

Sistema Fuzzy para Monitoramento da Operação de Transformadores de Potência e Análise de Tendências

Newton T. do Nascimento - Jr.***, Shigeaki L. Lima*, Osvaldo R. Saavedra*, Rosário Girardi*

*UFMA – Universidade Federal do Maranhão

** ELETRONORTE – Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A

newton.junior@eletronorte.gov.br, osvaldo@dee.ufma.br, neaufma@gmail.com, rosario@deinf.ufma.br

Abstract – Neste trabalho é apresentada uma metodologia para monitorar o estado operacional em regime permanente de transformadores de potência e estimar tendências de operação ao longo do tempo. A abordagem é composta de duas etapas: na primeira é construído um bloco de inferência *fuzzy* capaz de monitorar em tempo real os valores de variáveis elétricas do transformador. Na segunda etapa é analisada se há uma tendência de mudança do estado operativo, de forma a inferir se os limites poderão ser violados em curto ou médio prazo e assim sinalizar necessidades de reforço e/ou de acompanhamento mais cuidadoso, a fim de evitar uma eventual perda de vida útil do equipamento. O método foi avaliado com uma base de dados de uma empresa de geração e transmissão de energia do setor elétrico brasileiro. Os resultados obtidos foram satisfatórios, na medida em que a evolução de operação desses equipamentos foi adequadamente mapeada e as tendências bem caracterizadas. O modelo apresentado pode ser estendido para várias unidades transformadoras, para outros equipamentos elétricos e até para instalações elétricas, permitindo subsidiar a operação e dar indicativos de necessidades de reforços futuros no sistema.

Palavras-chave – Sistema Fuzzy, Monitoramento de Equipamentos, Transformadores de Potência, Análise de Tendências.

1 Introdução

O Sistema Interligado Nacional (SIN) possui dimensões e características peculiares que permitem considerá-lo único em âmbito mundial. Este sistema é constituído por linhas de transmissão, barramentos, transformadores de potência e equipamentos de subestação em tensão igual e superior a 230 kV. O SIN possui princípios básicos, tais como o atendimento à demanda, a racionalização da oferta e demanda de energia elétrica, a busca por competitividade, a capacidade de investimento com participação privada, o estabelecimento de regras estáveis, a qualidade e preço justo aos consumidores.

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é o órgão regulador e fiscalizador do sistema brasileiro [2]. Tal agência criou o Operador Nacional do Sistema (ONS), entidade de direito privado sem fins lucrativos, responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no sistema interligado brasileiro [1]. O segmento de transmissão é fortemente regulado e fiscalizado pela ANEEL, permitindo a competitividade entre as transmissoras que podem atuar numa mesma área geográfica. A ANEEL, recentemente, passou a utilizar a chamada *Parcela Variável (PV)* como mecanismo para incentivar a qualidade do serviço de transmissão de energia elétrica. Este mecanismo se baseia na redução do tempo das indisponibilidades de linhas de transmissão, transformadores e equipamentos de controle de tensão, componentes denominados Funções de Transmissão (FT) [3]. Diante deste cenário, *qualidade, confiabilidade e disponibilidade integral* são agora exigências chaves nos serviços de transmissão, fazendo parte intrinsecamente das cláusulas do contrato de prestação de serviço da transmissão assinado com o ONS.

A quantidade de transformadores de potência instalados no SIN representa um percentual bastante significativo na matriz energética nacional. A função destes equipamentos no Sistema Elétrico de Potência (SEP) está diretamente relacionada às grandes extensões (geração e carga) como um meio de diminuir ao máximo as perdas de transmissão. Assim, devido à grande importância de um transformador no sistema elétrico, a indisponibilidade (mesmo que programada) ou restrição deste equipamento representa perdas excessivas à empresa de energia, através das penalidades (PV) aplicáveis para estes casos, além de acarretar possíveis problemas operacionais pela diminuição de capacidade de fornecimento de energia elétrica. Sistemas para diagnóstico e monitoramento de equipamentos do sistema elétrico de potência (sem a necessidade de desligamentos - *online*) têm sido propostos em níveis de pesquisas com implementações práticas por empresas do setor elétrico (fabricantes, transmissoras e distribuidoras) [9, 10, 11, 22].

Este artigo objetiva atender a esses requisitos e propõe uma abordagem qualitativa para a tarefa de monitorar transformadores de potência em tempo real, utilizando a experiência de especialistas na operação desses equipamentos. A organização do artigo é descrito a seguir. Na seção II é apresentado um resumo da teoria da lógica *fuzzy*, utilizada no desenvolvimento da metodologia; na seção III é apresentada em detalhes a metodologia para monitoramento qualitativo de transformadores; na seção IV tem-se um estudo de caso com a utilização da metodologia no monitoramento de um transformador real e na seção V temos as considerações finais.

2 Lógica Fuzzy

A teoria dos conjuntos *fuzzy* [19] foi desenvolvida para tratar imprecisões, ambiguidades e incertezas nas informações, sendo adequada para problemas que apresentam uma ou mais das seguintes características [24]: quando a interação com especialistas humanos é exigida; um especialista está disponível para especificar as regras que regem o comportamento do sistema; um modelo matemático para o problema não existe ou é difícil de ser implementado; dados imprecisos e com ruído estão presentes. Através do emprego da lógica *fuzzy* é possível, em muitos casos, representar de forma adequada complexas fronteiras de decisão, ou seja, é possível mapear transições graduais entre estados de decisão. Assim, um elemento de um conjunto *fuzzy* pode, ao mesmo tempo, pertencer a outros conjuntos *fuzzy*. O grau de ambiguidade ou imprecisão da associação deste elemento a cada conjunto *fuzzy* pode ser descrito pelos correspondentes graus de pertinência. Em problemas que envolvem classificação de padrões é possível, em vez de tentar associar cada padrão a uma única classe, calcular o grau de pertinência associado a cada classe do problema. Isto permite tratar problemas com fronteiras de decisão complexas, onde a classificação pode ser obtida a partir da análise dos graus de pertinência calculados [16, 17, 18].

3 Metodologia Proposta

A metodologia proposta é composta de duas etapas: (i) definição de blocos de inferência *fuzzy* e (ii) análise da tendência a partir das saídas desses blocos *fuzzy*, ao longo de um determinado período avaliação. É apresentado através da Figura 1 o modelo genérico de monitoramento utilizando sistemas *fuzzy* de inferência. Cada retângulo representa um bloco *fuzzy* de inferência. Nesse modelo as medidas nas três fases consideradas como de fundamental importância são: *corrente*, *tensão entre fases*, *temperaturas do óleo e enrolamentos*, *potência ativa e o balanço entre fases*.

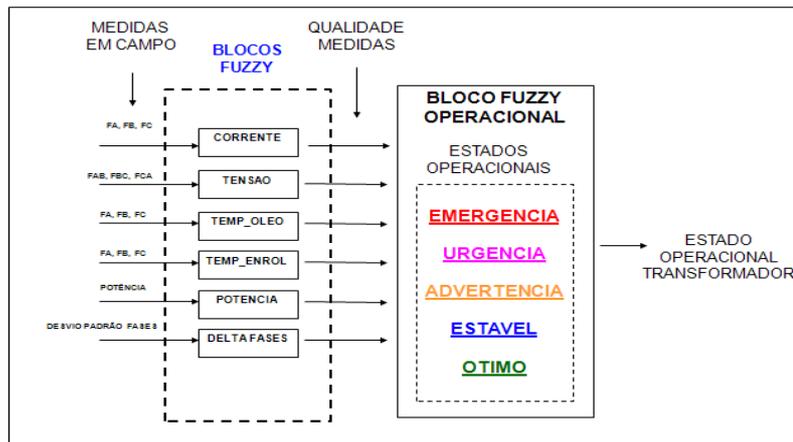


Figura 1 – Modelo fuzzy de monitoramento

O bloco principal desse modelo é o *bloco fuzzy operacional*, que irá indicar automaticamente para o centro regional de operação qual é o *status* operativo do equipamento em um determinado instante t qualquer. Foram definidos cinco estados operativos, a saber, por ordem decrescente de estado crítico: *emergência*, *urgência*, *advertência*, *estável* e *ótimo*. Por questões de espaço apenas três blocos serão apresentados neste artigo.

Bloco Fuzzy Corrente (BFC) - O bloco *fuzzy* corrente é responsável por monitorar a corrente elétrica no transformador de potência no primário ou secundário (69, 138, 230 e/ou 500 kV) no período de análise em questão (diário, mensal, anual, por exemplo). Este bloco possui três entradas e uma saída. As entradas são os valores das correntes das fases A, B e C. A saída foi definida como *estado corrente*. A Tabela 1 apresenta o domínio das variáveis em um modelo de 230 kV (secundário).

TABELA 1
 ENTRADAS DO BLOCO FUZZY CORRENTE – LADO 230 KV

NOME	TIPO	DOMÍNIO
CORRENTE_FA_230	ENTRADA	[0 2000]
CORRENTE_FB_230	ENTRADA	[0 2000]
CORRENTE_FC_230	ENTRADA	[0 2000]
ESTADO_CORRENTE_230	SAIDA	[0 1]

Essa medida ou *nota* atribuída para a corrente é baseada na comparação dos valores obtidos da supervisão do sistema elétrico com o valor da corrente nominal definido pelo fabricante do equipamento. Os métodos utilizados para as operações *fuzzy* de disjunção (E/AND), conjunção (OU/OR), implicação, agregação e desfuzzificação são respectivamente as operações min, max e método do menor dos máximos (lom). Todos os outros blocos *fuzzy* utilizam esses mesmos parâmetros. Na Tabela 2 são descritos os nomes dos conjuntos *fuzzy* das entradas, os parâmetros e formas das funções de pertinência e o intervalo percentual em relação ao nominal (N) utilizado para definir cada conjunto (C).

TABELA 2
 CONJUNTOS FUZZY DAS ENTRADAS DO BFC – LADO 230 kV

CONJUNTO	PERTINÊNCIA	PARÂMETROS	PERCENTUAL
BAIXA	TRAPEZOIDAL	[0 0 1204 1355]	$C < -20\%N$
ADVERT. INFERIOR	TRAPEZOIDAL	[1204 1355 1506]	$-20\%N < C < +20\%N$
NORMAL	TRAPEZOIDAL	[1355 1506 1656]	$-10\%N < C < +10\%N$
ADVERT. SUPERIOR	TRAPEZOIDAL	[1506 1655 1807]	$N < C < +20\%N$
SOBRECORRENTE	TRAPEZOIDAL	[1656 1807 2000]	$C > +20\%N$

A saída do bloco é um número entre 0.0 e 1.0 que deve ser interpretado como uma nota que irá refletir a qualidade da corrente no lado de transformação em questão. Quanto menor a saída do bloco (mais próximo de 0.0), pior é a qualidade das correntes como um todo; quanto mais próximo de 1.0, melhor é o *estado corrente*. Na Tabela 3 são apresentados os nomes dos conjuntos *fuzzy* da saída, a forma e parâmetros de suas funções de pertinência.

TABELA 3
 CONJUNTOS FUZZY DA SAÍDA DO BLOCO FUZZY CORRENTE

CONJUNTO	FUNÇÃO PERTINÊNCIA	PARÂMETROS
PESSIMO	TRIANGULAR	[0 0 0.3]
RUIM	TRIANGULAR	[0.1 0.3 0.5]
MEDIO	TRIANGULAR	[0.3 0.5 0.7]
BOM	TRIANGULAR	[0.5 0.7 0.9]
OTIMO	TRIANGULAR	[0.75 1 1]

Os demais blocos *fuzzy* corrente, potência, temperatura do óleo e temperatura dos enrolamentos apresentam a mesma estrutura do bloco de saída apresentado nesta seção. A seguir, as regras para o bloco *fuzzy* da corrente:

- Se corrente_fa ou corrente_fb ou corrente_fc está em sobrecorrente, então *estado_corrente* está **péssimo** (peso da regra igual a 1.0);
- Se corrente_fa ou corrente_fb ou corrente_fc está em advertencia_superior, então *estado_corrente* está **ruim** (peso da regra igual a 0.8);
- Se corrente_fa ou corrente_fb ou corrente_fc está baixa, então *estado_corrente* está **médio** (peso da regra igual a 0.6);
- Se corrente_fa ou corrente_fb ou corrente_fc está normal, então *estado_corrente* está **bom** (peso da regra igual a 0.4);
- Se corrente_fa ou corrente_fb ou corrente_fc está em advertencia_inferior, então *estado_corrente* está **ótimo** (peso da regra igual a 0.2).

Estas regras foram definidas de tal forma que quando os valores de corrente tendem ao limite nominal e/ou além deste (para sobrecorrente), a qualidade da corrente decresce (tendendo a 0.0); quanto menor é o valor da corrente, maior é a nota de qualidade (tendendo a 1.0). Estes valores (0.0 a 1.0) são pesos que indicam a *relevância de cada regra*. Uma vez que as três entradas possuem a mesma natureza (amperes) e mesmo domínio, as mesmas podem ser mapeadas em conjuntos *fuzzy* de saída diferentes. Dessa forma, os pesos indicam qual regra deve ter maior impacto durante o processo de desfuzzificação. O conjunto de regras da base de conhecimento do bloco *fuzzy* corrente foi definido por meio de entrevistas realizadas com técnicos e engenheiros especialistas do setor elétrico, refletindo a experiência desses profissionais em diagnósticos operativos de equipamentos. Todas essas observações são redundantes para todos os outros blocos *fuzzy* descritos posteriormente.

Bloco Fuzzy Temperatura do Óleo (BFTO) - O objetivo principal é obter uma nota de qualidade para a temperatura do óleo de acordo com os valores medidos em campo nas fases A, B e C no lado de transformação e período em questão. Essa medida que irá refletir o grau de aquecimento no tanque de óleo do equipamento, onde os enrolamentos das fases A, B e C estão imersos. O bloco possui três entradas que são as temperaturas do óleo nos enrolamentos nas fases A, B e C e uma saída, que reflete o estado da temperatura do óleo, denominado de *estado temp_oleo*. Na Tabela 4 é apresentado o domínio das variáveis e na Tabela 5 são descritos os nomes dos conjuntos *fuzzy* das entradas, os parâmetros e formas das funções de pertinência e o intervalo percentual em relação ao nominal (*N*) utilizado para definir cada conjunto (*C*).

TABELA 4
 ENTRADAS DO BLOCO FUZZY TEMPERATURA ÓLEO – LADO 230 kV

NOME DA ENTRADA	TIPO	DOMÍNIO
TEMP_OLEO_FA_230	ENTRADA	[0 200]
TEMP_OLEO_FB_230	ENTRADA	[0 200]
TEMP_OLEO_FC_230	ENTRADA	[0 200]
ESTADO_TEMP_OLEO	SAIDA	[0 1]

TABELA 5
 CONJUNTOS FUZZY DAS ENTRADAS DO BLOCO FUZZY TEMPERATURA ÓLEO

CONJUNTO	PERTINÊNCIA	PARÂMETROS	(%)
BAIXA	TRAPEZOIDAL	[0 0 84 94]	$C < -20\%N$
ADVERTENCIA INFERIOR	TRIANGULAR	[84 94 105]	$-20\%N < C < N$
NOMINAL	TRIANGULAR	[94 105 115]	$-10\%N < C < +10\%N$
ADVERTENCIA SUPERIOR	TRIANGULAR	[104 115 126]	$N < C < +20\%N$
TRIP	TRAPEZOIDAL	[115 126 150]	$C > +20\%N$

Na lista abaixo, as regras para o bloco *fuzzy* temperatura do óleo são descritas.

- Se *temp_oleo_fa* ou *temp_oleo_fb* ou *temp_oleo_fc* está em trip, então *estado_temp_oleo* está **péssimo** (peso da regra igual a 1.0);
- Se *temp_oleo_fa* ou *temp_oleo_fb* ou *temp_oleo_fc* está em advertencia_superior, então *estado_temp_oleo* está **ruim** (peso igual a 0.8);
- Se *temp_oleo_fa* ou *temp_oleo_fb* ou *temp_oleo_fc* está nominal, então *estado_temp_oleo* está **médio** (peso da regra igual a 0.6);
- Se *temp_oleo_fa* ou *temp_oleo_fb* ou *temp_oleo_fc* está em advertencia_inferior, então *estado_temp_oleo* está **bom** (peso igual a 0.4);
- Se *temp_oleo_fa* ou *temp_oleo_fb* ou *temp_oleo_fc* está em baixa, então *estado_temp_oleo* está **ótimo** (peso da regra igual a 0.2);

O estado de *trip* reflete a situação em que sistemas digitais de proteção atuam no equipamento para protegê-lo de danos graves e evitar a propagação desses danos para outros equipamentos na instalação. No caso da temperatura do óleo, a temperatura de *trip* é de 115°C, ou seja, acima dessa temperatura o equipamento será desligado devido à atuação da proteção. Nota-se que a temperatura do equipamento na condição nominal de carregamento em regime permanente é de 105°C.

Bloco Fuzzy Operacional (BFO) - O objetivo do bloco *fuzzy* operacional é analisar as notas de qualidade das medidas monitoradas e mapear estas entradas em uma única saída que reflete o *estado operacional* do transformador. O bloco possui seis entradas e uma saída. As entradas são as notas de qualidade das medidas monitoradas, a saber: *estado corrente*, *estado tensão*, *estado potencia*, *estado temp_enrol*, *estado temp_oleo* e *estado delta_fases*. A saída, que reflete o estado operacional do transformador, é denominada de *estado transformador*. A Tabela 6 apresenta o domínio das variáveis *fuzzy* e na Tabela 7 são exibidos os nomes dos conjuntos *fuzzy* da saída, a forma e parâmetros de suas funções de pertinência.

TABELA 6
 ENTRADAS DO BLOCO FUZZY OPERACIONAL

NOME DA ENTRADA	TIPO	DOMÍNIO
ESTADO_CORRENTE	ENTRADA	[0 1]
ESTADO_TENSÃO	ENTRADA	[0 1]
ESTADO_POTENCIA	ENTRADA	[0 1]
ESTADO_TEMP_ENROL	ENTRADA	[0 1]
ESTADO_TEMP_OLEO	ENTRADA	[0 1]
ESTADO_DELTA_FASES	ENTRADA	[0 1]
ESTADO_TRANSFORMADOR	SAÍDA	[0.0 100]

Os conjuntos *fuzzy* de todas as entradas do bloco *fuzzy* operacional são definidos da mesma forma que as saídas de cada bloco *fuzzy* das medidas de corrente, tensão, potência, temperaturas de óleo/enrolamento e delta fases. A saída do bloco é um número entre 0.0 e 100 que deve ser interpretado como uma nota que irá refletir o estado operacional no lado de transformação em questão. Quanto menor a saída do bloco (mais próximo de zero), pior é o estado operativo do equipamento; quanto mais próximo de 100, melhor é o *estado transformador*.

TABELA 7
 CONJUNTOS FUZZY DE SAÍDA DO BLOCO FUZZY OPERACIONAL

NOME DO CONJUNTO	FUNÇÃO PERTINÊNCIA	PARÂMETROS
EMERGÊNCIA	TRAPEZOIDAL	[0 0 5 29]
URGÊNCIA	TRIANGULAR	[10 30 49]
ADVERTÊNCIA	TRIANGULAR	[31 50 69]
ESTÁVEL	TRIANGULAR	[51 70 90]
ÓTIMO	TRAPEZOIDAL	[70 95 100 100]

A seguir são descritas as regras do bloco *fuzzy* operacional:

- Se *estado_corrente* ou *estado_tensao* ou *estado_potencia* ou *estado_temp_oleo* ou *estado_temp_enrol* ou *estado_delta_fases* está péssimo, então *estado_transformador* está em **emergência** (peso da regra igual a 1.0);
- Se *estado_corrente* ou *estado_tensao* ou *estado_potencia* ou *estado_temp_oleo* ou *estado_temp_enrol* ou *estado_delta_fases* está ruim, então *estado_transformador* está em **urgência** (peso da regra igual a 0.9);
- Se *estado_corrente* ou *estado_potencia* ou *estado_temp_oleo* ou *estado_temp_enrol* ou *estado_delta_fases* está médio, então *estado_transformador* está em **advertência** (peso da regra igual a 0.5);
- Se *estado_corrente* ou *estado_potencia* ou *estado_temp_oleo* ou *estado_temp_enrol* ou *estado_delta_fases* está bom, então *estado_transformador* está **estável** (peso da regra igual a 0.2);
- Se *estado_corrente* ou *estado_tensao* ou *estado_potencia* ou *estado_temp_oleo* ou *estado_temp_enrol* ou *estado_delta_fases* está ótimo, então *estado_transformador* está **ótimo** (peso da regra igual a 0.1);

Análise de Tendências

É necessário fornecer informações objetivas aos responsáveis pelo planejamento da operação e manutenção para tornar as decisões relacionadas com a operação de transformadores de potência a médio e longo prazo com um bom percentual de acerto. A proposta é fornecer uma ferramenta que indique ao longo de determinado período de avaliação (longo, de preferência), se houve crescimento, decrescimento e/ou continuidade do estado operacional do equipamento em relação ao ponto inicial do período em análise. Em termos matemáticos, a saída do bloco *fuzzy* operacional pode ser caracterizado como uma *série temporal*, considerando a precisão da supervisão do equipamento constante (varredura a cada 10 segundos, a cada minuto, etc.). Uma série temporal pode ser definida como uma sequência de dados distribuídos equiespaçadamente ou em intervalos regulares no tempo [23]. Uma série temporal pode ser definida como na Equação 1:

$$Z_t = \{Z_t \in \mathcal{R} \mid t = 1, 2, 3, \dots, N\} \quad (1)$$

onde t é um índice temporal e N é o número de observações. As saídas de todos os blocos *fuzzy* para monitoramento das medidas do transformador podem ser tratadas como séries temporais. Logo, o cálculo da tendência pode ser inferido para todas essas saídas *fuzzy* bem como nas curvas das próprias medidas supervisionadas. A seguir, é descrito o método proposto para o cálculo e classificação de tendências operativas. Os valores da série podem ser utilizados para estabelecer-se uma regressão linear com a variável de tempo. O método escolhido é o da *regressão por mínimos quadrados* que encontra a equação da reta $y = mx + b$. A que melhor representa o conjunto de pontos da série. As Equações 2 e 3 definem como são calculados os valores de m e b da reta da regressão linear [23].

$$m = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - \sum x_i^2} \quad (2)$$

$$b = y_m - mx_m \quad (3)$$

onde n é o número de pontos da série, y o vetor de dados e x o vetor os valores do eixo das abscissas; X_m e Y_m são os valores médios dos vetores x e y , respectivamente. De acordo com a inclinação da reta de tendência, a *tendência de comportamento operacional* ou *tendência operacional* pode ser classificada como:

- [Pouco | Muito] Crescente;
- [Pouco | Muito] Decrescente;
- Constante [[Sem | Pouca | Muita] Irregularidade].

Os termos (Sem, Pouco e Muito) são qualificadores opcionais (ou adjetivos) para a tendência operacional, trazendo mais informações para a análise da curva. Para determinar matematicamente a tendência e as características (termos qualificadores), devem ser analisados o coeficiente angular m e o ângulo θ que a reta da regressão faz com o eixo x (tempo). A classificação da tendência operacional, baseada no coeficiente angular m :

- Crescente, se $m > 0$;
- Decrescente, se $m < 0$;
- Constante, se $m = 0$.

A classificação da tendência operacional baseada no ângulo θ :

- Constante, se $-15^\circ < \theta < 15^\circ$;
- Pouco crescente, se $15^\circ < \theta < 40^\circ$;
- Crescente, se $40^\circ < \theta < 65^\circ$;
- Muito crescente, se $65^\circ < \theta < 90^\circ$;
- Pouco decrescente, se $-40^\circ < \theta < -15^\circ$;
- Decrescente, se $-65^\circ < \theta < -40^\circ$;
- Muito decrescente, se $-90^\circ < \theta < -65^\circ$.

4 Estudo de Caso

A metodologia proposta foi validada usando a base de dados histórica do centro de operação da ELETROBRAS ELETRONORTE [4]. Foram extraídas inúmeras curvas de varreduras das medidas de um banco de autotransformadores abaixadores de 500/230 kV e capacidade de 600 MVA, da Subestação São Luís II, no Maranhão, cujo código operacional registrado junto ao ONS é LDAT7-01.

Monitoramento Diário

Para o monitoramento diário são reportados resultados do LDAT7-01 no lado de 230 kV (secundário), dia 05 de janeiro de 2010, com os valores máximos das medidas por hora (precisão horária de 24 pontos).

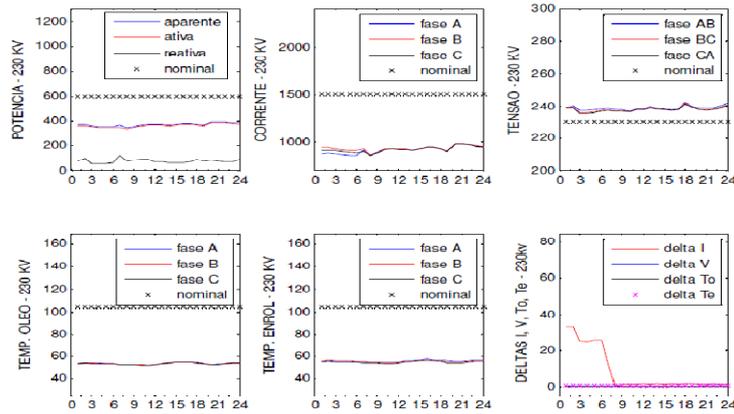


Figura 2 – Medidas no LDAT7-01/230kV em 05/01/2010

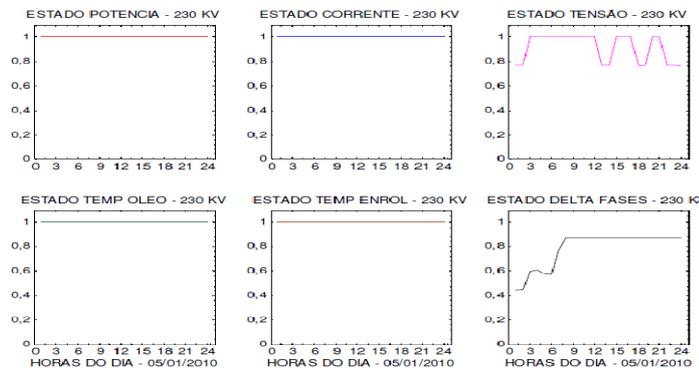


Figura 3 – Medidas do LDAT7-01/230 kV em 05/01/2010

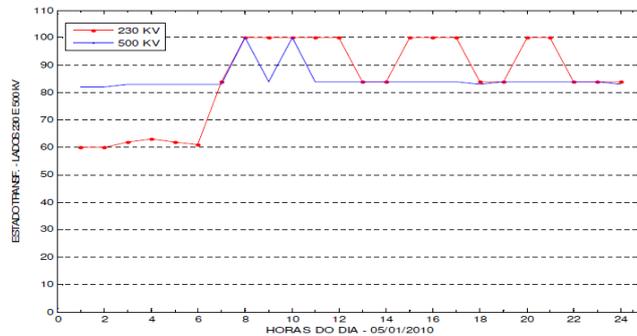


Figura 4 – Saídas *fuzzy* operacional do LDAT7-01/230kV/500kV em 05/01/2010

Na Figura 2 são apresentados os gráficos das varreduras das medidas monitoradas do autotransformador LDAT7-01 no dia 05 de janeiro de 2010 no lado de 230 kV. A parte *a* exibe a varredura da potência ativa, reativa e potência aparente. As partes *b*, *c*, *d* e *e* exibem as varreduras das fases A, B e C da (corrente, tensão e temperaturas). A parte *f* exibe os valores dos desvios padrões extraídos das correntes de fase (*delta I*), tensão (*delta V*) e temperaturas (*delta To* – temperaturas do óleo e *delta Te* – temperaturas dos enrolamentos). O valor nominal para potência é de 600 MVA; para corrente no lado de 230 kV é 1506 A (ampères); para tensão é 230 kV e para todas as temperaturas o valor nominal é 105° C. Analisando os gráficos da Figura 3 observa-se que a potência, corrente e as temperaturas (partes *a*, *b*, *d* e *e*, respectivamente) obtiveram notas máximas de qualidade (1.0), uma vez que essas medidas estão muito abaixo dos valores nominais (entre 40% e 60%) e que os blocos *fuzzy* das medidas foram projetados para atribuir notas baixas (próximas de 0.0) para valores que estejam ao redor e/ou ultrapassando o nominal. Valores muito abaixo desses limites recebem notas altas (próximas de 1.0). A tensão também recebeu notas altas (entre 0.8 e 1.0), embora não fique estabilizada exatamente em 230 kV, permitindo uma variação dentro do intervalo de +10% e -10%. O pior desempenho nesse dia foi atribuído pelo bloco *fuzzy* delta fases, que apresentou notas abaixo de 0.4 (entre as regiões de *advertência* e *ruim*); na Tabela 6.3 observa-se que entre às 00 e 07 horas do dia foram

encontrados valores do ΔI (33, 32, 25, 25, 25, 25 e 12) bem superiores aos valores dos ΔV , ΔTe e ΔTo (todos inferiores a 1.0 no mesmo período). O ΔI apresentou valores altos nesse período porque as fases da corrente ficaram muito dessincronizadas (vide Tabela 6.1); por exemplo, entre 00 e 01 hora da manhã a fase I_{FB} chegou a 947.26 (A) enquanto a fase I_{FA} ficou apenas em 881.21; a partir das 07 horas o balanço entre as fases recebeu nota máxima (figura 4).

Monitoramento Mensal

Neste estudo de caso foi realizado o monitoramento do LDAT7-01 /230 kV no mês de janeiro de 2010 com os valores máximos das medidas obtidos por dia (precisão diária de 31 pontos). Na Figura 5 são apresentados os gráficos das varreduras das medidas monitoradas do autotransformador LDAT7-01 durante esse período. Nessa análise mensal, observa-se o mesmo comportamento encontrado nas observações do dia 05 de janeiro (vide subseção anterior: Monitoramento Diário), com medidas abaixo dos limites nominais (temperaturas 55% abaixo da temperatura de *trip*), tensão irregular e delta fases com valores relativamente altos. A exceção a esse comportamento foi encontrada no dia 19, onde os valores de corrente e potência atingiram um pico muito acentuado chegando perto do limite nominal (corrente da fase *B* chegou ao valor 1397.21A e a potência a 541.45 MW). Os gráficos das saídas do bloco *fuzzy* das medidas são apresentados na Figura 6. Nas partes *a* e *b*, que representam o *estado potência* e *estado corrente*, é possível visualizar um declínio da nota de qualidade inferida pelos respectivos blocos *fuzzy* em resposta aos picos apresentados por essas medidas no dia 19/01/2010. O resultado operacional do LDAT7-01 do lado de 230 kV durante todo o mês de janeiro de 2010 é apresentado na Figura 7. Pela análise do comportamento operacional exibido na Figura 7 verifica-se que a operação do equipamento ficou trafegando entre os pares de regiões *estável/advertência* (valores entre 50 e 100 pontos) e *advertência/urgência* (valores entre 30 e 70), em ambos os lados da transformação, com o desempenho do lado de 500 kV um pouco melhor. Os picos negativos estão diretamente associados às notas baixas para o *estado delta fases* durante o mês.

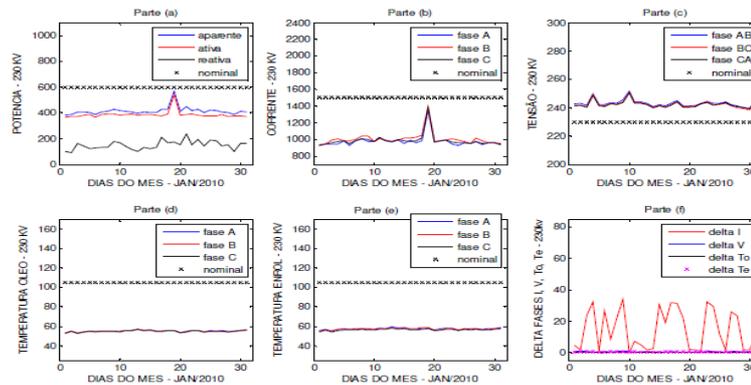


Figura 5 – Medidas monitoradas no LDAT7-01/230KV em Janeiro/2010

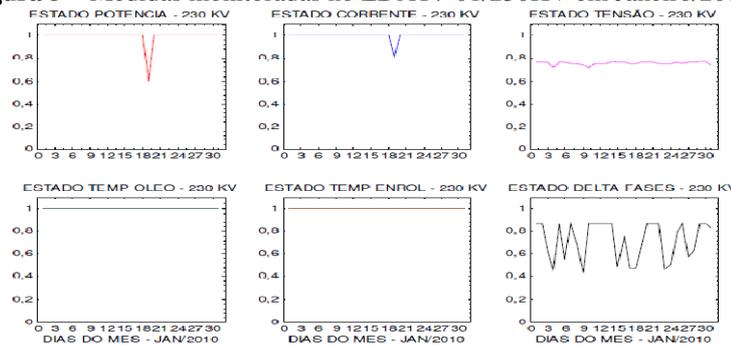


Figura 6 – Saídas dos blocos fuzzy medidas do LDAT7-01/230kV em Janeiro/2010

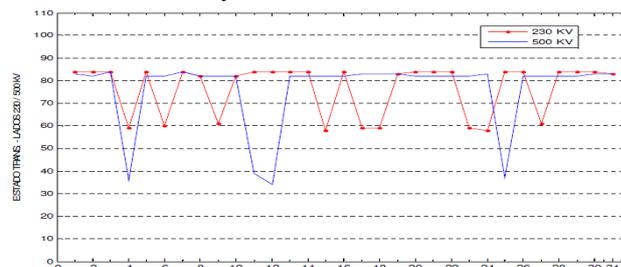


Figura 7 – Saídas dos blocos fuzzy operacional do LDAT7-01/230kV/500kv em Janeiro/2010

Monitoramento Anual

Este estudo de caso considera o monitoramento do LDAT7-01, lado de 230 kV no ano de 2009 com os valores máximos das medidas obtidos por dia (precisão horária de 365 pontos). Na Figura 9 são apresentados os gráficos das varreduras das medidas monitoradas no autotransformador LDAT7-01 do lado de 500 kV durante todo o ano de 2009, com precisão diária. Os gráficos das saídas do bloco fuzzy nesse período são apresentados na Figura 10 e o resultado operacional na Figura 11. Na Figura 12 é apresentado o monitoramento do LDAT7-01 tanto do lado de 500 kV quanto do de 230 kV no ano de 2009, com os valores máximos das medidas obtidos por mês (precisão mês – 12 pontos), utilizando a metodologia proposta. A forma de análise pode ser realizada como nos casos anteriores.

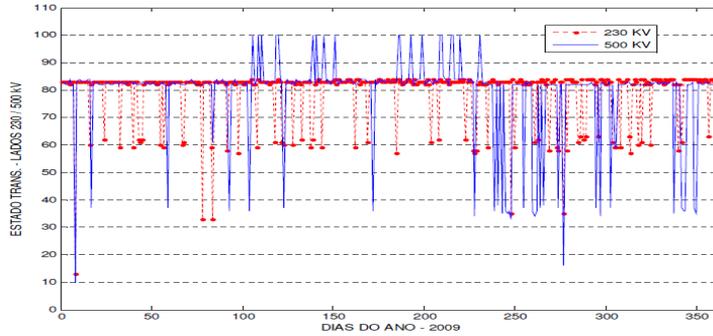


Figura 10 – Saída do bloco fuzzy operacional do LDAT7-01 230/500 kV em 2009

Análise de Tendência no LDAT7-01

Para realizar a análise de tendência, foram obtidos os valores máximos por mês das medidas monitoradas no período de junho de 2008 (início do funcionamento da base histórica da empresa) a junho de 2010. Esses dados formam uma curva de 24 pontos no período de 02 anos consecutivos. Analisar varreduras das medidas do equipamento com horizontes de análise maiores (maiores do que 1 ano) e com pontos mais representativos (máximos por dia ou mês) é uma forma adequada para efetuar esse tipo de análise com a metodologia proposta, uma vez que o objetivo principal é inferir a tendência de comportamento operacional do equipamento a médio e longo prazo sob a ótica das situações de estresse. Na Figura 12 são apresentados os gráficos com as varreduras resultantes do bloco fuzzy operacional dos lados de 230 e 500 kV, respectivamente. Em ambos os gráficos também são exibidos os gráficos da reta de tendência obtida via regressão linear e suas respectivas equações da reta. As características principais dessas retas de tendência estão resumidas na Tabela 8.

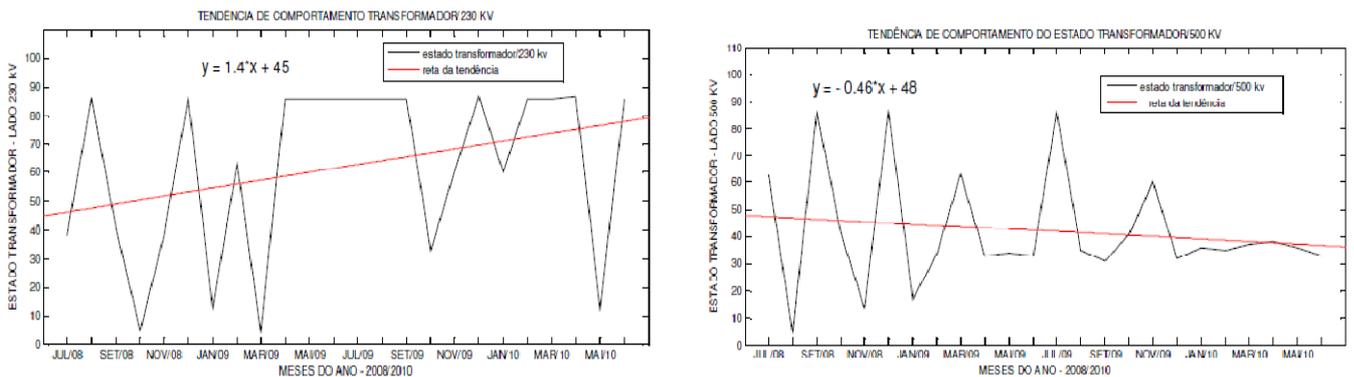


Figura 12 – Tendência de Comportamento do Estado Operacional do LDAT7-01/500 kV – Anos de 2008/2010

TABELA 8
 CARACTERÍSTICAS DA RETA DE TENDÊNCIA – ESTADO OPERACIONAL DO LDAT7-01 – ANOS DE 2008/2010

LADO	Coefficiente Angular	Angulo formado com o eixo X	Coefficiente de Variação	Tendência	Adjetivo da Tendência	Conclusão da Análise de Tendência
230 kV	1.386	54.18	0.49	Crescente	Muito	Muito Crescente
500 kV	-0.462	-24.80	0.51	Decrescente	-	Pouco Decrescente

5 Conclusões

Este trabalho apresentou uma metodologia capaz de subsidiar o monitoramento qualitativo de transformadores de potência em sistemas de energia elétrica. A metodologia proposta foi avaliada com dados referentes a curvas das variáveis monitoradas de um autotransformador, atualmente em funcionamento, de uma grande empresa geradora e transmissora de energia. Foram realizados inúmeros testes de monitoramento, nos lados de 230 kV e 500 kV, com variados períodos de testes (diário, mensal e anual) e com variadas precisões nas varreduras das curvas das medidas (01 hora, 01 dia e 01 mês). Os resultados dos testes realizados mostraram que a metodologia proposta foi capaz de efetuar corretamente o mapeamento dos valores das medidas supervisionadas em *estados operativos* esperados e de caracterizar adequadamente a *tendência operativa* em qualquer período de análise. O modelo de análise apresentado pode ser estendido para várias unidades transformadoras, para uma subestação ou generalizado para a rede de interesse completa, permitindo subsidiar a operação e dar indicativos de necessidades de reforços futuros no sistema.

6 Referências

- [1] ONS, "O que é o SIN?", <http://www.ons.org.br>. Ultimo acesso em 27/08/2010.
- [2] ANEEL, www.aneel.gov.br. Ultimo acesso em 27/08/2010.
- [3] ANEEL, "Resolução Normativa 166/2000", Fev. 2000, pp. 1-16, www.aneel.gov.br. Ultimo acesso em 27/08/2010.
- [4] ELETROBRAS ELETRONORTE, <http://www.eln.gov.br>. Ultimo acesso em 27/08/2010.
- [5] Projeto NBR 7274 (1999). Interpretação da Análise dos Gases de Transformadores em Serviço; Projeto de Revisão da NBR 7274/ 1982.
- [6] TEODORO, F. H.; FREITAS, A. A. C. de. Desenvolvimento de um sistema de inferência nebulosa para detecção e diagnóstico de falhas em transformadores de potência. I CEAP, 2004. UTFPR, Campus Cornélio Procópio.
- [7] CEPTEL, <http://www.cepel.br/>. Ultimo acesso em 27/08/2010.
- [8] SAGE, <http://www.sage.cepel.br/>. Ultimo acesso em 27/08/2010.
- [9] LIMA, Shigeaki Leite de ; Saavedra, Osvaldo R. ; Silva, A. C. da ; SOUZA, Andre Nunes de . RNB Aplicada ao Reconhecimento de Padrões de Falhas em Imagens Térmicas de Equipamentos de Subestações. In: Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE 2010, 2010, Belém. Anais do III SBSE 2010. belém : UFPA, 2010. v. 1. p. SBSE2010-0115.
- [10] LIMA, Shigeaki Leite de ; Saavedra, Osvaldo R. ; SOUZA, Andre Nunes de ; ROSA FILHO, Raimundo Nonato . Diagnostic of Incipient Failures in Power Transformers using the Extension Theory. In: Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, 2009, Belem. Anais do XI SEPOPE. RJ : CIGRE BRASIL, 2009. v. 1. p. 1-8.
- [11] LIMA, Shigeaki Leite de ; C. O. Ramos ; Saavedra, Osvaldo R. ; SOUZA, Andre Nunes de ; ZAGO, Maria Goretti . Sistema especialista integrando aspectos físico-químicos e gasosos para o diagnóstico da vida útil de transformadores de potência da Eletronorte-MA para identificação de falhas em fase incipiente. In: 8th Latin-American Congress: Electricity Generation and Transmission, 2009, Ubatuba. Anais do VIII CLAGTEE. Guaratingetá : UNESP, 2009. v. 1. p. 637.
- [12] CEPTEL, "Desenvolvimento de uma Nova Geração de Centros de Controle", Especificação Funcional, Maio de 1992.
- [13] GOMIDE, F., et al. Conceitos Fundamentais da Teoria dos Conjuntos Fuzzy, Lógica Fuzzy e Aplicações. Proc. IFSA CONGRESS, 6. TUTORIALS, p. 1-38, São Paulo, Brasil, 1995.
- [14] LIMA, S. L.; (2008). Diagnostico de falhas incipientes em transformadores de potência utilizando a teoria da extensão. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica – Universidade Federal do Maranhão, curso de Mestrado em Engenharia Elétrica, São Luís.
- [15] ZIRBES, R.; (2003). Metodologias para Avaliação e Diagnostico do Estado de Isolamento de Papel Impregnado com Óleo Mineral. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [16] REZENDE, S. O., et al. Sistemas Inteligentes – Fundamentos e Aplicações. Editora Manole, 2003.
- [17] AGUIAR, H., JUNIOR O; et al. Inteligência Computacional Aplicada à Administração, Economia e Engenharia em Matlab, Editora Thompson, 2007.
- [18] SIMOES, M. G.; SHAW, I. S. Controle e Modelagem Fuzzy. Editora Edgard Blucher Ltda, 1999.
- [19] ZADEH, L. A.; Fuzzy Sets; Information and control, v.8, p. 338-353, 1965.
- [20] HAN, J.; KAMBER, M.; Data Mining – Concepts and Techniques. Editora Morgan Kaufmann, 2008.
- [21] GOLDSCHMIDT, R. e PASSOS, E. Data Mining: Um guia prático, Elsevier – Campus, Rio de Janeiro, 2005.
- [22] LIMA, Sanderson; REIS, Laurinda Lucia N. ; OLIVEIRA, Juliana Carvalho ; COELHO, L. S. ; ALMEIDA, Otacilio da Mota . Redes neurais aplicadas ao diagnóstico de falhas incipientes em transformadores de potência imersos em óleos. In: VII Congresso Brasileiro de Redes Neurais, 2005, Natal, RN. VII Congresso Brasileiro de Redes Neurais, 2005. vol. 1. pp. 1-6.
- [23] MORETTIN, P. A. e TOLOI, C. M. C. Análise de Séries Temporais. 2. Ed. São Paul: Edgard Blucher, 2006, 538p.
- [24] E. B. M. Meza, J. C. Stacchini de Souza, M. Th. Schilling, M. B. Do Coutto Filho, "Utilização de um modelo neuro-fuzzy para a localização e defeitos em sistemas de potência," Revista Controle & Automação/Vol.17 no.1/Janeiro, Fevereiro e Março 2006 103.