



**XXI SNTPEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
23 a 26 de Outubro de 2011
Florianópolis - SC

GRUPO -GMI

GRUPO DE ESTUDO DE ASPECTOS TÉCNICOS E GERENCIAIS - GMI

Utilização do Processo MCC e da Metodologia F-PROMETHEE para a Priorização dos Modos de Falhas em Transformadores de Potência

**Marcela P. Moreira(*)
CEPEL**

**Carlos Julio Dupont
CEPEL**

RESUMO

O objetivo deste trabalho é desenvolver e implementar uma metodologia para priorização de modos de falhas de transformadores de potência em subestações de energia elétrica obtida a partir da aplicação do processo MCC. Supondo um contexto multicritério, propõe-se a priorização dos modos de falha utilizando-se a metodologia de apoio à decisão multicritério fuzzy-PROMETHEE, que está associado com a teoria de conjuntos fuzzy. Nesta metodologia, os dados de entrada são tratados como números difusos, com o propósito de considerar a incerteza contida nos dados. A severidade dos efeitos associados com a ocorrência de cada modo de falha foi usada como critério para avaliar a metodologia desenvolvida. A partir da priorização dos modos de falha, pode ser aplicada uma metodologia para a priorização de ações mais adequadas para a redução ou eliminação das consequências de cada modo de falha. A maior contribuição deste trabalho é a disponibilidade de um modelo refinado para um plano de manutenção visando aumentar a confiabilidade operacional dos equipamentos e reduzir custos, considerando a análise de múltiplos critérios e os interesses dos diferentes decisores.

PALAVRAS-CHAVE

Decisão Multicritério, F-PROMETHEE, Números Fuzzy, MCC

1.0 - INTRODUÇÃO

A Manutenção Centrada em Confiabilidade - MCC é um processo utilizado na manutenção moderna, no qual está inserida a preocupação com o gerenciamento de riscos. Este processo difere da manutenção tradicional no enfoque dado às funções dos equipamentos e sistemas. Enquanto na manutenção tradicional o principal é preservar o equipamento, na MCC, conforme (7), preservam-se as funções.

A identificação dos modos de falha, suas causas e efeitos, é uma parte fundamental na aplicação do processo MCC. Os modos de falha com maior risco deverão ser tratados prioritariamente, e sobre eles deve ser feito um plano de manutenção efetivo, estabelecendo-se tarefas que sejam econômica e operacionalmente aplicáveis. A obtenção de uma má priorização ou uma priorização errônea dos modos de falha pode conduzir a um plano de manutenção ineficiente, onde os pontos críticos do sistema não serão atingidos prioritariamente (4).

A priorização dos modos de falha deve servir como subsídio para o planejamento da manutenção dos equipamentos de subestações, a fim de que ações eficazes sejam tomadas, de forma a minimizar os riscos associados a tais equipamentos.

A tomada de uma decisão baseada no risco deve ser influenciada pela probabilidade de ocorrência de um determinado modo de falha, a severidade de suas consequências e a probabilidade de detecção deste modo de falha, ou seja, é um problema de análise de decisão multicritério, onde vários critérios influenciam o decisor em sua tomada de decisão.

2.0 - FUZZY PROMETHEE

(5) Propõe uma adaptação do método PROMETHEE (Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluations), introduzido por (1), utilizando operações com números fuzzy trapezoidais. Os pesos dos critérios são tratados como variáveis linguísticas, representados como números fuzzy trapezoidais. No contexto de priorização de modos de falha dos equipamentos, no qual este trabalho está inserido, o desempenho das alternativas (modos de falha) sob cada um dos critérios pode ser obtido apenas de forma aproximada. Diante disso, a utilização de números fuzzy nas avaliações de cada modo de falha mostra-se muito relevante, uma vez que com isto fica-se mais próximo da realidade do problema, obtendo conseqüentemente uma priorização mais realista.

As adaptações do método PROMETHEE para a utilização de números fuzzy nas avaliações das alternativas, as quais serão utilizadas neste trabalho, são apresentadas a seguir.

1. Supondo as avaliações das alternativas sob um determinado critério j como números fuzzy triangulares, a diferença $d(a,b)$ entre as avaliações de duas alternativas a e b , será um número fuzzy triangular $(m,\alpha,\beta)_{LR}$ (1).
2. Sabendo-se que a escolha pelo decisor da função de preferência a ser utilizada em cada critério depende do tipo de problema, pode-se considerar que na grande maioria dos casos é adequada e utilizada a função de preferência tipo V (linear com zona de indiferença), apresentada na Tabela 1.
3. O critério generalizado tipo V (Tabela 1), pode ser expresso como (6):¹

$$\tilde{P}(a,b) = \begin{cases} 0 & m - \alpha \leq 0 \\ \frac{(m,\alpha,\beta) - q}{p - q} & \text{se } q \leq m - \alpha \text{ e } m + \beta \leq p \\ 1 & m + \beta \geq p \end{cases}$$

Segundo (5), o grau de preferência da comparação das alternativas a e b , com relação ao critério f_k , pode ser definido como:¹

$$\begin{aligned} P_j(\tilde{f}(a) - \tilde{f}(b)) &= P_j(\tilde{d}) \\ &= P_j((m,\alpha,\beta)_{LR}) \\ &= (P_j(m), (P_j(m) - P_j(m - \alpha)), (P_j(m + \beta) - P_j(m))) \end{aligned}$$

4. O índice de preferência ponderada será expresso como:¹

$$\tilde{\pi}(a,b) = \frac{\sum_{j=1}^k w_j \tilde{P}_j(a,b)}{\sum_{j=1}^k w_j}$$

Caso o peso seja considerado como valores precisos, será representado como $(w_j, 0, 0)$.

5. Os fluxos positivo e negativo serão números fuzzy obtidos de acordo com as equações (2) e (3) respectivamente. O fluxo líquido será também um número fuzzy obtido através da diferença entre os fluxos positivo e negativo:

$$\begin{aligned} \tilde{\Phi}(a) &= \tilde{\Phi}^+(a) - \tilde{\Phi}^-(a) & \tilde{\Phi}^+(a) &= \frac{\sum_{\substack{b=1 \\ b \neq a}}^n \tilde{\pi}(a,b)}{n-1} & (2) & \tilde{\Phi}^-(a) &= \frac{\sum_{\substack{b=1 \\ b \neq a}}^n \tilde{\pi}(b,a)}{n-1} & (3) \end{aligned}$$

Finalmente deve ser feita a ordenação das alternativas. Os resultados apresentados estão sob a forma de números fuzzy e o principal problema encontrado nesta etapa é a comparação entre números fuzzy. Existem vários modelos propostos para ordenação de números fuzzy, não se pode dizer que exista um melhor, isto depende do tipo de aplicação. Uma proposta, é que seja feita a defuzzificação do fluxo líquido, utilizando o Método Centróide (6) conforme a equação abaixo.

$$x_{defuzz} = \frac{1}{3} \cdot (3m - \alpha + \beta)$$

O resultado da defuzzificação pelo centro de massa é o índice x_{defuzz} , conhecido como índice de YAGER (6).

¹ O símbolo \sim é utilizado para indicar um número fuzzy

3.0 - MODELO DE DECISÃO MULTICRITÉRIO

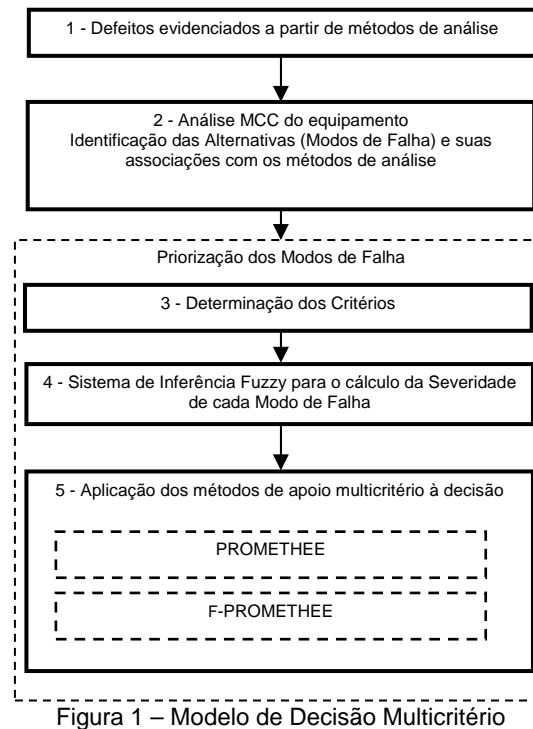


Figura 1 – Modelo de Decisão Multicritério

As etapas 1 e 2 do modelo representado na Figura 1 estão baseadas na metodologia sugerida por (3). Na etapa 1, são determinadas as evidências de defeitos possíveis de serem detectados nos equipamentos. Tais evidências são obtidas através de diferentes métodos de análise, os quais utilizam como entradas variáveis armazenadas em uma base relacional adquirida. Cada método de análise é especializado na identificação de um determinado defeito no equipamento analisado e irá retornar um “grau do defeito” e uma “confiança no grau do defeito” com valores entre 0 e 1. Poderão existir um ou vários métodos de análise para cada defeito. No caso de existirem vários métodos de análise para um determinado defeito, os graus e confianças retornados por eles serão ponderados de acordo com a importância de cada método, de forma que para cada defeito será obtido um grau e uma confiança únicos associados a este defeito.

Os graus e confianças obtidos para diferentes tipos de defeitos que possam estar ocorrendo no equipamento serão utilizados como entradas na etapa 2 do modelo. Nesta etapa, através do processo MCC, identificam-se quais as possíveis causas (falha funcional + componente + modo de falha) estão relacionadas aos defeitos evidenciados pelos métodos de análise na etapa 1. Desta forma, ao fazer a análise do equipamento em um determinado instante de tempo, serão identificadas evidências de defeitos, e associadas a cada evidência existirão várias causas. Uma vez evidenciadas as causas, aplica-se a metodologia desenvolvida neste trabalho para priorizar os modos de falha, visando auxiliar a tomada de decisão na gestão da manutenção. Assume-se, portanto, como hipóteses deste trabalho, que o processo MCC tenha sido previamente aplicado e os modos de falha tenham sido identificados. As etapas 1 e 2 da Figura 1, não são, assim, foco deste trabalho.

Considerando-se o problema de priorização dos modos de falha como multicritério, após a identificação das alternativas (modos de falha) a partir das evidências de anormalidade (defeitos), é necessária a determinação dos critérios relevantes na solução do problema, representado na etapa 3 do modelo apresentado na Figura 1. Esta etapa é descrita na próxima seção deste trabalho.

3.1 Determinação dos Critérios

Na etapa 3 do modelo apresentado na Figura 1 realiza-se a determinação dos critérios de decisão, os quais irão avaliar os modos de falha que serão priorizados na etapa 5 pelos métodos PROMETHEE e F-PROMETHEE. Os critérios de avaliação utilizados neste trabalho foram: Grau de ocorrência da causa (GO); Confirmação da causa (CI); Severidade dos impactos econômicos (SE); Severidade dos impactos operacionais (SO); Severidade dos impactos de segurança à vida humana (SS); Severidade dos impactos ambientais (SA); Risco (R).

Na etapa 4 do modelo representado na Figura 1, foi criado um sistema de inferência fuzzy para a obtenção da severidade global de cada modo de falha. Este sistema tem como entradas as severidades SE, SO, SS e SA, utilizadas como critérios de avaliação para a priorização dos modos de falha. A severidade global resultante do sistema de inferência é utilizada no cálculo do risco dos modos de falha. O risco também foi utilizado como um dos critérios de avaliação para a priorização dos modos de falha. A última etapa do modelo é a aplicação dos métodos multicritérios de apoio à decisão PROMETHEE e F-PROMETHEE para a priorização dos modos de falha.

4.0 - APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE APOIO MULTICRITÉRIO À DECISÃO

Neste artigo o cálculo do risco de cada modo de falha será calculado conforme a equação :

$$\text{Grau de Risco} = (\text{Grau de Ocorrência}) \times (\text{Severidade})$$

O método F-PROMETHEE foi utilizado neste trabalho para a priorização dos modos de falha de equipamentos. Para isto, foi criado um sistema computacional onde este método foi implementado utilizando-se C++ Builder.

No método F-PROMETHEE, as avaliações das alternativas sob cada critério são números fuzzy triangulares. A representação das incertezas foi inserida no critério GO. O valor das avaliações dos modos de falha sob o critério grau de ocorrência (GO) representa um índice normalizado que a partir das evidências de anormalidade, indica a possibilidade de ocorrência da causa. A incerteza no valor desta avaliação pode ser medida pelo valor do erro.

Logo, a avaliação dos modos de falha sob o critério grau de ocorrência foi representada como um número fuzzy triangular $(m, \alpha, \beta)_{LR}$ conforme a Figura 2. Onde:

m = valor da avaliação do modo de falha sob o critério GO. Este índice é um valor normalizado entre 0 e 1.

$$\alpha = \begin{cases} \text{erro} & \text{se } \text{erro} \leq m \\ m & \text{se } \text{erro} > m \end{cases} \quad \beta = \begin{cases} \text{erro} & \text{se } \text{erro} \leq 1-m \\ 1-m & \text{se } \text{erro} > 1-m \end{cases}$$

Para exemplificar, pode-se definir, para um determinado modo de falha, o valor de sua avaliação sob o critério GO igual a 0,85 e o valor de sua avaliação sob o critério CI igual a 0,75. A representação desta avaliação através de um número fuzzy $(m, \alpha, \beta)_{LR}$ será:

$$m = 0,85 \quad \text{erro} = 1 - CI = 1 - 0,75 = 0,25$$

Logo, $\alpha = 0,25$ e $\beta = 0,15$.

A representação gráfica deste número fuzzy $(0,85, 0,25, 0,15)_{LR}$, pode ser visualizada na Figura 2.

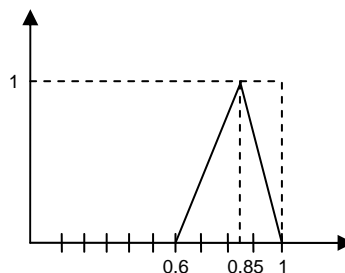


Figura 2 – Representação gráfica do número fuzzy $(0,85, 0,25, 0,15)_{LR}$

Em seguida, é então calculada a matriz de índices de preferência ponderada para cada par de alternativas. A partir destes índices são calculados os fluxos de saída, fluxos de entrada e fluxo líquido para cada alternativa. Estes fluxos são números fuzzy triangulares. A ordenação das alternativas através do fluxo líquido, neste caso, deve ser feita através de um método de ordenações de números fuzzy. O método utilizado é a ordenação pelo índice de YAGER.

5.0 - ESTUDO DE CASO

Com o objetivo de ilustrar a aplicação do modelo desenvolvido, foi elaborada a aplicação da metodologia MCC na parte ativa de transformadores de potência. A parte ativa dos transformadores de potência pode ser considerada a parte mais crítica destes equipamentos, uma vez que a maioria dos modos de falha e evidências de anormalidade operativa (defeitos) que podem gerar indisponibilidade ou mesmo explosão do equipamento ocorre neste subsistema.

O transformador utilizado para o estudo de casos apresentado a seguir pertence à empresa Eletronorte e está instalado na usina de Tucuruí (UHE Tucuruí) (8).

O sistema DianE foi utilizado como referência para obter a lista de causas possíveis a ser priorizada pelos métodos PROMETHEE e F-PROMETHEE. Através do estudo de casos será mostrado como a modelagem proposta pode ser fundamental para determinar uma intervenção pró-ativa em equipamentos em operação.

5.1 Caso de Estudo: Transformador 58599

Para obter um diagnóstico da parte ativa do transformador 58599, apresentado na Figura 3, foram inseridos os resultados dos ensaios de cromatografia gasosa deste transformador no sistema DianE. Analisando estes dados através de métodos de análise, o sistema DianE apresentou um indicativo de Sobreaquecimento na parte ativa (SC), conforme indica a Figura 4.



Figura 3 - Transformador 58599 – Caso de Estudo
Fonte: Referência (8)

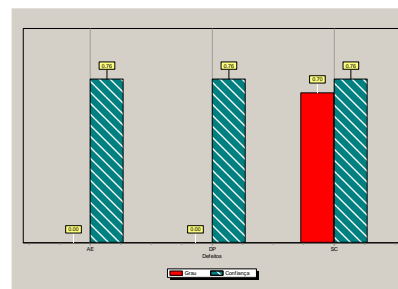


Figura 4 - Sobreaquecimento na parte ativa

O grau de defeito apresentado é igual a 0,70, com confiança nesse grau igual a 0,76 (dentro de uma escala de 0-1). Não foram indicados problemas associados diretamente com arco elétrico (AE) e descargas parciais (DP). Os resultados apresentados na Figura 4 de grau e confiança resultaram da integração de quatro métodos de análise: ABNT, Dornenburg, Rogers e IEC60599. A partir desta evidência de defeito, o sistema Diane utiliza a metodologia MCC para fornecer o diagnóstico deste equipamento, apresentando uma lista ordenada de causas possíveis associadas ao defeito evidenciado.

A lista de causas possíveis a ser apresentada pelo sistema DianE no diagnóstico do equipamento é variável em função do tipo de equipamento, do subsistema analisado, dos defeitos evidenciados e dos métodos de análise utilizados. Esta lista de causas deve ser priorizada, visando ajudar os gestores da manutenção na tomada de decisão. O sistema apresenta a lista de causas priorizada pelo maior GO x S (risco). Em caso de empate no valor do risco, o sistema prioriza respectivamente pelo maior CI, S e GO. A necessidade de uma metodologia de ordenação que considere as avaliações em todos os critérios simultaneamente, de forma que as causas a serem priorizadas tenham seu desempenhos maximizados sob o conjunto de critérios considerado, levou ao desenvolvimento do modelo proposto neste trabalho. O método F-PROMETHEE é utilizado para alcançar tal objetivo.

A lista de causas possíveis identificadas e priorizada pelo sistema DianE para o transformador e o defeito em estudo é apresentada na Tabela 1 (neste artigo foram listadas somente as 10 primeiras causas). Foi feita uma análise de sensibilidade aplicando-se os métodos PROMETHEE e F-PROMETHEE para a ordenação da lista de causas. Foram consideradas diferentes configurações para as combinações de critérios. As configurações analisadas foram comparadas à metodologia de priorização utilizada no sistema DianE, sendo em seguida analisadas as vantagens e desvantagens de cada modelo proposto.

Tabela 1 - Causas identificadas e priorizadas pelo sistema DianE

Ordem DianE	Causa		
	Falha Funcional	Componente	Modo de Falha
1	Elevação de temperatura no óleo do tanque e enrolamentos	Conector bucha / parte ativa	Mau contato elétrico
2	Elevação de temperatura no óleo do tanque e enrolamentos	(R) Condutor dos taps	Má fixação
3	Degradação térmica acelerada do papel isolante ocorrendo com correntes menores que as especificadas	Enrolamento / Bobina	Canais internos de óleo bloqueados
4	Elevação de temperatura no óleo do tanque e enrolamentos	Condutor de enrolamento	Mau dimensionamento inicial
5	Elevação de temperatura no óleo do tanque e enrolamentos	Enrolamento / Bobina	Mau dimensionamento inicial
6	Sobreaquecimento superficial elevado (devido fluxo de dispersão magnética)	Núcleo	Deficiência na isolamento dos parafusos passantes de fixação que atravessam pelas lâminas
7	Má conexão elétrica ou mau contato mecânico	Conector bucha / parte ativa	Problema de montagem
8	Redução localizada de isolamento na parte ativa	Conector bucha / parte ativa	Má fixação com o enrolamento
9	Redução localizada de isolamento na parte ativa	Isolação sólida (papel+óleo)	Rompimento do papel isolante
10	Não permite nenhuma circulação de corrente elétrica	Chave de derivação sem tensão (CDST)	Rompimento total da conexão

5.2 Análise de Sensibilidade

Utilizando-se como ferramenta o programa desenvolvido em C++ Builder, onde os métodos PROMETHEE e F-PROMETHEE foram implementados, foi feita uma análise de sensibilidade utilizando-se os métodos com diferentes

combinações de critérios. O programa desenvolvido permite que sejam feitas diferentes combinações de critérios, assim como diferentes configurações em cada critério de decisão, onde o decisor poderá escolher o peso de cada critério, a função de preferência aplicada com os respectivos parâmetros de preferência e indiferença, e se este critério deverá ser maximizado ou minimizado. Na análise de sensibilidade descrita a seguir foram considerados todos os critérios com pesos iguais e a função de preferência utilizada foi a do Tipo III apresentada na Tabela 1, com $p=1$. As Tabelas 2 a 4 apresentam as diferentes combinações de critérios utilizadas em cada método para a análise de sensibilidade.

Tabela 2 - Modelo 1 e 2

Modelo 1	Modelo 2
Método: <i>DianE</i>	Método: <i>DianE</i>
GO	GO
CI	CI
S	SG
Risco = GO x S	Risco = GO x SG

Tabela 3 - Modelos 3 e 4

Modelo 3	Modelo 4
Método: <i>PROMETHEE</i>	Método: <i>PROMETHEE</i>
GO	GO
CI	CI
Risco = GO x S	Risco = GO x SG

Tabela 4 - Modelos 5 e 6

Modelo 5	Modelo 6
Método: <i>PROMETHEE</i>	Método: <i>F-PROMETHEE</i>
GO	\tilde{GO}
CI	-
Risco Econômico (RE) = GO x SE	Risco Econômico (\tilde{RE}) = $\tilde{GO} \times SE$
Risco Operacional (RO) = GO x SO	Risco Operacional (\tilde{RO}) = $\tilde{GO} \times SO$
Risco de Segurança (RS) = GO x SS	Risco de Segurança (\tilde{RS}) = $\tilde{GO} \times SS$
Risco Ambiental (RA) = GO x SA	Risco Ambiental (\tilde{RS}) = $\tilde{GO} \times SA$

A Tabela 5 mostra as ordenações obtidas utilizando-se os métodos descritos nas Tabelas 2 a 4, o Modelo 1 é utilizado como referência para a ordem das alternativas (Tabela 1).

Tabela 5 - Ordenações obtidas através dos Modelos 1, 2, 3, 4, 5 e 6

Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5	Modelo 6
1	1	1	1	1	9
2	2	2	2	2	13
3	5	14	14	9	1
4	4	3	4	10	10
5	3	4	5	13	2
6	6	5	3	8	8
7	10	6	10	11	11
8	8	7	8	12	12
9	9	8	9	4	17
10	11	9	11	5	18

Analisando-se as Tabelas 1 e 5 pode-se perceber que através do método de priorização utilizado no Modelo 1, ocorreu um empate entre as seguintes causas: (3, 4 e 5); (7, 8, 9, 10, 11 e 12); (19 e 20); (21, 22, e 23); (25 e 26); (29 e 30). Não sendo possível portanto ser estabelecida a prioridade entre elas. No Modelo 1, as causas pertencentes a cada um dos grupos citados acima tem prioridade iguais (riscos $GO \times S$, CI, S e GO iguais). Isto pode não refletir a realidade, uma vez que, analisando-se a Tabela 1 pode-se identificar diferentes SE, SO, SS, SA, entre as causas de cada grupo. Por exemplo, a causa 4 apresenta um impacto econômico maior que as causas 3 e 5, enquanto que a causa 5 apresenta impacto de segurança maior que as causas 3 e 4. Entretanto, estas três causas apresentam severidades (S) iguais geradas pelo especialista. Percebe-se, portanto, que a avaliação de um S pelo especialista pode não ser capaz de medir estes conflitos entre os impactos SE, SO, SS e SA das diferentes causas. Além disso, podem haver incoerências de determinação no S quando existirem muitas causas a serem analisadas.

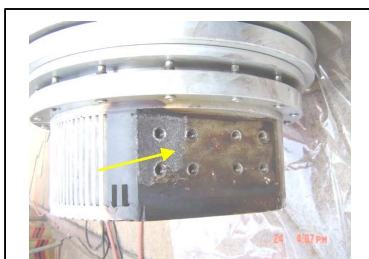
A criação de um SG através do sistema fuzzy, considerando-se um conjunto de regras geradas por especialistas, pode vir a suprir estas dificuldades. Isto pode ser visto no Modelo 2. Neste modelo, ao utilizar o SG houve um desempate entre algumas das alternativas anteriormente empatadas, pois o sistema de inferência conseguiu gerar diferentes SG's para tais causas, fazendo com que, por exemplo, as causas 4 e 5 fossem priorizadas em relação à causa 3.

Utilizando-se o método PROMETHEE no modelo 3, é possível perceber uma maior mudança nas posições das causas. A causa 14 subiu onze posições, tornando-se a terceira mais priorizada no *ranking*. Isto se deve ao fato dela apresentar uma diferença muito mais significativa nas avaliações do critério CI do que no critério de Risco em relação às causas que estavam anteriormente priorizadas. Os modelos 1 e 2, que utilizavam a priorização pelo risco, não enxergavam a avaliação do CI, já que os riscos eram diferentes e os demais critérios utilizados apenas

para desempate. Pelo mesmo motivo, as avaliações 16 e 17 caíram duas posições e a 18 caiu cinco posições. O modelo 4 diferencia-se do 3 pela utilização do SG fuzzy. Neste caso, agregando-se às mudanças do modelo 3, houberam mudanças de posições das causas devido ao fato de que algumas causas empatadas pela utilização do S especialista puderam ter suas prioridades melhor identificadas através da utilização do SG fuzzy. Isto pode ser observado na causa 3, que caiu duas posições. Neste modelo a causa 6 teve uma mudança significativa de posição, caindo seis posições em relação ao modelo 3. No modelo 5, utilizou-se a metodologia PROMETHEE e os riscos RE, RO, RS e RA como critérios independentes, causando mudanças mais significativas em relação aos modelos anteriores. A vantagem da utilização deste modelo está no fato de não se necessitar, para sua aplicação de um conjunto de regras geradas por especialistas para a obtenção do SG global para cada modo de falha. Uma desvantagem associada ao modelo 5 vem do fato de nele se estar considerando como independentes 4 critérios que na verdade representam um único critério, o risco. Isto leva a uma tendência de priorização pelo risco, desfavorecendo os critérios GO e CI. Porém, esta desvantagem pode ser contornada explorando-se a flexibilidade do PROMETHEE em atribuir diferentes pesos aos critérios. No modelo 6 utilizou-se o F-PROMETHEE. Este modelo apresenta adicionalmente a vantagem de considerar a incerteza dos dados. Nesse caso, como GO é tratado como um número fuzzy, a incerteza representada por CI será também associada a cada um dos riscos RE, RO, RS e RA. As demais vantagens e possível desvantagem citadas para o modelo 5 podem ser aplicadas ao modelo 6.

5.3 Análise dos Resultados

A seguir serão apresentadas as fotografias do transformador em estudo quando aberto para manutenção.



**Flanges da bucha de BT
apresentando carbonização,
corrosão e fusão de materiais**

Figura 5 - Detalhe da flange da bucha
Fonte: Referência (8)



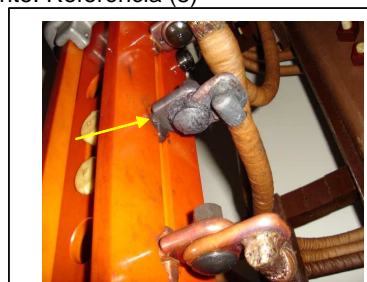
**Flanges dos links de interligação
apresentando carbonização,
corrosão e fusão**

Figura 6 - Detalhe dos links de interligação
Fonte: Referência (8)



**Interligação dos terminais do cabo
AT e do comutador
de apresentando carbonização,
corrosão e fusão**

Figura 7 - Detalhe dos terminais de AT
Fonte: Referência (8)



**O terminal de conexão do cabo
de AT encontrava-se totalmente
corroído**

Figura 8 - Detalhe de conexão de AT
Fonte: Referência (8)

Pode-se perceber, através da Tabela 5, que a causa listada como 1 pode ser interpretada como indicando o modo de falha identificado nas Figuras 5 e 6. Além disso, a causa listada como 2 está indicando o modo de falha mostrado nas Figuras 7 e 8. Estas causas aparecem como prioritárias nos modelos 1, 2, 3, 4 e 5. Enquanto que no modelo 6 elas aparecem em terceiro e quinto lugar na lista, respectivamente. Este fato acontece devido ao modelo 6 considerar a imprecisão dos dados, fazendo com que dados com incerteza muito alta sejam mais priorizados em relação a outros com incerteza menores. Isto é coerente, pois um modo de falha com grau de ocorrência GO igual a 0,5 e confirmação CI igual a 0,2 poderá ter, graus de ocorrência variando no intervalo de 0 a 1, e isto poderá ser mais crítico que um modo de falha com GO=0,6 e CI=0,7, onde a confirmação neste caso é muito mais elevada. As Figuras 5 a 8 comprovam que a lista de causas identificadas levariam os gestores da manutenção à identificação das causas do problema. De fato, até o momento de abrir o equipamento realizando uma inspeção

detalhada, o que existe disponível ao mantenedor é uma lista ordenada de possibilidades que deve ser utilizada como orientativa para facilitar a identificação final do problema e a definição da ação corretiva mais adequada. Espera-se de um bom sistema de diagnósticos que consiga colocar o modo de falha real atingindo o equipamento em um subconjunto de alternativas mais próximas do topo da lista. A decisão de quando agir, desenergizando e abrindo o equipamento para inspeção, irá depender de cada empresa. Algumas aceitarão conviver em um ambiente com riscos mais elevados, outras poderão ser mais conservadoras e admitirão limites de risco menores.

6.0 - CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo propor o uso de métodos de apoio multicritério a decisão para a priorização dos modos de falha, identificados através da aplicação do processo MCC durante o diagnóstico de equipamentos. Foram apresentados dois modelos fundamentados no emprego do método F-PROMETHEE. Além do emprego destas metodologias, foi desenvolvido um sistema de inferência fuzzy para o cálculo da severidade de cada modo de falha. Isso possibilitou comparações e avaliações de sensibilidade entre os modelos propostos e algumas variantes possíveis aplicadas ao modelo atualmente utilizado no Sistema DianE, tomado como referência. A flexibilidade do PROMETHEE em poder atribuir diferentes pesos aos critérios torna o emprego desta metodologia muito interessante, pois com sua utilização diferentes decisores poderão obter ordenações diferentes, adequadas aos seus interesses principais. Esse é o caso de diagnósticos sendo feitos em empresas com perfis diferentes de aceitação de riscos. A metodologia F-PROMETHEE mostrou-se a mais sensível na questão do tratamento adequado da incerteza, apresentando uma lista mais próxima do que poderá ser a realidade caso os dados tenham muitas incertezas associadas. A abordagem de ordenação com multicritérios tratados, como no PROMETHEE e F-PROMETHEE, mostrou-se muito adequada ao tipo de problema apresentado neste trabalho. Sua flexibilidade para a realização de ajustes, simplicidade de implantação e a facilidade de compreensão de seus resultados mostram ser esta uma metodologia muito indicada como ferramenta auxiliar ao diagnóstico de equipamentos. O sistema computacional desenvolvido em C++, é amigável e permite ao usuário explorar as flexibilidades do método PROMETHEE quanto à utilização de diferentes pesos nos critérios, diferentes funções de preferência e o emprego de diferentes combinações de critérios.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) BRANS, J. P.; VINCKE, P. H. (1985) A preference ranking organization method, the PROMETHEE method for MCDM. *Mgmt. Sci.*, v. 31, p. 647-656, 1985.
- (2) DUBOIS, D. and PRADE, H. (1978) Operations on Fuzzy Numbers. *International Journal of Systems Science*, v.9, n. 06, 613-626.
- (3) DUPONT, C. J. (2003) Integração de Análises de Defeitos e Definição de um Grau de Risco Global para Transformadores de Potência. Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ.
- (4) GARCIA, P. A. A. (2006) Uma Abordagem Fuzzy com Envolvimento de Dados da Análise dos Modos e Efeitos de Falha. Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ.
- (5) GELDERMANN, J.; SPENGLER, T.; RENTZ, O. (2000) Fuzzy Outranking for Environmental Assessment. Case Study: Iron and Steel Making Industry. *Fuzzy Sets and Systems*, 115, 45-65.
- (6) GOUMAS, M. ; LYGEROU, V. (2000) An Extension of the PROMETHEE Method for Decision Making in Fuzzy Environment: Ranking of Alternative Energy Exploration Projects. *European Journal of Operational Research*, 123, 66-613.
- (7) MOUBRAY, J. (2000) Manutenção Centrada em Confiabilidade. Aladon Ltd. Lutterworth.
- (8) NASCIMENTO, L. F. A.; SANTOS, C. C.; SILVA, J. S.; DUPONT, C. J.; MOREIRA, M. P.; DUCHARME, C.; CUENCA, W. M. H.; MATA, C. G.; BARROS, R. A. L.; LAM, K. C.; JUNQUEIRA, A. J.; VERDOLIM, R. T. (2007) Desenvolvimento de Metodologias para a Integração do Diagnóstico de Defeitos de Transformadores de Potência. IV Citenel, Araxá, MG.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Marcela P. Moreira - Graduada em Engenharia Elétrica pela UFF em 1999, obteve o grau de Mestrado em Engenharia Elétrica na PUC em 2009. No CEPEL desde 2006, atua como pesquisadora do DLE e desenvolve trabalhos relacionados ao diagnóstico de equipamentos elétricos de AT.

Carlos Julio Dupont - Graduado em Engenharia Elétrica pela UFPR em 1985, obteve o grau de M.Sc. em 1992 eo D.Sc em Engenharia Elétrica na UFRJ em 2003. No CEPEL desde 1989, atua como pesquisador do DLE e desenvolve trabalhos relacionados ao diagnóstico de equipamentos elétricos de AT.