



**GRUPO DE ESTUDO DE TRANSFORMADORES, REATORES, MATERIAIS E TECNOLOGIAS EMERGENTES  
- GTM**

**TRANSFORMADORES CONVERSORES PARA CCAT – UMA ABORDAGEM FOCADA EM SEUS  
DIFERENCIAIS**

**JOSÉ FRANCISCO LOFRANO DE OLIVEIRA(1)  
LPT STREAMLINE ENGENHARIA DE TRANSFORMADORES LTDA(1)**

**RESUMO**

Transformadores conversores desempenham, fundamentalmente, a função de interligarem sistemas CA e CC. São transformadores de potência diferenciados por uma série de peculiaridades e, usualmente, de grande porte. Algumas dessas peculiaridades são pouco conhecidas pelos profissionais do setor elétrico nacional, onde tradicionalmente predominam os equipamentos AC. Assim, cabe elencar-se uma série de perguntas essenciais à melhor compreensão do tema, capitaneadas pela abrangente questão: Quão especial é um transformador conversor? Esta e outras tantas perguntas sobre os seus diferenciais compõem a essência do texto, com respostas objetivas e derivadas da experiência do autor com projeto e fabricação de transformadores conversores para CCAT.

**PALAVRAS-CHAVE**

Transformador Conversor, Transmissão CCAT, HVDC, Estresses, Design Review

**1.0 INTRODUÇÃO**

No Brasil, a transmissão em corrente contínua é uma realidade desde os anos 80, quando foi implantado um elo CC para viabilizar o consumo em 60 Hz da energia produzida pelo setor de 50 Hz da usina de Itaipu. Por mais de 30 anos, a transmissão em corrente contínua no Brasil limitou-se a esse elo de Itaipu. Neste ínterim, as tecnologias de transmissão em CCAT evoluíram, e estudos progrediram, no sentido de aplicá-la a outros polos de geração distantes dos grandes centros de carga do país. A interligação em corrente contínua, hoje em operação, das usinas do Rio Madeira e Belo Monte à região sudeste, vem contribuindo para o aumento da importância do conhecimento técnico sobre sistemas e equipamentos CC. Entre estes equipamentos estão os transformadores conversores, indispensáveis à interconexão dos sistemas de CA e CC. São transformadores de potência usualmente de grande porte e diferenciados por uma série de peculiaridades. Dada a sua importância em um elo CC, tanto por sua significativa participação no custo da estação, quanto pela complexa logística determinada por longos prazos de entrega, é necessário que estas peculiaridades sejam compreendidas.

**2.0 OBJETIVO**

Considerando-se que praticamente a totalidade dos transformadores de potência em operação no sistema brasileiro de transmissão são equipamentos em CA, que poderíamos tratar como “convencionais”, é natural que haja um bom domínio de sua tecnologia entre os profissionais do setor elétrico. Já com transformadores conversores CCAT, pela pequena quantidade instalada no Brasil, temos atualmente um número reduzido de profissionais diretamente envolvidos em seu projeto, fabricação, operação ou manutenção. É visando ampliar o alcance desse conhecimento que as especificidades deste tipo de transformador são aqui trazidas, através de respostas objetivas a uma seleção de perguntas suscitadas pelo tema.

**3.0 ENTENDENDO OS TRANSFORMADORES CONVERSORES**

Em primeiro lugar caberia perguntarmos: Transformadores conversores são realmente equipamentos especiais? A resposta é: Sim. Existem condições de trabalho inerentes a um sistema CCAT que lhes impõem demandas não usuais em CA, o que os tornam especiais se comparados a transformadores convencionais.

Sendo assim, prosseguimos: Quão especial é um transformador conversor? É uma questão abrangente, que pode ser mais facilmente respondida desmembrando-a convenientemente nas seções que seguem.

### 3.1 Como as características operacionais de um sistema CCAT impactam o desempenho dos transformadores conversores?

#### 3.1.1 Componente CC de tensão

Diferentemente de transformadores convencionais CA, onde a tensão senoidal oscila simetricamente em torno da referência zero, aqui temos os enrolamentos de válvula sujeitos a uma tensão alternada  $U_r$  (1) oscilando em torno de um determinado nível (uma componente) de tensão contínua.

A Figura 1 exemplifica uma conexão típica do(s) transformador(es) a um polo de um conversor de 12 pulsos. Os enrolamentos de linha são ligados ao sistema de transmissão CA, sujeitos aos níveis de isolamentos usuais definidos na ABNT NBR 5356-3 ou norma equivalente. Já para o enrolamento de válvula temos  $U_r$  sobreposta a uma tensão contínua de  $0,5 \times U_{dm}$  (1) no delta, enquanto na estrela temos  $U_r$  sobreposta a uma tensão contínua de  $1,5 \times U_{dm}$ .

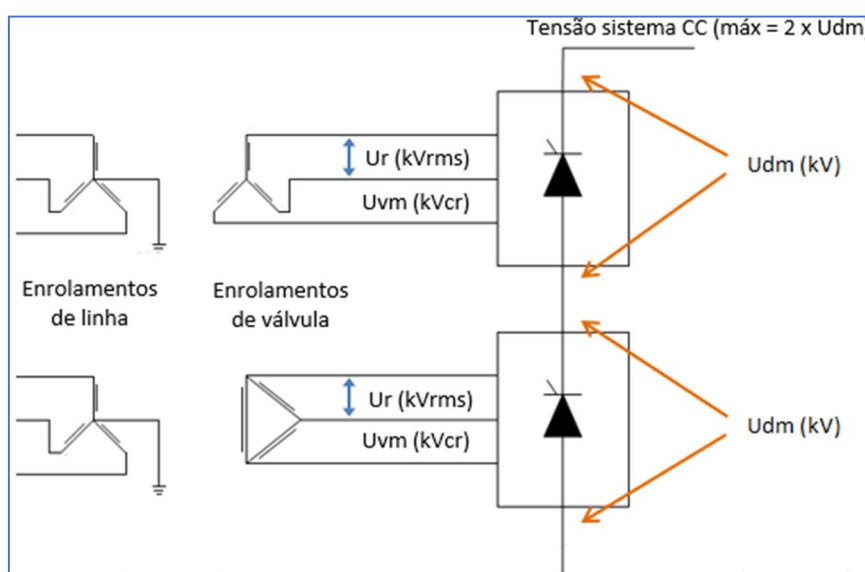


Figura 1

A consequência imediata da presença de uma componente CC na tensão dos enrolamentos de válvula é que estes enrolamentos, suas ligações e suas buchas devem ter o isolamento devidamente projetado para suportar estresses de CA e CC combinados.

#### 3.1.2 Harmônicos de tensão e corrente

Embora os harmônicos de tensão, gerados pelo chaveamento dos tiristores, tenham um efeito desprezível nas perdas em vazio e no nível de ruído dos transformadores conversores, o fato de estarem sempre presentes ou haverem transitórios de maiores valores deve ser devidamente avaliado no dimensionamento do isolamento (2).

Já o conteúdo de harmônicos na corrente que circula pelos enrolamentos impacta significativamente o desempenho do transformador em parâmetros como perdas em carga, temperatura dos enrolamentos e nível de ruído em carga. A Figura 2 é uma representação do nível de distorção tipicamente encontrado na corrente de válvula, mas que estará presente também nos demais enrolamentos do transformador conversor.

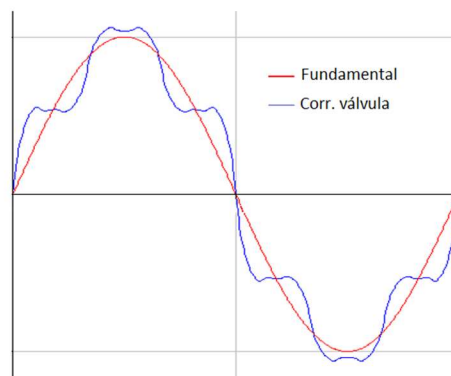


Figura 2

### 3.1.3 Componente CC de corrente nos enrolamentos (*DC bias current*)

Existe uma componente de corrente contínua (CC) que circula pelos transformadores conversores CCAT. No lado da linha esta corrente circula pelo neutro dos enrolamentos ligados em estrela aterrada, em consequência da utilização dos eletrodos de terra na transmissão. Nos enrolamentos de válvula, é produzida por desvios de sincronismo no chaveamento dos tiristores. A presença dessa componente CC provoca uma assimetria do fluxo magnético no núcleo dos transformadores, podendo, conforme a sua magnitude, refletir-se em:

- núcleo com saturação e aquecimento localizados;
- dispersão do fluxo com pontos quentes nas ferragens do núcleo;
- aumento do nível de ruído;
- aumento de perdas em vazio;
- maior conteúdo de harmônicos e valor de pico da corrente de excitação.

### 3.2 Quais as implicações de estar um transformador de potência submetido a uma componente de tensão contínua?

Enquanto em CA o campo elétrico é determinado pela PERMISSIVIDADE relativa (constante dielétrica) dos materiais, em CC a distribuição do campo é vinculada à RESISTIVIDADE (ou condutividade) dos materiais. Como a resistividade do papelão é muito maior que a do óleo, o campo elétrico CC concentra-se no isolamento sólido, ao contrário do campo CA (Figura 3).

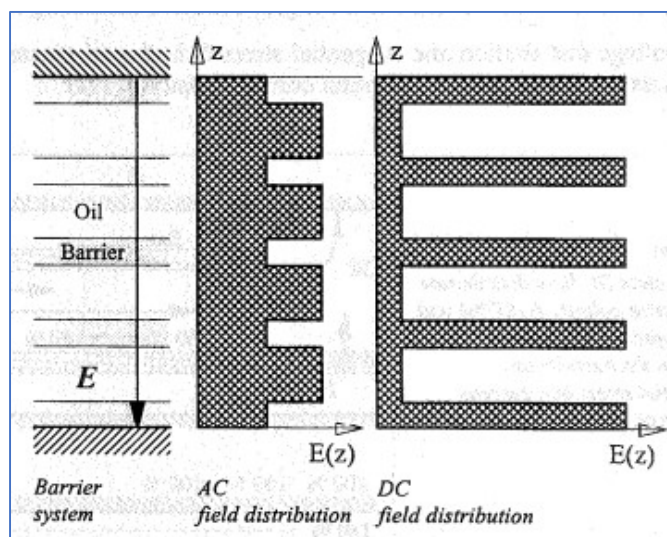


Figura 3 (3)

Essa diferença na distribuição do campo elétrico em CC, comparada à distribuição em CA, é melhor caracterizada pelo tratamento gráfico dado a simulações com ferramentas de cálculo por elementos finitos (FEM). As Figuras 4 e 5 são exemplos dessa comparação, apresentando respectivamente as linhas equipotenciais de campo elétrico e a intensidade do campo em escala de cores, para estruturas isolantes típicas de um enrolamento de válvula.

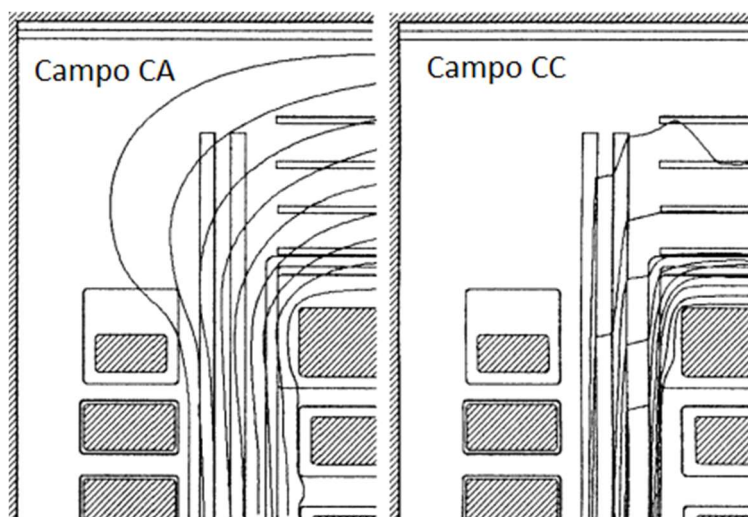


Figura 4 (4)

Como consequência da maior concentração do campo elétrico CC no isolamento sólido, o projeto de transformadores conversores exige uma proporção maior de papel/papelão em relação ao óleo isolante, proporção esta que pode chegar ao dobro dos valores típicos de transformadores CA.

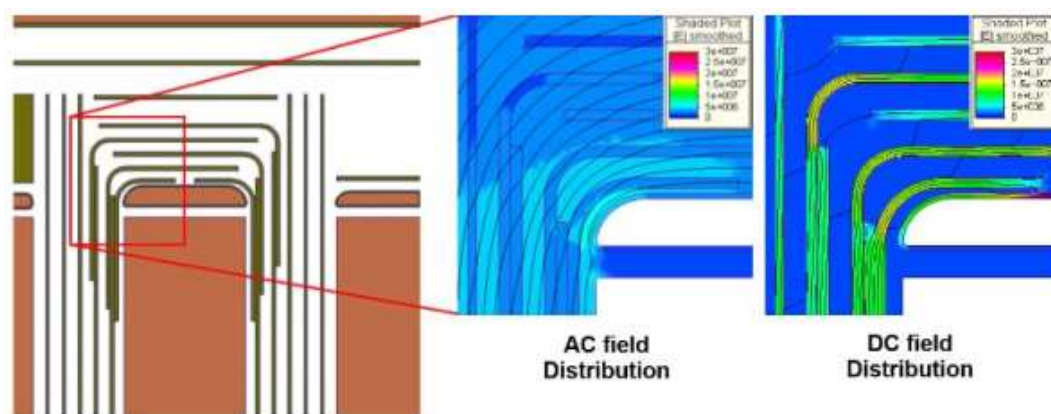


Figura 5 (5)

A temperatura é um dos principais fatores que influenciam no valor da resistividade dos isolantes, fundamental na distribuição do campo CC (3) (6). Por este motivo, os estudos de campo CC são usualmente realizados para 20°C, mesma temperatura exigida em norma para a realização dos ensaios CC (20±10 °C). À medida que a temperatura aumenta, reduz-se a diferença de resistividade entre papelão e óleo, melhorando a distribuição do campo CC e reduzindo o estresse no isolamento sólido.

A presença de campo elétrico CC implica ainda um alto padrão de limpeza da parte ativa do transformador conversor, uma vez que tanto partículas metálicas quanto partículas de celulose movimentam-se e acumulam-se sob campo CC, elevando o risco de descargas (7).

### 3.3 Que aspectos do projeto de um transformador conversor apresentam maior complexidade na comparação com o projeto de um transformador convencional AC?

Os projetos elétrico e térmico são comparativamente os mais complexos, especialmente nos seguintes aspectos:

- Isolamento dos extremos (cabeceiras) das bobinas de válvula e das saídas destas bobinas, onde o correto dimensionamento de peças de papelão sob medida é fundamental não somente para “acomodar” o campo elétrico CC, mas também para permitir uma circulação de óleo adequada;
- Cuidados com as temperaturas máximas atingidas no interior dos enrolamentos (*hot spots*), devidas à presença de harmônicos de corrente;
- Quantidade e qualidade do isolamento das ligações de CC na parte ativa, podendo estas serem somente empapeladas ou com adição de tubos concêntricos de papelão para tensões mais elevadas;

- Isolamento entre a parte inferior das buchas de CC e o interior dos canecos, onde é necessário haver uma interação entre o isolamento interno das buchas (corpo condensivo) e a estrutura isolante adjacente.

Mecanicamente, detalhes construtivos dos canecos e buchas de CC merecem também atenção, visto que para altas tensões estes itens são volumosos, pesados e tem uma inclinação normalmente acentuada, devendo-se manter as distâncias elétricas necessárias e o correto posicionamento junto à sala de válvulas.

### 3.4 Que diferenças ou requisitos adicionais podem ter os materiais utilizados em transformadores conversores?

Conforme abordado em 3.2 acima, é desejável reduzir-se a diferença entre a resistividade do óleo e a resistividade do papel/papelão<sup>1</sup> para que seja obtida uma melhor distribuição do campo elétrico em CC (redução da sua intensidade no isolamento sólido). E é somente no ÓLEO que podemos encontrar flexibilidade para este parâmetro. Assim que, para transformadores conversores CCAT, há um cuidado muito especial com a qualidade do óleo. Este cuidado deve estender-se desde a seleção de um óleo com bom desempenho em altas tensões, e cuja resistividade seja adequada, até o tratamento necessário à manutenção destes parâmetros durante todo o processo produtivo.

As peças de papelão devem possuir níveis muito baixos de rebarbas. A contaminação do óleo isolante com fibras de celulose resultará no comprometimento da sua resistividade.

Outros materiais como cola, fixações, etc., que sejam empregados em regiões de campo elétrico CC intenso, devem ser selecionados procurando-se por baixos valores de condutividade e, se necessário, serem submetidos a testes dielétricos em corrente contínua.

### 3.5 Que particularidades dos principais acessórios são fundamentais para permitir sua aplicação em transformadores conversores CCAT?

As buchas de válvula são os acessórios mais impactados pelas condições de trabalho em CCAT. Além dos níveis de isolamento CC, a serem considerados no projeto elétrico, o fabricante das buchas deve conhecer o conteúdo harmônico das tensões e correntes para um perfeito dimensionamento térmico (8).

Para ensaios dielétricos, a bucha protótipo deve ser montada em condições similares às de trabalho. Ou seja, sua parte inferior deve estar acoplada à estrutura isolante de papelão e óleo no interior de um caneco com o mesmo diâmetro do caneco do transformador. A aprovação nos ensaios com tensão CC dependerá de um casamento bem sucedido entre as estruturas isolantes do caneco e da bucha (corpo condensivo da bucha). Parte-se normalmente do projeto da bucha para poder dimensionar o isolamento do caneco de maneira a obter-se uma boa distribuição do campo elétrico CC, como exemplificado na Figura 6.



Figura 6 (9)

Estas buchas ainda estão sujeitas à temperatura ambiente no interior da sala de válvulas, já que o projeto da estação conversora normalmente prevê que elas sejam “inseridas” na sala. A temperatura deve ser informada ao fabricante das buchas de CC, juntamente com as dimensões da parede onde entram e a inclinação de trabalho.

<sup>1</sup> No contexto deste informe considera-se papel e papelão na condição de impregnados em óleo.

O comutador de derivações em carga (CDC) é também um componente que merece atenção especial para aplicação em CCAT. Além das especificações usuais, os seguintes parâmetros são também essenciais para que o fabricante do comutador o dimensione corretamente:

- Taxa máxima de variação verificada na forma de onda da corrente a ser interrompida ( $di/dt$  em A/ms);
- Frequência de comutações ( $n^\circ$  operações por ano), normalmente alta em CCAT.

Estes parâmetros são calculados pela projetista da estação conversora.

### 3.6 Existem singularidades no processo produtivo de transformadores conversores que exijam recursos específicos para a unidade fabril?

O controle da contaminação por partículas é vital no processo produtivo de transformadores para CCAT, pelas razões explicadas em 3.2 acima. Assim que deve ser mantido um rigoroso monitoramento de contaminantes, não somente do ambiente fabril da parte ativa, mas também dos materiais entregues por subfornecedores, passando por uma correta armazenagem e prezando-se pela manutenção do nível de limpeza durante toda a fabricação.

A maior quantidade e maiores espessuras de papel/papelão utilizadas neste tipo de transformador requer também cuidados especiais com os processos de secagem durante a fabricação, especialmente no tratamento dos blocos (colunas), incluindo o isolamento dos extremos (cabeceiras) das bobinas, e no tratamento da parte ativa completa, com o isolamento das ligações de CC e estruturas isolantes dos canecos de CC.

A questão da qualidade do óleo, como visto em 3.4 acima, pode também exigir recursos de fábrica específicos. Primeiramente, caso o óleo da planta não tenha o padrão de qualidade requerido, pode ser necessária uma armazenagem exclusiva para o óleo a ser utilizado nos ensaios dos transformadores CCAT. No enchimento do transformador, imediatamente após circular pela parte ativa, o óleo carregará consigo partículas contaminantes que não puderam ser eliminadas durante o processo produtivo. Haverá, então, a necessidade de uma filtragem que se estenderá até que o monitoramento do conteúdo de partículas indique o atingimento de um nível apropriado à realização dos ensaios dielétricos.

### 3.7 Que recursos são necessários para ensaiar transformadores CCAT?

Os principais equipamentos para ensaios CCAT são a fonte de tensão e o divisor resistivo, para aplicação e medição de tensões CC. Devem ter uma capacidade suficiente para os níveis previstos de tensão CC aplicada por 2h e atender os requisitos de reversão de polaridade.

É necessária a utilização de gerador CA para uma medição adicional de perdas em carga com corrente entre 10% e 50% da corrente nominal e com frequência maior ou igual a 150 Hz, para permitir o cálculo das perdas em serviço que sofrerão o efeito dos harmônicos da corrente de carga (1).

O equipamento de medição de descargas parciais deve possuir os recursos necessários para registrar a amplitude e a quantidade de pulsos de DP nos ensaios dielétricos de CC.

Quando as tensões nominais dos enrolamentos de linha e válvula são elevadas, pode ser necessária a instalação de buchas temporárias para a realização de alguns ensaios, como perdas em vazio e nível de ruído. Normalmente estas buchas são conectadas a uma derivação do enrolamento de linha.

### 3.8 Pode o transporte de transformadores conversores demandar procedimentos diferenciados?

As estruturas isolantes CC permanecem no interior dos canecos durante o seu transporte e armazenamento. Por este motivo devem ser previstos meios que mantenham tais isolantes em atmosfera seca durante todo o período que os canecos estiverem desmontados.

### 3.9 É necessária alguma capacitação técnica específica para realizar a montagem em campo?

Dadas as peculiaridades de montagem dos transformadores CCAT e do tratamento do óleo, é recomendável que a equipe de campo seja diretamente acompanhada por pessoal treinado na planta em que estes transformadores tenham sido fabricados.

### 3.10 O que não pode faltar nas especificações técnicas de transformadores conversores CCAT?

O Anexo D da IEC/IEEE 60076-57-129 relaciona os parâmetros essenciais para as especificações de transformadores CCAT. Complementarmente, caberia ainda ressaltar:

- O espectro da corrente deve incluir as harmônicas de até 49ª ordem.
- Pode haver um valor previsto para a componente contínua da corrente a ser especificado.



- Restrições de transporte e instalação são decisivas para a escolha da configuração a ser adotada no projeto (2 trifásicos de 2 enrolamentos, 3 monofásicos de 3 enrolamentos, 6 monofásicos de 2 enrolamentos, etc.).

### 3.11 O que muda entre transformadores conversores para transmissão com tecnologia LCC (*Line-commutated converters*) e transformadores utilizados em sistemas VSC (*Voltage-source converters*)?

Um esquema VSC simétrico de seis pulsos é alimentado por um transformador conectado ao centro aterrado da ponte. Portanto, ao contrário de transformadores CCAT-LCC, o nível de tensão CC em transformadores para VSC é insignificante e normalmente não requer precauções específicas para o seu projeto.

O conteúdo de harmônicos de corrente é também muito menor em transformadores que alimentam sistemas VSC, levando a um impacto muito pequeno em perdas, temperaturas e nível de ruído, na comparação com transformadores CCAT-LCC.

Também ao contrário de LCC, a seleção das buchas de válvula e do CDC para transformadores em VSC segue os mesmos critérios aplicados a transformadores convencionais. Não há uma componente significativa de tensão CC e a forma de onda da corrente de carga é pouco distorcida ( $di/dt$  irrelevante).

### 3.12 Existem particularidades a serem consideradas para transformadores conversores utilizados em elos de corrente contínua tipo *back-to-back*?

Os transformadores conversores utilizados em esquemas *back-to-back* têm basicamente os mesmos diferenciais de transformadores para transmissão em CCAT-LCC descritos neste informe. Tipicamente, em *back-to-back* o enrolamento de válvula trabalha com tensões relativamente baixas e correntes relativamente altas.

Em elos *back-to-back* que interconectam sistemas com frequências diferentes, pode ser uma opção economicamente interessante a de unificar o projeto de forma que todos os transformadores sejam aptos a trabalharem em 50 ou 60 HZ, permitindo assim que se mantenha somente uma unidade de reserva.

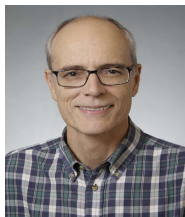
## 4.0 CONCLUSÃO

Respondendo objetivamente a perguntas derivadas da questão “Quão especial é um transformador conversor?”, chega-se a uma série de peculiaridades cuja origem está nas características operacionais de um sistema CCAT. Diferenciais desde a presença de uma componente CC de alta tensão, harmônicos de corrente e tensão, corrente CC residual nos enrolamentos, materiais e acessórios específicos, procedimentos de fabricação e recursos para ensaios, até cuidados especiais com transporte e montagem no campo, são elementos que não estão no dia a dia de muitos profissionais direta ou indiretamente envolvidos com transformadores de potência. O conhecimento destas peculiaridades e a certeza de que serão devidamente consideradas, com uma análise apropriada do projeto, são peças importantes no desempenho esperado para os transformadores conversores de novos elos CCAT.

## 5.0 REFERÊNCIAS

- (1) THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. Transformers for HVDC applications - IEC/IEEE 60076-57-129 Edition 1.0; 2017-11.
- (2) LIMA, M.C., ALVES, F.R., PENA, M.C.M. Considerações sobre os estresses impostos a transformadores conversores para CCAT aplicados no sistema elétrico brasileiro; XXI SNPTEE, 2011.
- (3) DAHINDEN, V., SCHULTZ, K., KÜCHLER, A. Function of solid insulation in transformers; TRANSFORM 98, abril de 1998. Alemanha.
- (4) CARLSON, Å. Specific requirements on HVDC transformers; ABB Transformers AB. Suécia.
- (5) CZERNORUCKI, M. V., SALLES, M. B. C., MELO, A. S., DA COSTA, E. C. M., PIEGARI, L. Effects of the HVDC system on converter transformers; IEEE-ICRERA 2019. Romênia.
- (6) SCHÖBER, F., KÜCHLER, A., KRAUSE, C. Oil conductivity – an important quantity for the design and the condition assessment of HVDC insulation systems; FHWS Science Journal, Vol. 1, No. 2, 2013.
- (7) Dan, M., Hao, J., Liao, R., Cheng, L., Zhang, J., Li, F. Accumulation behaviors of different particles and effects on the breakdown properties of mineral oil under DC voltage; Energies Vol. 12, 2019.
- (8) THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. Bushings for DC application - IEC/IEEE 65700-19-03 Edition 1.0; 2014-07.
- (9) AREVA T&D. Power transformers, Vol. 2, p. 288; 2008. França/Inglaterra.

## DADOS BIOGRÁFICOS



José Francisco Lofrano de Oliveira é especialista em projetos de transformadores e reatores de potência, campo em que atua desde 1980, quando graduou-se em Engenharia Elétrica pela UFRGS, Brasil. No ano 2000 completou o mestrado em Electrical Engineering with Industrial Applications pela Cardiff University, Reino Unido. Adquiriu conhecimento na área de projetos com uma longa experiência na indústria de transformadores, destacando-se: GE Power / Alstom Grid / Areva (Brasil e Inglaterra), Hawker Siddeley Power Transformers (Inglaterra) e Trafo Equipamentos Elétricos SA (Brasil). Atualmente lidera a LPT Streamline Engenharia de Transformadores Ltda, com foco em processos de DESIGN REVIEW.