



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

**CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO PROJETO DE TRANSFORMADORES PARA APLICAÇÃO EM ENERGIA  
EÓLICA E SOLAR**

**ODIRLAN IARONKA(1); LUIZ FERNANDO DE OLIVEIRA(1); GUILHERME MASCHIO(1); JOÃO PAULO  
VIEIRA(1)  
WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A.(1)**

**RESUMO**

Os transformadores para aplicação em energia eólica e solar são submetidos a condições de operação bastante específicas quando comparados aos transformadores do sistema elétrico de um modo geral. Tais condições exigem a concepção de um projeto robusto que atenda aos requisitos mínimos para garantir a operação nominal dos transformadores desta aplicação. As principais considerações para os transformadores desta aplicação estão relacionadas ao projeto magnético e elétrico em consequência das características da tensão, ao projeto térmico em função do carregamento intermitentes do equipamento que, invariavelmente, impacta também os requisitos do projeto mecânico do transformador.

**PALAVRAS-CHAVE**

Transformador; Geração distribuída; Redes inteligentes; Energia renovável; Energia eólica; Energia solar.

**1 INTRODUÇÃO**

Nos últimos anos é perceptível que o tema relacionado à geração de energia renovável está muito em pauta, principalmente motivado pela expansão muito forte da geração de energia eólica e solar. Percebe-se que a tendência é de que a maioria das futuras adições de geração de energia no mundo sejam predominantemente baseadas nas gerações fotovoltaica e eólica. Ainda, considerando a extrema dependência do Brasil da geração de energia hidráulica e a situação atual bastante crítica das reservas hídricas (maior estiagem das últimas décadas que se tem registro) é bastante esperado que a capacidade de geração solar e eólica seja ainda mais impulsionada. Além disso, estima-se que nos próximos anos haverá uma adoção gradativa e contínua da energia renovável até que as fontes não renováveis sejam totalmente extintas. A inserção destas novas fontes de energia impacta diretamente no projeto do transformador e para que o transformador, que é o principal ativo do sistema de transmissão e distribuição independente da origem da energia, seja concebido de modo a preservar a vida útil originalmente calculada, é fundamental que todas as características intrínsecas dos transformadores expostos à geração eólica e solar sejam consideradas ainda em fase de projeto.

**2 CONTEXTUALIZAÇÃO**

A implementação de fontes alternativas de energia renovável apresenta uma ascensão contínua ao longo dos últimos anos e, dada a situação atual de incerteza da geração de energia hidráulica no Brasil e a tendência global de sustentabilidade, é possível que ocorra uma aceleração ainda maior nos próximos anos. O custo da implantação destas tecnologias, embora ainda expressivo, está reduzindo em ritmo exponencial ao longo dos anos, aumentando e facilitando a adoção cada vez maior desta tecnologia, democratizando o acesso à geração de energia renovável [1] [2]. As unidades geradoras estão espalhadas pelo território brasileiro e consequentemente pelo sistema elétrico do país, sendo consolidada por projetos que podem ser pequenos e se resumir a alguns painéis sobre os telhados de casas e até grandes complexos de geração (parques solares e eólicos). Uma curiosidade é que a energia eólica, embora seja uma tendência bastante forte atualmente, não é uma fonte de energia nova, como podemos classificar a geração solar. Há séculos anos utiliza-se da energia dos ventos para geração de energia cinética que era usada em moinhos, movimentação de água e, até mesmo, para os primeiros geradores de eletricidade.

Não é necessário descrever neste trabalho o quanto a energia renovável tem um papel fundamental na matriz energética brasileira e o quanto ainda tem espaço para evoluir, diminuindo consideravelmente a dependência pelas energias não renováveis e até mesmo as de origem hidráulica. É unanimidade entre os especialistas do setor elétrico mundial o apontamento nesta tendência. Entretanto, é importante considerar que em todas as novas tecnologias que serão implementadas no setor, o transformador elétrico não deixará de fazer parte ou terá sua importância diminuída neste sistema de geração fortemente distribuída. Adequar os níveis de tensão entre diferentes sistemas de geração ou pontos específicos de geração e consumo do sistema elétrico será uma necessidade plenamente preservada e, dependendo da aplicação e distribuição de cargas. A gigantesca maioria da literatura correspondente ao tema afirma que o principal e mais importante ativo do sistema elétrico de transmissão e distribuição de energia é o transformador e no caso da geração eólica e solar não é diferente [3]. Neste ponto da abordagem deste trabalho é possível mencionar a aplicação dos transformadores de maneira um pouco distinta para sistemas de geração solar em relação aos sistemas de geração eólica.

No caso dos sistemas de geração solar de baixas potências, há uma característica de distribuição da geração de energia em relação ao sistema elétrico e, por isso, os efeitos desta aplicação não causam grandes impactos nas características de operação dos transformadores, principalmente, porque a energia gerada nestes sistemas descentralizados, normalmente, é consumida diretamente nestes pontos ou em regiões próximas. Ainda, como a grande maioria da energia ainda provém do sistema de distribuição de energia principal, não ocorrem grandes intercorrências nos transformadores nestes pontos onde há pequena geração de energia solar. Quando se trata de grandes parques solares, a configuração principal se altera e praticamente toda a energia gerada deve ser transmitida para ser consumida em outro ponto do sistema elétrico e, para isso, fundamentalmente, são utilizados transformadores. A relativamente baixa densidade energética dos painéis solares exige que grandes áreas sejam alocadas para a instalação e operação de um parque com grandes potências de geração. Deste modo, a configuração de conexão destes painéis solares com o sistema elétrico é realizada inteiramente através de subestações concentradoras de energia. São bastante difundidas na literatura as metodologias de transformação da energia gerada em corrente contínua para alternada com o uso de inversores de potência, ou seja, a energia gerada por um painel solar é transformada de corrente contínua para alternada na frequência do sistema através de equipamentos de potência baseados em chaveamentos de alta frequência, ainda mantendo um nível relativamente baixo de tensão (níveis típicos de 600 a 800V) [11]. Este relativo baixo nível de tensão acaba limitando as distâncias viáveis entre componentes do sistema de geração solar e, por isso, normalmente são utilizados vários transformadores de menor potência distribuídos pelo parque solar, elevando a tensão alternada da saída do inversor para níveis mais elevados, como por exemplo, no patamar de 13,8kV para transformadores de pequena potência e níveis de até 34,5kV para transformadores com maior capacidade de potência. Estes transformadores alocados diretamente na saída dos inversores de potência estão expostos às condições mais críticas de operação, principalmente relacionados aos fenômenos gerados pelo inversor de frequência e as variáveis intrínsecas da carga com característica de instabilidade.

Em relação aos sistemas de geração de energia eólica é importante destacar que não é comum a aplicação de geradores eólicos distribuídos em pontos do sistema de distribuição de energia como ocorre com painéis solares. Tal situação ocorre porque o potencial de geração eólica é maior em regiões bastante específicas do território brasileiro, predominantemente em regiões afastadas dos grandes centros consumidores. A configuração de distribuição dos transformadores no sistema de geração eólica é bastante parecida com os sistemas de geração solar, ou seja, pontos de geração de energia distribuídos e concentrando energia em transformadores de menor potência que, através de um circuito específico, direcionam para um transformador de maior potência que insere a energia no sistema elétrico. Normalmente estas aplicações são instaladas com um transformador que direciona a energia gerada em cada torre de geração eólica para um transformador de maior porte. Assim como ocorre com os transformadores acoplados diretamente nos inversores de potência no caso da energia solar, os transformadores diretamente conectados no gerador eólico são expostos a todas as variações intrínsecas da aplicação, como por exemplo, variações abruptas de carga e transientes eletromagnéticos típicos da aplicação. O transformador de maior potência que faz a função de concentrador de energia do parque de geração eólica também é exposto às variáveis da operação, mas de maneira atenuada uma vez que seu carregamento principal é gerado pela contribuição de vários pontos de geração de energia de menor capacidade.

### 3 CARACTERÍSTICAS DE PROJETO

O projeto de um transformador é concebido visando atender as especificações técnicas determinadas com base na aplicação final do equipamento. No caso da aplicação para energia eólica e solar, conforme será exposto a seguir, alguns pontos principais devem ser considerados no projeto para atender plenamente as condições de operação ao longo de sua vida útil predeterminada.

#### 3.1 *Projeto elétrico e magnético*

Nos próximos itens serão apresentadas algumas das principais características que devem ser consideradas no projeto elétrico e magnético para transformadores para energia eólica e solar. Alguns dos pontos abordados a seguir são aplicáveis mais para uma ou outra fonte de energia, mas, embora possam ser analisadas separadamente, são pontos importantes que podem ser analisadas no contexto de geração renovável.

##### 3.1.1 *Múltiplos enrolamentos secundários*

Na aplicação em energia renovável existe limitações na classificação de potência e nível de tensão do sistema do inversor e, portanto, um ou mais inversores estão conectados a um número igual de secundários dos transformadores elevadores. Por isso, a configuração mais comum para concentrar um nível maior de potência em um transformador é a utilização de dois ou três enrolamentos secundários, chegando na condição de até transformadores com seis secundários [10]. A tendência é que os fabricantes de inversores desenvolvam inversores com potência mais elevada e com capacidade de operação em paralelo, o que reduzirá a necessidade de um número elevado de enrolamentos secundários.

##### 3.1.2 *Tensão e corrente não simétrica entre fases*

A configuração utilizada nas conexões da baixa tensão (BT), principalmente para transformadores aplicados na energia solar e ou que fazem uso de inversores de potência, pode impor um carregamento desequilibrado entre as fases. Esse carregamento determina uma amplitude de corrente diferente entre cada uma das fases do transformador e, ainda por consequência disto, uma instabilidade no nível de tensão das fases de acoplamento ao transformador. Muito provavelmente o projeto de um parque de geração seja concebido proporcionando um carregamento equilibrado entre as fases. Entretanto, é sabido que os equipamentos inversores de frequência e demais itens com base na eletrônica de potência embarcada apresentam uma determinada fragilidade e podem ficar inativos por alguns períodos, gerando, como consequência, um desequilíbrio de tensão e corrente no secundário do transformador. Dependendo do número de secundários do transformador conectados aos inversores de energia é possível que haja um aquecimento não uniforme entre os conjuntos de enrolamentos de cada fase ou de cada conjunto de fases de um mesmo secundário. Ainda, o desequilíbrio de corrente e tensão também pode aumentar excessivamente o fluxo magnético disperso dos enrolamentos e, com isso, causar sobreaquecimento dos enrolamentos, ferragens da parte ativa e tanque em função das perdas parasitas.

##### 3.1.3 *Tensões transitórias*

O sistema elétrico que contempla os transformadores e os componentes da geração eólica e solar é exposto continuamente à sobretensões e subtensões de característica transitória. Tais variações ocorrem em função da entrada e ou saída de operação de dispositivos envolvidos na geração de energia, como por exemplo, conjuntos de painéis solares, inversores de potência e ou aerogeradores. Do ponto de vista de complexidade de projeto, níveis de sobretensões são bastante críticos e podem comprometer a suportabilidade dielétrica do projeto e elevar o nível de indução magnética no núcleo do transformador, podendo gerar uma falha propriamente dita. Importante mencionar que falhas dielétricas, normalmente, geram eventos importantes no transformador e podem retirá-lo de operação definitivamente. Níveis de subtensão, embora menos prejudiciais ao isolamento do transformador, pode causar distorções nos sistemas de proteção e controle do transformador, uma vez que independentemente da tensão fornecida no terminal secundário, o nível de tensão no ponto de conexão do conjunto de geração com o sistema elétrico deve ser controlado.

Ainda, especificamente, em relação sobretensão, normalmente, transformadores suportam determinados níveis de tensões acima da nominal sem perda da capacidade operativa, conforme definido em normas [4] [5]. É importante analisar as características de níveis de tensão dos transformadores para que, caso seja necessário, um nível extra de isolamento seja requerido na especificação. O custo final para aumentar em 5% ou 10% a tensão de operação e consequente isolamento de um transformador não é extremamente significativo, girando em torno de 1% a 2% do custo final do transformador e, com isso, obtem-se um aumento significativo da margem de segurança de projeto e para a operação da subestação de um modo geral.



### 3.1.4 Alterações da forma de onda do sinal de tensão na entrada do transformador

A forma de onda na saída de um inversor pode ser mais facilmente controlada, entretanto, quando são conectados vários inversores, por exemplo, é mais difícil estabelecer um controle simultâneo que garanta que todos os sinais de tensão estejam plenamente sincronizados entre si. Esta condição pode causar distorções no campo magnético dos enrolamentos e, com isso, determinar um valor de perdas diferenciado para maior nos enrolamentos. Outro ponto importante que se deve considerar é a condição de que o inversor, dependendo da ligação utilizada, pode gerar um determinado nível de corrente contínua circulante nos enrolamentos, aumentando a indução e a corrente de magnetização do núcleo e também o valor máximo do pico da corrente de *inrush*.

Ainda em relação à forma de onda da saída do inversor, podem ocorrer variações de tensão com amplitudes bastante significativas (elevado  $dV/dt$ ) principalmente entre fase e terra. Deste modo, o isolamento do enrolamento de BT que normalmente é conectado diretamente aos inversores deve ser projetado para suportar as variações rápidas da tensão durante a operação do conjunto no decorrer de toda a vida útil do transformador, considerando o nível de isolamento e perdas parasitas com consequente aquecimento pontual. Normalmente, não é necessário adicionar uma quantidade de isolamento expressiva nos enrolamentos de BT para suportar tais eventos transientes do inversor, entretanto, com o objetivo de isolar os efeitos deste comportamento no enrolamento de BT, utiliza-se uma blindagem eletrostática posicionada entre o enrolamento BT e AT, conforme mostrado na Figura 1. Esta blindagem atua como um filtro da variação da tensão  $dV/dt$  adicional, filtrando parcialmente os pulsos de alta frequência da tensão da saída do inversor e reduzindo transferência de transientes do enrolamento de BT para o enrolamento de AT e vice-versa.

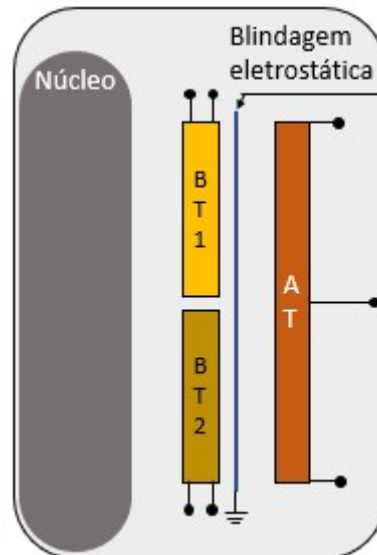


Figura 1 - Disposição típica da blindagem entre os enrolamentos de BT (dois secundários) e AT de um transformador para energia renovável

Esta blindagem é fabricada em um material condutor e devidamente projetada para que não gere aquecimentos pontuais em função da exposição ao campo magnético de elevada intensidade nesta região do transformador. Ainda em relação à blindagem utilizada, é importante mencionar que deve haver um único e sólido ponto de conexão da mesma com o transformador para evitar correntes circulantes na blindagem e sobreaquecimento.

### 3.1.5 Transientes elétricos de alta frequência

Os transformadores ligados diretamente aos sistemas geradores de energia, seja energia eólica ou solar, são interconectados com o sistema elétrico (ou com transformador maior concentrador de energia) através de disjuntores, os quais na maioria das vezes são fabricados com tecnologia a vácuo. A literatura tem muitos trabalhos abordando as transientes elétricos gerados pelo chaveamento de disjuntores que podem causar falha de isolamento, gerando a necessidade de uma análise detalhada para garantir um projeto de isolamento adequado [6]. Sistemas de geração de energia renovável são dotados de muitos equipamentos com eletrônica de potência embarcada que geram necessidade de intervenções e, para isso, implicam em desligamentos e religamentos dos transformadores. Estes desligamentos podem, inclusive, ser realizados na condição sem carga, a qual é a mais crítica do ponto de vista de

solicitações dielétricas internas ao transformador. Além do mais, a interconexão dos equipamentos geradores até o transformador, normalmente, é feita através de cabos e barramentos que estabelecem capacitâncias intrínsecas que podem alterar o comportamento do transformador frente a estes eventos transitórios de tensão.

Para contornar estas solicitações sem que seja necessária uma condição de sobreisolamento do transformador podem ser adotadas medidas ativas de contenção, conforme segue:

- Instalação de para-raios no lado AT do transformador. Entretanto, esta medida não é suficientemente eficaz para proteger o transformador contra transientes muito rápidos;
- Instalação de filtro baseados em resistores e capacitores no lado AT do transformador para proteção contra transientes de tensão de frentes muito rápidas.

Ambas as opções para atenuação dos efeitos dos transientes elétricos de alta frequência devem ser analisados previamente através de estudos do sistema elétrico completo para que a solução adotada seja eficaz para o sistema específico.

#### 3.1.6 *Corrente de magnetização (inrush)*

Os transformadores para energia renovável são mantidos energizados e conectados ao sistema independente da condição de carga que o equipamento está submetido. Esta condição é adotada para que o equipamento esteja sempre apto a receber carga e, por consequência, diminui os efeitos da corrente de *inrush* (ou de magnetização). Esta corrente gerada na energização do transformador tem valores mais elevadas principalmente quando é alimentada pelo enrolamento de BT que está, normalmente, alocado muito próximo ao núcleo magnético e, com isso, estabelece uma reatância de núcleo de ar com baixo valor.

#### 3.1.7 *Rendimento do transformador*

Este ponto do projeto de transformadores para energia eólica e solar é importante dada a operação típica que corresponde a um carregamento descontínuo ao longo do ciclo diário de carga. Desta forma, comumente os projetos dos transformadores destas aplicações têm um nível bastante reduzido de perdas na condição a vazio (energizados sem carga). Considerando que a máxima potência de geração de energia e consequentemente carregamento dos transformadores acontece em um pequeno período do dia, é possível obter uma configuração de projeto do transformador com elevada eficiência mesmo admitindo um nível mais elevado de perdas em carga. Uma condição que deve ser observada é que caso haja alguma condição que o transformador opere em carga em um maior período do ciclo diário o valor de perdas em carga deve ser revisto e até mesmo reconsiderado. As condições mais comuns que carregam um transformador durante todo ciclo diário são:

- Transformadores alocados para drenar a energia de parques onde há combinação da energia solar e eólica (em algumas regiões do Brasil o potencial eólico ocorre a noite exatamente no período inverso da capacidade de geração solar);
- Transformadores alocados para energizar sistemas equipados com compensadores de energia ativa multidirecionais (compensadores, reatores, capacitores);
- Transformadores alocados para energizar sistemas com armazenadores de energia (baterias).

Em síntese, é importante ponderar entre período de carregamento e rendimento mínimo para operação, mantendo a premissa de que a eficiência em um ciclo de carga especificado é otimizada para obter um ponto ótimo de eficiência de operação.

#### 3.1.8 *Condições de curto-circuito*

Os transformadores para energia renovável normalmente são concebidos com múltiplos enrolamentos secundários para aumentar as possibilidades de conexão ou de vários inversores de potência ou de múltiplos geradores eólicos de menor potência. Neste sentido, são criadas múltiplas condições de curto-circuito bastante críticas que devem ser analisadas única ou conjuntamente, uma vez que há contribuição de vários pontos do sistema para um possível evento de curto-circuito. O projeto do transformador deve incluir, pelo menos, as principais condições de curto-circuito listadas na sequência:

- Curto-circuito na AT do transformador (contribuição de toda a geração do lado de BT);
- Curto-circuito em qualquer um ou mais BTs do transformador (contribuição das outras BTs não envolvidas no evento e do lado de AT);
- Curto-circuito entre quaisquer dois BTs do transformador (contribuição das outras BTs não envolvidas no evento e do lado de AT).

Importante mencionar que do ponto de vista de projeto de suportabilidade do conjunto da parte ativa à curtos-circuitos, a máxima exigência dos enrolamentos é observada quando ocorre a falta em um dos enrolamentos de BT enquanto os outros estão em operação. Nesta condição a falta atinge um valor bastante crítico porque é alimentada pelos demais enrolamentos de BT e também pelo lado da AT [12].

#### 3.1.9 *Ligação dos enrolamentos de BT*

Transformadores para energia renovável podem ter um esquema de ligação em estrela ou triângulo de acordo com a especificação do projeto. Quando a BT destes transformadores é construída em estrela, normalmente se utiliza a configuração de neutro flutuando (não aterrado). Mesmo aqueles equipamentos especificados com o terminal do neutro acessível externamente ao transformador, normalmente, o terminal de neutro fica na condição flutuando.

### 3.2 **Projeto térmico**

O projeto térmico de um transformador para energia renovável deve considerar alguns pontos que, embora seja comum em projetos de qualquer transformador, apresentam algumas características específicas abordadas a seguir.

#### 3.2.1 *Temperatura ambiente*

Sistemas de geração de energia solar apresentam a máxima capacidade de geração e, conseqüentemente, o maior carregamento quando há a máxima incidência de radiação solar, exatamente coincidindo com o período em que há a temperatura máxima ambiente. As regiões de instalação dos parques solares são estrategicamente alocadas em locais com maior incidência solar, o que está diretamente relacionada com uma temperatura ambiente média mais elevada e que deve ser considerada no projeto para não comprometer a vida útil de projeto do transformador.

#### 3.2.2 *Comportamento da carga*

A elevação de temperatura do transformador ocorre mais lentamente relativamente à variação de carga típica dos sistemas geradores de energia renovável, sendo representada como um comportamento de inércia térmica. No caso específico de geradores eólicos, devido às variações constantes da velocidade do vento, a carga no transformador varia mais frequentemente, o que pode incluir mudanças abruptas de potência gerada. As variações repentinas e frequentes de podem gerar um estresse mecânico severo no enrolamento e, no caso de transformadores isolados a óleo, isso pode criar bolhas no fluido isolante. Esta condição deve ser avaliada e, caso aplicável, o dimensionamento do equipamento pode considerar este descolamento entre variação de carga e elevação de temperatura para otimizar o projeto do transformador e fazer com que estas variações térmicas sejam absorvidas.

#### 3.2.3 *Condição de ventilação natural*

Para sistemas geradores de energia eólica com transformadores alocados exposto ao ambiente externo na parte inferior da nacela (na parte superior da torre) ou no solo (próximo à base da torre) é importante considerar a velocidade natural do ar incidente nestes transformadores durante a fase do projeto térmico. Ao contrário da geração solar, que a máxima carga ocorre quando a incidência solar é máxima aumentando a temperatura ambiente e agravando a condição de operação do transformador, a geração eólica é máxima quando ocorre a máxima incidência de vento que, conseqüentemente, auxilia na refrigeração do transformador. Em outras palavras, a condição de operação do transformador é melhorada porque o sistema de refrigeração se torna mais eficiente conforme aumenta a carga nos aerogeradores em função do aumento do vento.

#### 3.2.4 *Perdas e harmônicos de corrente*

O espectro harmônico típico para transformadores de energia renovável pode causar um sobreaquecimento interno nos enrolamentos e nas ferragens devido ao campo magnético disperso dos enrolamentos. Este espectro deve ser calculado previamente e fornecido juntamente com a especificação técnica para que o transformador seja projetado e construído considerando os efeitos das frequências harmônicas nas perdas e conseqüente aquecimento.

### 3.3 **Projeto mecânico**

O projeto mecânico de um transformador para energia renovável apresenta alguns pontos específicos que merecem destaque para que ao longo da vida útil de operação o equipamento tenha um comportamento adequado.

### 3.3.1 *Solicitações mecânicas em função da variação térmica*

Conforme já mencionado em alguns pontos deste trabalho, os transformadores destas aplicações em energia renovável sofrem alterações abruptas e bastante frequentes de carga e, conseqüentemente, de elevação de temperatura. O que acontece do ponto de vista mecânico é que a dilatação térmica dos componentes do transformador, neste caso, ocorre rapidamente e várias vezes por dia, causando um estresse mecânico bastante elevado nos enrolamentos, ferragens de fixação da parte ativa, soldas do tanque e dos elementos periféricos, como por exemplo, radiadores e conservador de óleo. A principal consequência destas solicitações mecânicas, no caso de transformadores a óleo, é a perda da hermeticidade do equipamento, gerando vazamentos e possibilitando a entrada de impurezas que podem contaminar o fluido isolante interno. No transformador a seco o que pode ocorrer são os esforços térmicos dos enrolamentos causar a fragilização da resina isolante dos mesmos, expondo o equipamento a uma condição de baixa isolação e possível falha dielétrica.

### 3.3.2 *Vibrações da turbina eólica*

Quando o transformador é instalado em alguma condição que estabelece um contato direto com a nacele de geração de energia eólica, seja no interior ou na parte inferior da mesma (no alto das torres), ocorrem as solicitações relacionadas às vibrações intrínsecas de operação destes equipamentos geradores. Sabe-se que independentemente do tipo do transformador utilizado (seco ou à óleo), todo o conjunto sofre solicitações mecânicas intensas, principalmente as conexões elétricas dos condutores e barramentos, os suportes de fixação, radiadores, buchas e outros elementos periféricos.

### 3.3.3 *Ambiente de instalação*

Grandes parques geradores de energia renovável são construídos em locais próximos ao mar em função do potencial eólico disponível e, devido a isso, todos os equipamentos desta aplicação são expostos a atmosferas altamente corrosivas. Alguns desenvolvimentos desta aplicação, inclusive, são construídos em alto mar (*offshore*), aumentando ainda mais as exigências em função do ambiente muito agressivo típico desta localização combinados com o nível muito alto de umidade e ventos constantes. Para contornar esta condição, o projeto dos transformadores deve manter exposto ao ambiente somente pontos que tiveram o tratamento adequado para tal condição, como por exemplo pinturas correspondentes à classe C5.

## 3.4 *Características gerais*

Alguns pontos importantes do projeto de transformadores para energias renováveis são abordados nos itens a seguir.

### 3.4.1 *Utilização de fluido vegetal*

Normalmente parques geradores de energia renovável são concebidos seguindo o conceito de sustentabilidade e isso acaba exigindo que os transformadores utilizem fluidos biodegradáveis, como por exemplo o óleo vegetal. Neste caso, todos os pontos relativos ao fluido vegetal devem ser considerados no projeto, como por exemplo, adaptações do sistema de circulação de óleo em função da viscosidade do óleo, possibilidade de temperaturas mais elevadas de operação, características dielétricas e térmicas diferenciadas, sistemas de selagem dos transformadores, periodicidade das manutenções, entre outros [13].

### 3.4.2 *Utilização de transformadores tipo seco*

A aplicação de transformadores do tipo seco pode fazer parte de um projeto que mantenha o foco nas questões ambientais relacionadas à sustentabilidade, principalmente por ser tratar de um equipamento relativamente mais seguro por não utilizar qualquer fluido isolante potencialmente inflamável e por ter a capacidade de operação em temperaturas mais elevadas (classe F 155° ou classe H 180°C). Entretanto, o que gera uma limitação de aplicação desta tecnologia de transformador isolado a ar é que o mesmo exige um local abrigado ou um sistema de proteção IP adequado para instalação. Deste modo, a aplicação deste tipo de transformador ainda é ou no interior das nacelles de sistemas de geração eólica ou em locais abrigados de sistemas de geração solar de menor potência, abrigados conjuntamente aos inversores de potência.

Além das condições ambientais de instalação dos transformadores a seco, um ponto importante que deve ser considerado no projeto destes transformadores é que a resina utilizada como isolante das bobinas destes transformadores deve ser tratada termicamente para suportar as variações abruptas de carga. Normalmente o



coeficiente de dilatação térmica da resina é diferente dos materiais internos das bobinas e, caso não seja adotada os tratamentos térmicos adequados, uma variação rápida na carga pode alterar a temperatura dos condutores tão rapidamente que pode provocar rachaduras na resina e comprometer sua capacidade de isolamento dielétrico.

Outro fator que limita fortemente a aplicação de transformadores a seco é a potência da aplicação. Com parques solares e geradores eólicos com cada vez maior potência de geração, o transformador a seco acaba se tornando uma opção mais cara, tornando o transformador a óleo uma opção mais viável economicamente. Por isso, os transformadores isolados com fluidos biodegradável (possibilidade de operação em uma maior temperatura) acabam se tornando uma opção mais viável frente aos transformadores a seco.

#### 3.4.3 Transformadores concentradores de potência

A maioria dos itens citados neste trabalho para os transformadores conectados diretamente nos sistemas geradores de energia renovável pode ser relacionados também para o transformador principal que concentra a potência gerada nos transformadores de menor potência. Contudo, cabe ressaltar que alguns efeitos são atenuados neste transformador principal concentrador de maior potência porque a carga que passa por ele é a somatória de todos os vários outros transformadores menores, deste modo, por exemplo, a entrada e saída de operação de um inversor ou gerador eólico tem menor impacto no carregamento total do transformador de potência principal. Entretanto, é muito importante destacar que a importância deste equipamento é muito maior porque caso ele saia de operação o parque de energia renovável é desligado completamente, independente da condição de operação dos demais transformadores de menor porte. Deste modo, todos pontos relacionados neste trabalho devem ser observados também no projeto do transformador de potência principal de conexão dos parques solares e eólicos com o sistema de modo a garantir uma confiabilidade de operação destas fontes de energia cada vez mais fundamentais.

## 4 CONCLUSÃO

É unanimidade que a energia renovável vai aumentar exponencialmente a participação na matriz energética mundial nos próximos anos e, por isso, os transformadores envolvidos neste contexto devem atender plenamente as características específicas desta aplicação. Independente da fonte geradora de energia, os transformadores continuam sendo os ativos mais importante no sistema elétrico e, deste modo, os mesmos devem ser concebidos baseados em um projeto adequadamente desenvolvido que atenda as características abordadas neste trabalho. Deste modo, este trabalho abordou detalhadamente do ponto de vista técnico os principais pontos e características especiais de projeto que devem ser consideradas para garantir que os transformadores aplicados na geração de energia eólica e solar atendam a especificação técnica plenamente, garantindo a operação plena ao longo da vida útil originalmente calculada para estes equipamentos.

Embora o conceito de operação tradicional dos transformadores não se altere, a tendência é que, assim como os sistemas geradores de energia renovável mudaram muito nas últimas décadas, os transformadores empregados nesta aplicação sejam cada vez mais dotados de sistemas automáticos de detecção de faltas, compensações de sobretensões ou sobtensões, compensação automática de reativos, isolamento automático de falhas na alta e baixa tensão, filtros de transitórios de alta frequência, compensação de queda de fase, capacidade de operação com fluxo de energia em ambos os sentidos, entre outros pontos importante para o projeto de transformadores. Há, ainda, uma grande tendência em utilizar cargas não lineares e com corrente contínua (para carregamento de veículos elétricos e outras cargas CC) que farão cada vez mais parte a potência consumida não seja mais a tradicional corrente senoidal trifásica equilibrada.

## 5 REFERÊNCIAS

- [1]. ANEEL. (2021). ANEEL. Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica: <https://www.aneel.gov.br/>
- [2]. INEE. (2021). Instituto Nacional de Eficiência Energética. Fonte: <http://www.inee.org.br/>
- [3]. Luiz, C. M. (2012). Avaliação dos Impactos da Geração Distribuída para Proteção do Sistema Elétrico. UFMG.
- [4]. IEEE C.57.159 (2016). "IEEE Guide on Transformers for Application in Distributed Photovoltaic (DPV) Power Generation Systems"
- [5]. IEC 60076-16 (2011). "Power transformers - Part 16: Transformers for wind turbine applications"
- [6]. S. Temborius, M. Lindmayer and D. Gentsch, "Switching behavior of different contact materials for vacuum interrupters under load switching conditions," Proceedings ISDEIV. 19th International Symposium on

- Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (Cat. No.00CH37041), 2000, pp. 519-523 vol.2, doi: 10.1109/DEIV.2000.879041.
- [7]. ISO 12944 - 1998, Parts 1 -8 Paints and varnishes -- Corrosion protection of steel structures by protective paint systems -- Part 5: Protective paint systems
- [8]. IEC 60076-11, 2004 Power transformers - Part 11: Dry-type transformers
- [9]. IEC 60076-14 Power transformers - Part 14: Liquid-immersed power transformers using high-temperature insulation materials
- [10]. V.I. Panchenko, D.V. Tsyplenkov. et al. "Machine – Transformer units for wind turbines" – Research gate March 2016
- [11]. Panya Khemmook, Warachart Suwan – ngam, Surin Khomfoi; "Suitable Power Transformer for Solar Farm Applications"
- [12]. V. I. Panchenko, D. V. Tsyplenkov, et.al. "Machine-Transformer Units for Wind Turbines" eSearchGate, March 2016.
- [13]. Cooper Power Systems Catalogue; "Envirotrain Solar Transformer"
- [14]. Yixin Zhu ; Fang Zhuo ; Hongtao Shi; "Power management strategy research for a photovoltaic-hybrid energy storage system" ECCE Asia Downunder (ECCE Asia), 2013 IEEE
- [15]. S.V. Kulkarni, S.A. Khaparde; "Transformer Engineering: Design and Practice", Publisher: Marcel Dekker Inc, 2004
- [16]. Shahzad, U. K. (2017). Protection of distributed generation: challenges and solutions. Energy and Power Engineering, 9(10), 614.

## 6 DADOS BIOGRÁFICOS



ODIRLAN IARONKA nasceu em Casca-RS, Brasil em 1990. Graduiu-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) em 2014. Mestre pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) na área de Eletromagnetismo aplicado em Engenharia Elétrica no GRUCAD em 2019. Desde de 2014 trabalha na WEG - Unidade Transmissão e Distribuição no Setor de Cálculo de Transformadores de Potência. Desempenha também atividades de análise de falhas em equipamentos, pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias para transformadores e aplicação de ferramentas numéricas computacionais para análise e otimização do cálculo e projeto dielétrico, magnético e térmico de transformadores e reatores de potência.

(2) LUIZ FERNANDO DE OLIVEIRA nasceu em Blumenau-SC, Brasil em 1988. Graduiu-se em Engenharia Elétrica na Universidade Regional de Blumenau (FURB) em 2013 e é Mestre em Engenharia Elétrica na UFSC (GRUCAD) desde 2018. Trabalha na WEG T&D desde 2007, onde passou pelas áreas de produção e técnica, entre 2009 e 2013 trabalhou diretamente com cálculo e dimensionamento de transformadores e desde 2013 exerce atividades no departamento de pesquisa e desenvolvimento com foco em pesquisa tecnológica, simulações numéricas e desenvolvimento de softwares para engenharia.

(3) GUILHERME MASCHIO nasceu em Sananduva-RS, Brasil em 1997. Graduiu-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) em 2019. Mestrando pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) na área de Eletromagnetismo aplicado em Engenharia Elétrica no GRUCAD. Desde de 2019 trabalha na WEG - Unidade Transmissão e Distribuição no Setor PDI e Produtos Digitais de Transformadores de Potência. Exerce atividades de pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias para transformadores e trabalha na aplicação de ferramentas numéricas computacionais para análise e otimização do cálculo e projeto dielétrico, magnético e térmico de transformadores, reatores de potência, transformadores seco e chaves seccionadoras.

(4) JOÃO PAULO VIEIRA nasceu em Blumenau-SC em 1997. Graduiu-se em Engenharia Elétrica na Universidade Regional de Blumenau (FURB) em 2020 e cursa Mestrado em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC - GRUCAD). Trabalha na WEG T&D desde 2016, onde iniciou como calculista de transformadores a seco, passando então para cálculo de transformadores imersos em óleo. Atualmente executa atividades no departamento de pesquisa, desenvolvimento com foco em simulações numéricas, software para engenharia e desenvolvimentos de novos produtos.