



Grupo de Estudo de Transformadores, Reatores, Materiais e Tecnologias Emergentes-GTM

Métodos para Cálculo do Envelhecimento de Transformadores Isolados a Óleo Mineral: Uma Revisão do Estado da Arte

**DANIEL CARRIJO POLONIO ARAUJO(1); GABRIEL DE SOUZA PEREIRA GOMES(2); MATEUS BATISTA DE MORAIS(3); RAFAEL PRUX FEHLBERG(4).
Treetech(1); Treetech(2); Treetech(3); Treetech(4).**

RESUMO

O envelhecimento dos transformadores de potência no sistema elétrico sempre foi um assunto muito discutido, uma vez que a confiabilidade e estabilidade do mesmo sistema estão diretamente ligadas à correta operação de tais máquinas. Uma falha nestes equipamentos pode causar prejuízos extensos, muito além de apenas a interrupção do fornecimento da energia elétrica, passando por incêndios e chegando até mesmo a explosões catastróficas.

Além da importância de tais informações para garantir o funcionamento da malha elétrica brasileira, a perda de vida de um transformador, calculada a partir do seu envelhecimento, é um reflexo do carregamento aplicado no mesmo, fornecendo dados importantes não só para utilização em manutenção preditiva, mas também para estimar o custo de operação e o tempo máximo para sua substituição.

Partindo da necessidade de conhecer como o envelhecimento é operado em tais ativos, muitos estudos vêm sendo realizado desde o início do século passado, considerando que o envelhecimento de um transformador é dado majoritariamente pelo envelhecimento de sua isolamento. Pioneiramente Montsinger, um engenheiro norte-americano, mediu e analisou a variação da rigidez à tração de cambraia (tecido utilizado no passado para isolamento dos enrolamentos do transformador) em tubos de óleo, os quais foram aquecidos pelo mesmo para simular o aquecimento do óleo do transformador devido ao carregamento. Posteriormente (no final dos anos 40) Dakin propôs uma equação para relacionar diretamente o envelhecimento à temperatura do ponto mais quente do enrolamento baseando-se na equação da taxa de reação de Arrhenius, e seu resultado foi amplamente aceito pela comunidade de engenheiros eletricitistas e químicos.

A partir desses primeiros estudos, muitos fatores além da influência da temperatura foram estudados e acrescentados na equação, como a influência da umidade adquirida pelo papel e do oxigênio presente no meio, que são agentes catalizadores da reação de envelhecimento, sendo tais catalizadores um assunto amplamente discutido por Fabre-Pichon e por Oommen. Além disso, a equação proposta por Dakin foi adaptada diversas vezes, considerando outros métodos de análise para a equação de Arrhenius, como a energia de ativação da reação e o grau de polimerização do papel.

Esses estudos não só possibilitaram um maior conhecimento sobre o envelhecimento da isolamento dos transformadores em si, mas também levaram ao desenvolvimento de novos tipos de papel isolante, como por exemplo o papel termo estabilizado, buscando reduzir a velocidade da reação e por consequência diminuir a influência da temperatura e de outros fatores catalisadores, aumentando a resistência da isolamento e possibilitando assim a aplicação de um carregamento mais severo nos transformadores atuais sem ocasionar uma perda de vida excessiva.

Dentro desse contexto, este artigo é composto por uma revisão histórica e numérica dos principais métodos utilizados para o cálculo do envelhecimento e tem por objetivo servir como um guia informativo para aqueles que desejam saber o estado de vida dos seus transformadores isolados a óleo.

Para atingir tal objetivo, são apresentados e comparados os métodos utilizados pelas normas mais atuais, tanto nacionais como internacionais, incluindo a última versão da norma IEC 60076-7 lançada no início de 2018.

Além disso, são apresentadas algumas tendências na área, fundamentadas em estudos e artigos recentes que devem constar nas agendas e discussões dos próximos congressos da área.

PALAVRAS-CHAVE

Envelhecimento, Transformadores, Isolação, Monitoração on-line, Diagnósticos, Prognósticos, Sensoriamento.

1.0 - INTRODUÇÃO

Em meados de 1920, um pesquisador norte americano chamado Montsinger [1] realizou uma série de estudos com o objetivo de analisar o efeito da temperatura no envelhecimento da isolação sólida de transformadores. Após os experimentos, ele concluiu que para cada aumento de 8 °C na temperatura, a velocidade na qual o papel perdia suas propriedades mecânicas e elétricas dobrava. Esse estudo foi um marco histórico que estimulou a comunidade científica a investigar o assunto mais a fundo, servindo de base para diversas pesquisas que balizaram as primeiras normas relacionadas ao tema de envelhecimento de transformadores de potência.

No início da década de 80, surgiu a primeira edição da norma IEEE C57.91, a respeito de transformadores imersos em óleo mineral, que tratava, em uma de suas seções, o envelhecimento da isolação. Paralelamente, em 1981, foi lançada a primeira edição da NBR 5416, que também tratava do mesmo assunto, diferenciando-se da IEEE pelo modo de apresentação da equação que relaciona temperatura e expectativa de vida em horas. Posteriormente, considerando o modelo de Arrhenius, revisões foram feitas nessas normas, agregando novos conceitos. Atualmente, os modelos das normas IEEE, NBR e IEC estão unificados por este método, diferindo nas equações para cada tipo de papel. Porém, em sua revisão de 2018, a IEC 60076-7 apresentou como possibilidade, em seu anexo informativo, o cálculo do envelhecimento a partir de um conceito de energia de ativação das reações, diferenciando-se dos modelos apresentados até então.

Partindo de todas essas considerações, o objetivo desse artigo é fazer uma revisão do estado da arte no que tange ao envelhecimento da isolação celulósica de transformadores isolados a óleo. Iniciando com uma revisão das características da celulose utilizada em transformadores e, então, fazendo uma análise crítica através de simulações e cálculos, são abordados fatores que vão além da temperatura e que possuem grande influência no envelhecimento, conforme demonstrado por vários estudos modernos e ao longo da história, que ainda não são abordados enfaticamente pelas normas atuais.

2.0 - BREVE HISTÓRICO DA UTILIZAÇÃO DA ISOLAÇÃO CELULÓSICA

Antes da década de 20, a isolação de transformadores e diversos outros equipamentos elétricos era constituída tanto de materiais celulósicos como de não celulósicos (como seda e pano de algodão) [1]. Esses materiais possuíam propriedades dielétricas que foram estudadas mais a fundo a partir de meados da década de 20. Isso permitiu um maior entendimento do comportamento físico-químico dos materiais utilizados e de suas propriedades isolantes. No início da década de 30, a combinação isolante papel-óleo passou a ser mais utilizada, tornando-se a escolha preponderante para equipamentos de alta tensão a partir da década de 40. Atualmente, a isolação celulósica seca (isto é, livre da umidade inerente ao processo de fabricação de papel) em transformadores tem sido a opção mais utilizada, devido às suas excelentes propriedades dielétricas, muito embora os processos utilizados para se obtê-la demandem maior tempo e esforço.

2.1 Os dois tipos de papel kraft

Entre as opções de isolação celulósica existentes, destacam-se duas: o papel *kraft* comum e o papel *kraft* termoestabilizado (TUK). Ambos são feitos a partir da polpa da madeira e processados por um método químico conhecido como *kraft* (que originou o nome do papel), para obtenção do produto final. A termoestabilização do

papel veio seguindo a necessidade de aumento da capacidade nominal de operação dos transformadores, por volta da década de 50. A fim de evitar o envelhecimento acelerado da isolação causado pela temperatura excessiva devido ao alto carregamento, foram realizados estudos acerca da adição de certos agentes químicos no papel, para aprimorar a sua durabilidade, dando origem ao papel *kraft* termoestabilizado.

2.2 Do papel para o seu principal componente, a molécula celulósica

Como já mencionado, o principal composto dos papéis *kraft* é a celulose, que é formada por n moléculas de glicose em uma estrutura chamada de anel ($[C_5H_{10}O_5]_n$), conforme a Figura 01 a seguir.

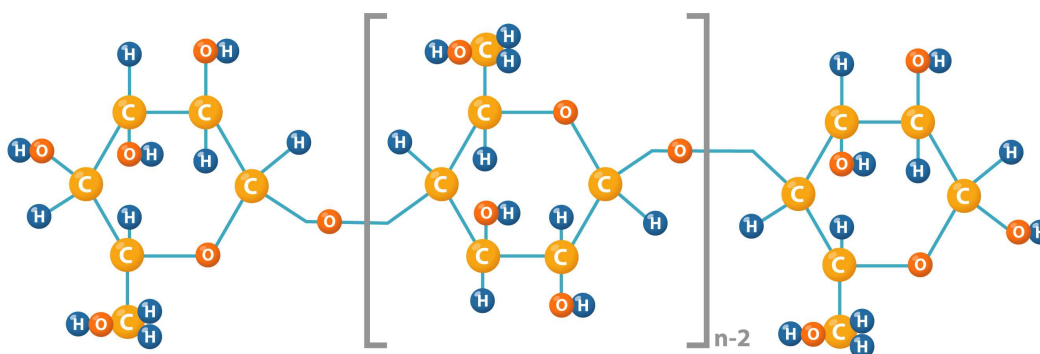


Figura 01: Polímero da celulose (ligação entre moléculas de glicose).

O estudo dessas ligações permite o entendimento do envelhecimento do papel, a partir da perspectiva das reações químicas, e seus impactos no transformador, a partir da perspectiva eletromecânica.

2.3 GP e 2FAL

A quantidade de ligações entre as moléculas de glicose n é chamada de grau de polimerização (GP), uma forma conhecida de se estimar a idade do papel isolante. Papéis *kraft* considerados novos tendem a possuir um GP da ordem de 1000 [1], valor este que pode ser estimado através de ensaios com o papel, seguindo métodos normativos, como o descrito em [2].

O método de estimativa do envelhecimento médio da isolação celulósica requer uma amostra do papel utilizado, o que pode ser invasivo demais, especialmente em um transformador em operação. Outros estudos apontam que um dos subprodutos da quebra das cadeias celulósicas, o 2-furfuraldeído (2FAL), encontrado no óleo isolante, pode ser correlacionado com o GP. Uma vez que está presente no óleo, sua obtenção é mais simples, sendo feita por meio da extração simples de amostra de óleo do transformador, costumeiramente realizada para a análise cromatográfica de gás. Outros compostos e subprodutos também podem ser identificados e relacionados ao envelhecimento, mas devido à ampla aceitação do 2FAL [3] [4] pela comunidade como subproduto mais expressivo do envelhecimento, os demais não serão abordados neste artigo.

2.4 O envelhecimento do papel

O envelhecimento de um transformador é dirigido principalmente pelo envelhecimento de sua isolação celulósica, que ocorre com a quebra das moléculas das cadeias de $[C_5H_{10}O_5]_n$. A quebra de cadeias celulósicas, processo de reações químicas de degradação do papel, faz com que este perca suas propriedades dielétricas e mecânicas ao longo do tempo, podendo levar os transformadores a falhas catastróficas principalmente se solicitados acima de sua capacidade nominal, como em curtos-circuitos ou momentos de sobrecarga. As reações químicas de quebra da celulose podem ser influenciadas por diversos fatores, sendo os mais relevantes a temperatura, o oxigênio e a umidade, conforme mostrado na Figura 02 a seguir.

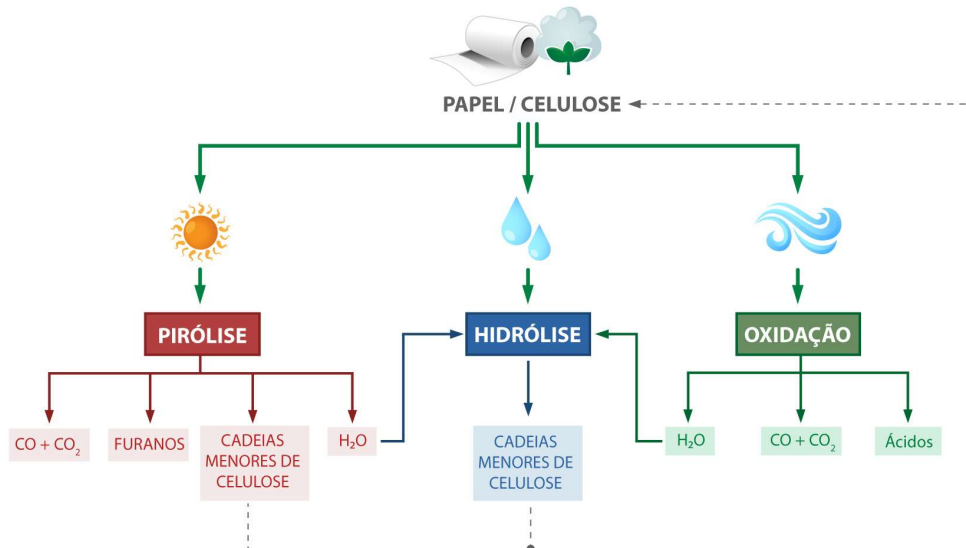


Figura 02: Fluxograma de mecanismos de envelhecimento. Adaptado de [5].

Em qualquer solução de substâncias orgânicas, como é o caso do sistema papel-óleo do transformador, para que as ligações químicas entre as moléculas sejam quebradas ou rearranjadas, formando novos produtos, é necessária uma energia mínima que estimule a movimentação dos átomos das moléculas, chamada de energia de ativação [6]. A influência dos fatores citados anteriormente pode ser percebida, conforme os resultados apresentados na sequência, na redução da energia de ativação das reações de quebra da cadeia celulósica, fazendo com que essas aconteçam mais facilmente, podendo sujeitar o transformador a um envelhecimento prematuro. A seguir, serão apresentadas as análises individuais de cada fator e sua influência e, na sequência, a combinação dos três fatores e qual a influência causada por eles simultaneamente. Outrossim, serão apresentados o modo no qual as principais normas tratam essa influência quando referindo-se ao cálculo do envelhecimento do transformador.

3.0 - DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA: PIRÓLISE

Os parâmetros mais frequentemente monitorados on-line em transformadores de potência são a temperatura do óleo e a temperatura do ponto mais quente do enrolamento. Uma vez que o papel está em contato com o enrolamento, a temperatura do ponto mais quente deste torna-se o elemento crítico para a análise da influência da temperatura no envelhecimento da isolação.

A Equação 01, que mostra a equação de Arrhenius, apresenta claramente que o aumento da temperatura implica no aumento da velocidade das reações químicas.

Equação 01:

$$k = A \left(\frac{-E_a}{RT} \right)$$

Onde A é o fator pré-exponencial em 1/h, E_a é a energia de ativação em kJ/mol, R é a constante de gás em J/(K.mol) e T é a temperatura absoluta (K). Isso foi modelado nos cálculos normativos do envelhecimento da isolação do transformador por meio de um fator de aceleração, que permite saber se, para aquela temperatura, o transformador está envelhecendo na velocidade esperada, mais rápido ou mais devagar em relação a uma temperatura de referência. As normas NBR 5416, NBR 5356-7, IEC 60076-7 e IEEE C57.91 assumem a temperatura de referência como sendo 98 °C para transformadores com papel *kraft* comum e 110 °C para transformadores com papel *kraft* termoestabilizado. A seguir, um comparativo do fator de aceleração do envelhecimento para diversas temperaturas, considerando os papéis termoestabilizado e comum.

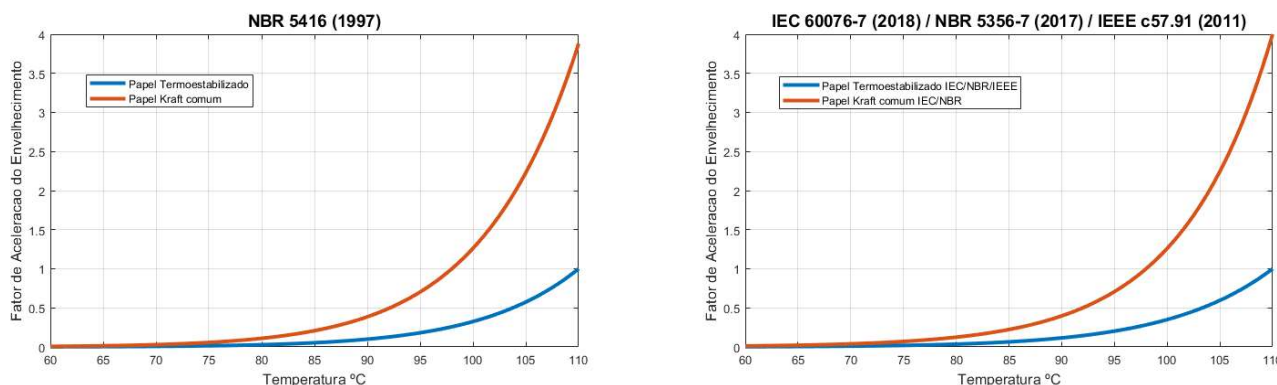


Figura 03 – Gráfico comparativo do envelhecimento. À esquerda, NBR 5416 (kraft comum e termoestabilizado). À direita, NBR5356, IEC 60076, IEEE C57.91 para kraft termoestabilizado e NBR5356, IEC 60076 para kraft comum.

Pode-se perceber que a norma NBR 5416, que é baseada na IEEE C57.91 de 1981, apresenta um modelo diferente das demais. O modelamento utilizado por essa norma mostra a perda de vida percentual em um determinado período, independente de uma temperatura de referência. O que foi alterado no cálculo do envelhecimento da norma NBR 5356-7, que substituiu a NBR 5416, foi seguir o modelamento internacional considerando uma temperatura de referência.

Alheio aos métodos engessados pelas normas, existem métodos mais genéricos da equação de Arrhenius, que já permitem a consideração da energia de ativação como uma variável do processo. Esse método já é citado no anexo informativo da norma IEC 60076-7 de 2018 e é mostrado na Equação 02.

Equação 02:

$$\frac{1}{DP_{fim}} - \frac{1}{DP_{inicio}} = A \times t \times e^{\frac{-E_A}{R \times (\theta_n + 273)}}$$

Onde DP_{fim} é o valor DP da isolação no momento da amostragem ou critério de fim de vida, DP_{inicio} é o valor DP da isolação inicial, A é o fator pré-exponencial em $1/h$, E_A é a energia de ativação em kJ/mol , t é o tempo de vida de um transformador em h , R é a constante de gás em $J/(K.mol)$ e θ_n é a temperatura de hotspot em $^{\circ}C$.

Esse valor pode ser determinado experimentalmente para cada tipo de papel, o que torna esse método mais versátil e representativo da realidade da degradação do papel. Na prática, as equações de modelamento normativo são uma simplificação dessa equação mais abrangente.

4.0 - DA INFLUÊNCIA DA ÁGUA: HIDRÓLISE

O segundo fator importante a ser considerado nas reações de quebra das cadeias celulósicas é a presença de umidade no papel. Nesse caso, os estudos mostram que a influência da umidade pode ser modelada como uma alteração no valor de "A" da equação de Arrhenius, fazendo com que para uma dada temperatura o envelhecimento seja maior para o papel mais molhado. Vale ressaltar também que a água é um subproduto da própria reação de quebra da cadeia celulósica, criando uma espécie de efeito em cascata, em que as moléculas de H_2O são consumidas, facilitando as reações de quebra, e geradas ao final da reação.

A fim de considerar a umidade no papel no cálculo do envelhecimento, o método mais utilizado é o de Fabre-Pichon, em que o fator de aceleração é multiplicado por uma razão entre a umidade no papel e a umidade de referência definida pelas normas como referência para papel seco. A seguir, um exemplo comparando o fator de aceleração do envelhecimento para diversas temperaturas sem a consideração da umidade e considerando a umidade no papel de 1 % e a umidade de referência de 0,5 %. Nesse caso, o fator de aceleração duplica ao considerar a umidade.

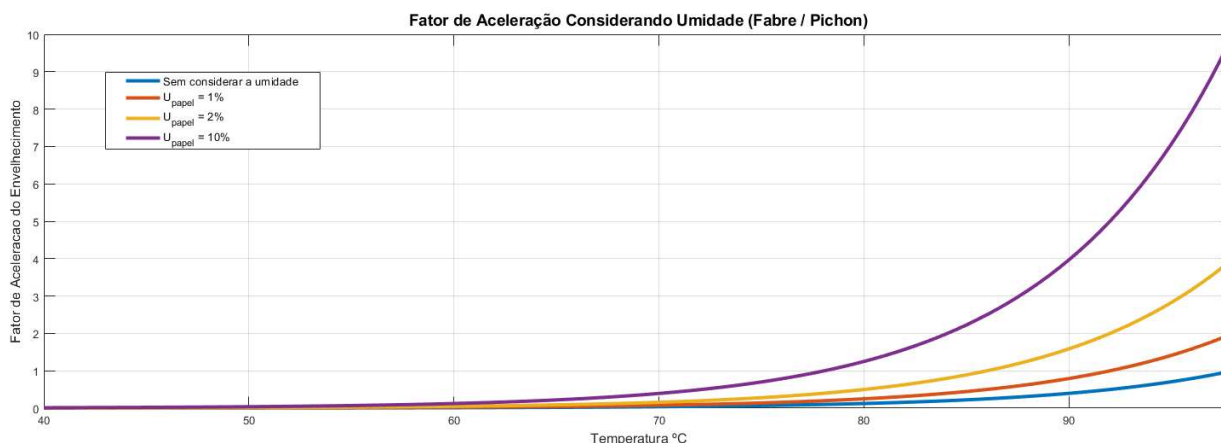


Figura 04 – Reação de degradação da celulose em presença de oxigênio [8].

O valor “A” da equação de Arrhenius é representativo das condições do ambiente em que as reações químicas ocorrem e é influenciado diretamente pela umidade. Sendo assim, a melhor maneira de se levar a presença de água no papel em consideração é conhecendo o valor de “A” para cada condição de umidade, o que passa a ser uma tarefa mais trabalhosa. Os estudos apresentados em [7] mostram que já existem alguns valores de “A” determinados experimentalmente para cada tipo de papel, considerando uma energia de ativação também determinada experimentalmente. Entretanto, ainda não foi possível encontrar uma equação generalista que relacione o valor de “A” com a umidade para todos os tipos de papel, permitindo que a equação do envelhecimento fosse matematicamente adaptada para considerar quaisquer valores de umidade no papel. A norma IEC 60076-7 de 2018 já traz em seu anexo informativo os valores da constante “A” para aplicação na fórmula do envelhecimento proposta no mesmo anexo, considerando a energia de ativação, tanto para o papel comum quanto para o papel termoestabilizado. A Tabela 01 a seguir mostra esses valores. Como se pode notar, os valores são experimentais e para valores de umidade discretas.

Tabela 01 - Energia de ativação (EA) e fator ambiental (A) para oxidação, hidrólise. (IEC 60076-7:2018)

Tipo de papel/parâmetros de envelhecimento		Livre de ar e 0,5 % de umidade	Livre de ar e 1,5 % de umidade	Livre de ar e 3,5 % de umidade
Papel Kraft (não termoestabilizado)	A (h ⁻¹)	4,1×10 ¹⁰	1,5×10 ¹¹	4,5×10 ¹¹
	E _A (kJ/mol)	128	128	128
Papel termoestabilizado	A (h ⁻¹)	1,6×10 ⁴	3,0×10 ⁴	6,1×10 ⁴
	E _A (kJ/mol)	86	86	86

As demais normas tratam a umidade apenas de maneira informativa pelo método de Fabre-Pichon, que pode ser utilizado, apesar do erro acumulado que esse método pode trazer a longo prazo no cálculo do envelhecimento. Esse erro pode ser facilmente corrigido com um ensaio para determinação do GP do transformador.

5.0 - DA INFLUÊNCIA DO OXIGÊNIO: OXIDAÇÃO

O terceiro fator influente no envelhecimento da isolamento celulósica é o oxigênio. A presença de O₂ no ambiente das reações do papel colabora para a degradação devido à oxidação da cadeia celulósica. Diversas reações de oxidação podem ocorrer nos grupos de álcool (-OH) da cadeia celulósica, abrindo os anéis de glicose e quebrando a cadeia [8]. Essas reações também produzem água como subproduto, que por sua vez influencia no envelhecimento como apontado no item anterior. A Figura 05 ilustra esse efeito.

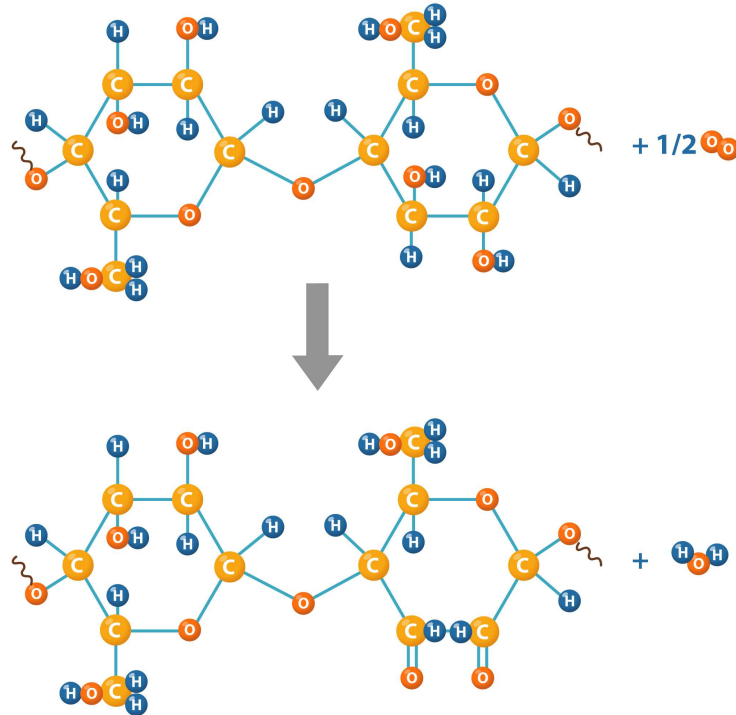


Figura 05 – Reação de degradação da celulose em presença de oxigênio [8].

Da mesma forma que a água, o oxigênio altera os valores de “A” e da energia de ativação da equação de Arrhenius, impactando assim no cálculo do envelhecimento. O que se pode comprovar experimentalmente é que o aumento de oxigênio aumenta o fator de aceleração do envelhecimento.

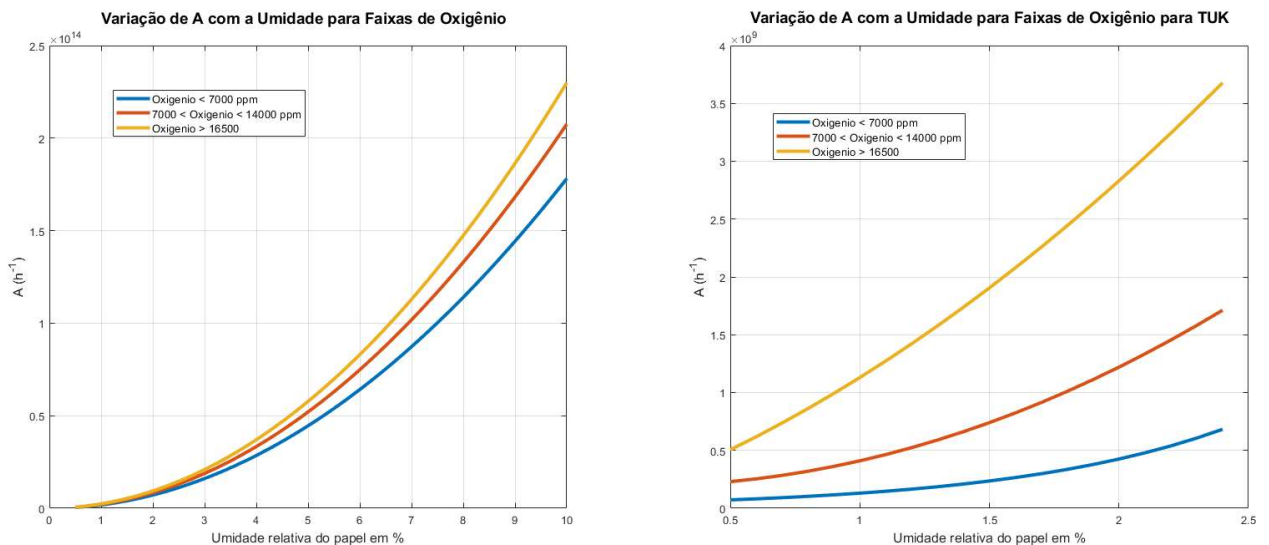


Figura 06 – Gráfico comparativo do papel kraft e termoestabilizado para oxigênio baixo, médio e alto para água constante.

A norma IEC 60076-7 de 2018, em seu anexo informativo A, também apresenta alguns valores de “A” e de energia de ativação para o caso de 0,5 % de água na presença de ar (oxigênio), mas não trata

quantitativamente essa presença de ar. A Tabela 02 mostra os valores mostrados na norma.

Tabela 02 - Energia de ativação (E_A) e fator ambiental (A) para oxidação, hidrólise. Adaptado de IEC 60076-7:2018.

Tipo de papel/parâmetros de envelhecimento		Livre de ar e 0,5 % de umidade	Com ar e 0,5 % de umidade
Papel <i>Kraft</i> (não termoestabilizado)	A (h^{-1})	$4,1 \times 10^{10}$	$4,6 \times 10^5$
	E_A (kJ/mol)	128	89
Papel termoestabilizado	A (h^{-1})	$1,6 \times 10^4$	$3,2 \times 10^4$
	E_A (kJ/mol)	86	82

Nota-se que os valores são maiores para o caso da presença de oxigênio, indicando o aumento na velocidade da reação para a presença desse gás.

6.0 - DOS EFEITOS CONJUGADOS DOS TRÊS FATORES: PIRÓLISE, HIDRÓLISE E OXIDAÇÃO

Até agora, foi possível constatar que a presença de umidade e de oxigênio no papel influencia a constante “A” e o valor de energia de ativação da equação de Arrhenius. Dado que durante toda a vida de um transformador, o teor de água e oxigênio variam constantemente, torna-se evidente que para um correto modelamento do envelhecimento da isolação seria necessário conhecer os valores de “A” e da energia de ativação para cada cenário de água e oxigênio presentes.

Em [9], foi percebida uma relação antagônica dos efeitos oxigênio e da água na presença de uma maior quantidade de oxigênio e menor de água, sugerindo que o oxigênio neutralizaria o efeito acelerador da água no envelhecimento. Posteriormente, foi mostrado em [7] que os experimentos poderiam sofrer a perda de água por evaporação no momento em que eram realizadas as medições e manipulações inerentes ao experimento, evidenciando a dificuldade existente ao tentar se manter a água no papel constante para a observação dos efeitos do oxigênio e umidade.

Um modelamento proposto em [10] para levar em consideração os efeitos de temperatura, umidade e oxigênio no envelhecimento do papel indica a realização de uma sobreposição dos efeitos estudados individualmente. Entretanto, isso implica saber qual o valor da constante “A” e da energia de ativação para cada um dos efeitos separados, o que é inviável uma vez que as constantes da equação de Arrhenius para as reações químicas representam a reação como um todo. Uma abordagem mais simples para o modelamento do fenômeno do envelhecimento é a separação do fenômeno como um todo em fenômenos mais bem conhecidos. A Tabela 3 mostra os valores das constantes de Arrhenius para papel *kraft* comum e termoestabilizado encontrado por Lelekakis et al. em [8] em algumas condições de umidade e para oxigênio entre 16500 ppm e 25000 ppm (considerado alto pelo artigo). A Figura 6 mostra o gráfico comparativo da expectativa de vida do transformador para os dois tipos de papel, para diversas temperaturas e três níveis de oxigênio: baixo (menor que 7000 ppm), médio (entre 7000 e 14000 ppm) e alto (entre 16500 e 25000 ppm) considerando a umidade fixa.

Tabela 03 - Valores A e E_A determinados para papel Kraft e termoestabilizado(TUK). Adaptador de [8].

	E_A (kJ/mol)	Valores de A (h^{-1})	Valores de A recalculados baseados em $E_A = 111$ kJ/mol
<i>Kraft</i> 0,5 %	85	$2,66 \times 10^{05}$	$9,33 \times 10^{08}$
<i>Kraft</i> 1,6 %	130	$1,04 \times 10^{12}$	$3,05 \times 10^{09}$
<i>Kraft</i> 2,7 %	111	$5,36 \times 10^{09}$	$4,70 \times 10^{09}$
Média E_A para <i>Kraft</i> (kJ/mol)	109		
TUK 0,5 %	80	$3,16 \times 10^{04}$	$4,29 \times 10^{08}$
TUK 1,6%	152	$6,64 \times 10^{14}$	$2,03 \times 10^{09}$

TUK 2,7 %	96	$3,42 \times 10^{07}$	$4,27 \times 10^{09}$
Média E_A para TUK (kJ/mol)	109		

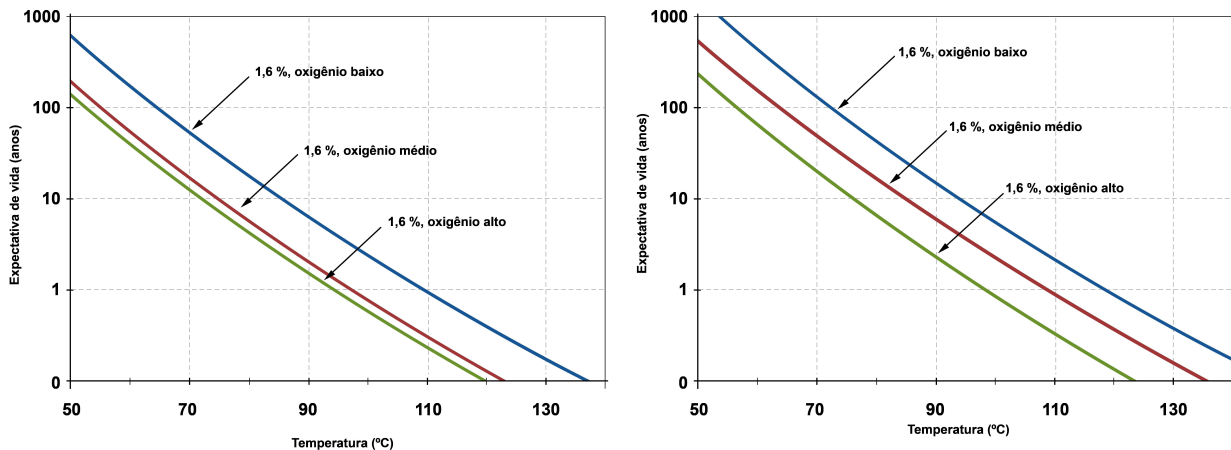


Figura 07 – Comparação de expectativa de vida de papel kraft e termoestabilizado (TUK) com 1,6 % de água, em concentração de oxigênio baixa, média e alta. Adaptado de [8].

Da mesma forma que foram determinados as constantes para essas condições, outras condições poderiam ser testadas e registradas, para compreensão cada vez maior dos fenômenos envolvidos no envelhecimento. Apesar de não ser, do ponto de vista matemático, a opção ótima, é uma boa aproximação do envelhecimento levando em conta os fenômenos de maior influência na velocidade das reações químicas de degradação do papel. Para a implementação em *software* e *hardware*, o particionamento do fenômeno não seria nenhum desafio para ser implementado, até que se possa elaborar um equacionamento para o valor “A” e para a energia de ativação que leve em conta os efeitos apresentados anteriormente em toda a sua abrangência de valores.

7.0 - CONCLUSÃO

Neste artigo, foram discutidas as causas do envelhecimento do transformador, que é dado, preponderantemente, pelo envelhecimento de sua isolamento celulósica, apresentando as pesquisas mais recentes no assunto. Além de apresentado basicamente como é formada a cadeia celulósica, foram apresentadas as influências de três fatores importantes que aceleram a degradação do papel e estão frequentemente presentes no ambiente da isolamento celulósica: a temperatura, a umidade e o oxigênio.

Esses três fatores influenciam de forma única a reação de quebra da cadeia celulósica. A temperatura fornece energia para a quebra das ligações. A água e o oxigênio se recombina com as cadeias, também favorecendo a quebra. Os efeitos dos três fatores combinados também foi apresentado, e os resultados atuais comprovam que a taxa de envelhecimento de um transformador não pode ser considerada constante ao longo de toda sua vida útil, devido às constantes da equação de Arrhenius variarem para cada cenário em que o transformador se encontra, tampouco pode ser modelada apenas com a temperatura, uma vez que umidade no papel e a presença de oxigênio influenciam diretamente na taxa das reações de degradação do papel.

De qualquer forma, ainda não se elaborou um modelo matemático exaustivo, que contemple todos os valores possíveis de oxigênio e umidade ou pelo menos uma faixa considerável desses valores. Atualmente, o modelamento normativo que leva em consideração a umidade, pelo método de Fabre-Pichon, é uma aproximação razoavelmente boa, uma vez que ela tende a subestimar a vida do transformador. Esse modelo, corrigido regularmente por ensaios de 2FAL e GP do transformador, se torna um grande aliado no monitoramento ao longo prazo do envelhecimento do transformador, considerando o impacto da umidade e temperatura em um transformador.

Para a consideração do oxigênio, os estudos já têm comprovado que o aumento de sua quantidade implica na diminuição de vida útil da isolamento, sendo um dos principais alvos das pesquisas atuais, a fim de promover

maior conhecimento e consolidação no assunto, principalmente visando possíveis ações a serem tomadas para preservar os ativos existentes. Baseando-se nesses estudos e nas últimas descobertas sobre o assunto, um estudo sobre os sintomas de envelhecimento acelerado poderá ser feito no futuro em continuação a este assunto.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) T. A. Prevost and T. V. Oommen - Cellulose Insulation in Oil-Filled Power Transformers: Part I - History and Development - IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 22, No. 1. January/February 2006.
- (2) ASTM D4243-16 1.11.2016 - Standard Test Method for Measurement of Average Viscometric Degree of Polymerization of New and Aged Electrical.
- (3) A.M. Emsley, X. Xiao, R.J. Heywood and M. Ali. "Degradation of cellulosic insulation in power transformers. Part 2: Formation of furan products in insulating oil". IEE Proc.-Sci. Meas. Technol., Vol 147, No. 3. May 2000.
- (4) M. Imani, K. Homeier, P. Werle and G. Drager. "How Far are Furan Compounds Reliable Indicators for Thermal Aging of Oil Impregnated Cellulose Insulation?". 2018 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2018.
- (5) T. V. Oommen and T. A. Prevost. "Cellulose Insulation in Oil-Filled Power Transformers: Part II - Maintaining Insulation Integrity and Life". IEEE Electrical Insulation Magazine Vol. 22, No. 2. March/April 2006.
- (6) D. G. Truhlar. "Interpretation of the activation energy". Journal of Chemical Education Vol 55, No.5, p. 309, 1978.
- (7) N. Lelekakis, D. Martin and J. Wijaya. "Ageing Rate of Paper Insulation used in Power Transformers Part 1: Oil/paper System with Low Oxygen Concentration". IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 19, No. 6. December 2012.
- (8) N. Lelekakis, D. Martin and J. Wijaya. "Ageing Rate of Paper Insulation used in Power Transformers Part 2: Oil/paper System with Medium and High Oxygen Concentration". IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 19, No. 6. December 2012.
- (9) A.M. Emsley, X. Xiao, R.J. Heywood and M. Ali. "Degradation of cellulosic insulation in power transformers. Part 3: Effects of oxygen and water on ageing in oil". IEE Proc.-Sci. Meas. Technol., Vol 147, No. 3. May 2000.
- (10) D. Martin, Y. Cui, C. Ekanayake, H. Ma, and T. Saha. "An Updated Model to Determine the Life Remaining of Transformer Insulation". IEEE Transactions on Power Delivery, 30(1), 395-402. 015.

9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Daniel Carrijo Polonio Araujo recebeu o Diploma de Graduação em Engenharia Industrial Elétrica no ano de 2005 pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, com ênfase em Sistemas Elétricos Industriais e Sistemas Elétricos de Telecomunicações. Recebeu o Diploma de Mestre em Engenharia Elétrica no ano de 2009 pela UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais, na área de concentração de Sinais e Sistemas com a linha de pesquisa em Sistemas de Controle e Automação de Processos. Cursou as disciplinas do Doutorado (Incompleto) em Engenharia Elétrica pela UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais. Atualmente é doutorando na USP – Universidade de São Paulo. Sua linha de pesquisa é em Sistemas Elétricos de Potência e Sistemas Inteligentes. Trabalha na Treetech Sistemas Digitais Ltda. desde 2007. Atualmente atua como Diretor de Engenharia / PD&I. Áreas de atuação e interesse: Sistemas de Monitoração para Equipamentos de Alta Tensão, Pesquisa de Métodos Preditivos para a Manutenção, Ensaios e Diagnósticos em Equipamentos Elétricos, Ensaios de Resposta em Frequência e Inteligência Computacional.



Rafael Prux Fehlberg trabalha com a Treetech desde 2005. Especializado em sistemas de controle e monitoramento de transformadores de potência, coordena o departamento de suporte de engenharia. Formou-se engenheiro de controle e automação em 2004 pela Pontifícia Universidade Católica do RS, e em 2015 concluiu o MBA em Gerenciamento de Projetos. Está cursando atualmente o mestrado em Engenharia Elétrica pela USP São Carlos.



XXV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

4838
GTM/04

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG



Gabriel de Souza Pereira Gomes possui graduação em Engenharia Eletrônica e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, com ênfase em instrumentação e processamento de sinais. Possui experiência nas áreas de instrumentação, aquisição e processamento de sinais e diagnósticos de máquinas elétricas, coordenação de isolamento, simulações (ATP e Simulink), modelamento matemático e físico de sistemas de potência, entre eles transformadores, buchas condensivas, isoladores e para-raios.



Mateus Batista de Moraes trabalha com a Treetech, como Engenheiro de Suporte Técnico desde 2018. Formou-se engenheiro eletricista em 2016 pela Universidade Federal de Itajubá, MG, tendo trabalhado nas áreas de proteção, controle e monitoramento de ativos do sistema elétrico.