nova regulamentação [5], e subsequentes atualizações, a tendência do incentivo à melhoria da confiabilidade está focada principalmente na unidade consumidora, pois como a compensação financeira é proporcional ao consumo da unidade consumidora, a distribuidora será incentivada a atuar mais, por exemplo, nas unidades consumidoras do Grupo A4 (que possuem consumo elevado). Assim, desde o início de 2010, tem havido uma nova visão do foco de atuação das concessionárias, migrando do coletivo para o individual, podendo influenciar nas decisões de alocação de dispositivos de proteção. Desta forma, devido às incertezas de natureza regulatória, que possam afetar as prioridades em termos de continuidade no fornecimento de energia, pode-se implementar uma metodologia que contemple tanto parâmetros relacionados a um certo aglomerado de clientes, quanto parâmetros que avaliam o cliente de forma individual, como por exemplo, a análise de consumidores preferenciais.

A metodologia em sua forma mais simples, tende a considerar apenas a quantidade de clientes protegidos e o comprimento do trecho do alimentador (denominado de *DMA – Consumidor*). Contudo, pode-se, de forma mais abrangente, contemplar vários parâmetros (clientes, demanda, energia consumida, etc), ponderados através de um “Índice de Mérito” (calculado com o auxílio da ponderação). Posteriormente, poder-se-á até cogitar, inclusive, a influência daquela(s) variável(eis) de maior representatividade em cada barra de estudo, através de uma ponderação de caráter dinâmico (variando de barra a barra) numa eventual continuação do projeto.

Ressalte-se que o objetivo primordial desta metodologia é o de identificar e priorizar alimentadores (através de uma classificação) que sejam objeto de uma análise mais criteriosa posteriormente, baseado na relevância das variáveis citadas anteriormente (quantidade de clientes protegidos, comprimento do trecho, ocorrências, etc.). Desta forma, esta ferramenta deverá ser capaz de identificar aqueles circuitos onde haja possibilidade de ganhos, quer seja em investimentos evitados, melhoria da manutenção e dos indicadores de confiabilidade, e conseqüentemente, redução de multas pecuniárias pagas ao cliente. Finalmente, observe-se que esta metodologia não pretende substituir os estudos convencionais de Proteção para a alocação de elementos de proteção (cálculo de níveis de curto-circuito, seletividade, etc), mas simplesmente, introduz uma variável que, geralmente, não é considerada nos estudos tradicionais de Proteção, tais como, a quantidade de unidades consumidoras ou de ocorrências de um determinado alimentador.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Livros Técnicos:

- [1] C. C. B. Oliveira; N. Kagan; H. P. Schmidt; H. Kagan; "Métodos de Otimização Aplicados a Sistemas Elétricos de Potência", Editora Blucher, 2009, p. 108-111.

Relatórios Técnicos:

- [2] Daimon Engenharia e Sistemas, "RT-2 : Especificação de Metodologia para Avaliação dos Melhores Pontos para Instalação de Dispositivos de Proteção – Versão 3", Projeto de P&D : PD099 - Alocação de Chaves Baseada no Risco Mínimo do Alimentador, CPFL, São Paulo, janeiro de 2013.
- [3] Daimon Engenharia e Sistemas, "RT-6 : Especificação do Software de Otimização dos Pontos Ótimos para Instalação de Dispositivos de Proteção – Versão 2", Projeto de P&D : PD099 - Alocação de Chaves Baseada no Risco Mínimo do Alimentador, CPFL, São Paulo, março de 2013.

Dispositivos Regulatórios:

- [4] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica; Resolução nº 024, de 27 de janeiro de 2000.

- [5] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica; Resolução nº 345, de 16 de dezembro de 2008 - PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica.

VII. BIOGRAFIAS

Colaboradores da Daimon Engenharia



André Meffe was born in São Paulo, Brazil, on April 23th, 1976. He graduated in Electrical Engineering from University of São Paulo in 1998. He received his MSc in Electrical Engineering from University of São Paulo in 2001 and his PhD in Electrical Engineering from University of São Paulo in 2006. He has been with the Department of Electrical Engineering at the University of São Paulo from 1999 to 2004, where he worked with researches related to electric distribution systems. Nowadays, Mr. Méffe is with "Daimon Engenharia e Sistemas", a company specialized in developing engineering software, R&D projects and consultancy projects His current research interests include electrical power distribution planning, methodologies for calculating technical losses and technical losses' targets, service quality and smart grids.



Dário Takahata was born in São Paulo, Brazil, in 1959. He graduated in Electrical Engineering at the University of São Paulo, São Paulo, Brazil, in 1985 and received the M.S. degree at the University of São Paulo, São Paulo, Brazil, in 1997. He has been working in the electricity industry since then, in Brazil and abroad. His experience as an electrical engineer comprises a period with Kennedy & Donkin, a consultancy company in England, Themag Engineering (one of the leading consultancy companies in Brazil) and ARSESP (São Paulo State Regulatory Agency of Energy and Sanitation). Currently he is Coordinator of Research & Development (R&D) Projects of "Daimon Engenharia e Sistemas".



Vitor Takeda. was born in Brazil in 1985. He received the B.Sc. degrees from University of São Paulo, São Paulo, Brazil, in 2009, He is now with "Daimon Engenharia e Sistemas"



Gabriel Rogatto was born in Santo André, on March 26th, 1990. He graduated in Electrical Engineering from Universidade de São Paulo in 2012. He has been with "Daimon Engenharia e Sistemas" – a company specialized in developing engineering software, R&D projects and consultancy projects – from 2012 to 2013, where he worked with researches related to electric distribution systems and developing electrical engineering software.



Anderson Hitoshi Uyekita was born in Mogi das Cruzes, on September 3rd, 1985. He graduated in Electrical Engineering from University of São Paulo in 2011. He has been working with Research & Development and Consultancy Projects since 2009. He is now with "Daimon Engenharia e Sistemas"

Colaboradores da CPFL

Marcelo Maia was born Sorocaba, on February 15th, 1977. He graduated in Electrical Engineering from University of Sorocaba in 2000. He is now with "CPFL - Companhia Paulista de Força e Luz".