



## **GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSÃO - GSE**

### **FERRORRESSONÂNCIA EM SUBESTAÇÕES DE PARQUES EÓLICOS**

**LUIZ GUSTAVO PIEVE NUNES(1); ESTÁCIO TAVARES WANDERLEY NETO(1)  
UNIFEI(1)**

#### **RESUMO**

Os fenômenos de ferorrressonância são caracterizados por sistemas com baixos valores de resistência, onde, ao operar em uma determinada faixa de frequência, a capacitância dos cabos aos quais os transformadores de potencial são conectados entram em série com a parte indutiva dos TPs. Isto origina um efeito de sobretensão que pode ser extremamente nocivo tanto ao sistema como ao transformador. Entretanto, como a parte indutiva dos transformadores não é linear, modelar este fenômeno se torna extremamente oneroso. Assim, para o estudo deste fenômeno, faz – se necessária a apresentação de ferramentas computacionais que auxiliam na análise dos transitórios elétricos.

#### **PALAVRAS-CHAVE**

#### **1.0 INTRODUÇÃO**

O fenômeno de ferorrressonância apresenta um campo muito vasto para estudo e, apesar de ser um tema relativamente antigo, ainda não há soluções que possam ser seguidas a partir de uma simples metodologia.

As causas deste fenômeno são inúmeras, podendo ocorrer desde a abertura monopolar de disjuntores até a atuação de inversores de frequência presentes, muito comumente, em subestações de parques eólicos. Além destas causas, pode ocorrer a ferorrressonância também devido à elos fusíveis, os quais, quando operam, formam um circuito em série entre capacitância dos cabos e o material ferromagnético dos transformadores. Também será usada a aproximação linear discreta em [1] com a finalidade de se encontrar uma

Ainda, este fenômeno não é particular de sistemas de alta tensão, podendo ocorrer também nas redes de distribuição, o que aumenta ainda mais o número de possibilidades para a caracterização de um circuito ferorrressonante. [2]

Entretanto, para fins de estudo, o fenômeno descrito nos transformadores de potencial (TP) aqui serão observados a partir da conexão em estrela aterrada tanto no primário quanto no secundário do transformador de potência presente na subestação. Isto porque, como é conhecido, há a circulação da corrente de sequência zero a partir da conexão do neutro de ambas as partes do trafo, o que origina distorções de terceiro harmônico na rede, favorecendo, assim, o surgimento do fenômeno de ferorrressonância nos equipamentos destinados à medição dos valores de tensão. [3]

Além disso, existem algumas soluções práticas para se contornar este tipo de fenômeno. Como exemplo, é muito comum conectar um resistor ao TP, de maneira que esta resistência atue como um atenuador de sobretensões, diminuindo, assim, o valor da amplitude da tensão nos seus terminais. Entretanto, devido ao fato de se conectar uma resistência ao transformador de potencial, o equipamento passa a ter um tamanho exagerado, o que compromete as acomodações dentro de uma subestação.

Neste sentido, é importante mencionar que o fenômeno descrito aqui ocorre de maneira muito rápida, o que dificulta ainda mais a implementação de soluções práticas para mitigá-lo ou mesmo diminuir seus impactos no sistema e nos equipamentos.

Também é importante mencionar que o mais importante nem sempre é se determinar a magnitude dos valores de sobretensões causados pelo fenômeno descrito. Entretanto, é de muito maior importância determinar se o evento ocorrerá ou não, o que torna necessária a análise prévia de como o sistema será configurado.

#### **2.0 DISCUSSÃO TEÓRICA**

A modelagem de fenômenos envolvendo transformadores apresenta uma grande dificuldade no momento de definir as variáveis em função do tempo e da frequência devido à não-linearidade dos elementos presentes no sistema a ser modelado. Sendo assim, a ferorrressonância apresenta grande complexidade na solução das equações geradas a partir do efeito transitório das sobretensões ocasionadas no sistema elétrico.

Desta forma, pode-se afirmar que a ferorrressonância é uma oscilação não-linear que tem sido observada em sistemas elétricos de potência [4].

Também são objeto de estudo, maneiras de solucionar as equações diferenciais não-lineares que descrevem o comportamento das reatâncias indutivas presentes no circuito. Desta forma, é possível perceber que, como a indutância varia com a corrente, não é possível obter uma solução analítica para as equações obtidas, sendo necessário lançar mão de métodos numéricos para a solução das equações matemáticas.

Alguns desses métodos são utilizados em processamentos presentes em softwares de simulação, como o *ATPDraw*. É importante mencionar que os métodos possuem erros associados, entretanto a solução encontrada por cada um deles fornece, de maneira consistente e aceitável, soluções que permitem analisar os efeitos das não-linearidades dos circuitos ferromagnéticos nos sistemas em que são instalados.

Alguns métodos existentes na literatura para a determinação das soluções periódicas de circuitos não-lineares são:

- Método da força bruta;
- Método da linearização por partes;
- O princípio do balanço de harmônicos;
- Método de Garlekin;

Como é conhecido, as soluções das equações diferenciais que regem determinados sistemas são compostas por uma solução particular e uma solução homogênea, o que, fisicamente, significa que há a superposição de uma solução natural do sistema, descrita pela solução da equação homogênea, e a solução da resposta forçada do sistema, a qual é representada pela solução da equação particular do sistema. [3]

Para se encontrar as respostas periódicas dos circuitos não-lineares são normalmente utilizados os métodos

- Tentativa e erro;
- Newton-Raphson;
- Otimização.

Como mencionado anteriormente, existem mais métodos que permitem determinar soluções aproximadas com considerável exatidão em relação ao que acontece fisicamente no sistema.

Estes métodos permitem projetar compensadores que atenuam os impactos das sobretensões, fazendo com que haja um amortecimento considerável na amplitude da tensão [5].

Desta maneira, os softwares existentes se utilizam dos métodos descritos acima para determinarem os parâmetros dos TPs em estudo, bem como determinar a tensão saída destes mesmos equipamentos, permitindo um melhor monitoramento do que ocorre no sistema.

### 3.0 COMPOSIÇÃO BÁSICA DE UMA SUBESTAÇÃO TÍPICA DE UMA CENTRAL EÓLICA

Para que se possa ter uma ideia melhor do problema a ser resolvido, a Figura 2.1 mostra um desenho em corte de uma subestação típica de um sistema de geração de um parque eólico [6].

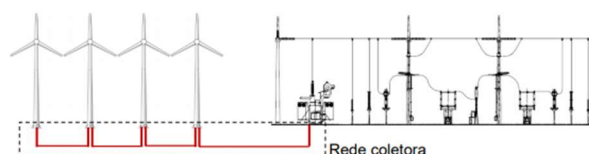


Figura 2.1 – Subestação presente em uma central eólica.

Este tipo de subestação é conhecido como subestação coletora, a qual tem por finalidade conectar o sistema de geração ao sistema de distribuição em que a energia deve ser injetada.

Na Figura 2.1 é possível observar que há alguns equipamentos comuns à mais subestações. Entretanto, é possível perceber que, na entrada do circuito, já há a presença do transformador de potencial, o qual é seguido por um para-raio e, logo após o para-raio, o transformador de corrente.

Seguindo o diagrama, é conectado um transformador de corrente (TC) e, após este dispositivo, aparece o primeiro bay ou vão da subestação, onde há a conexão entre a chave seccionadora, o disjuntor e a próxima chave seccionadora. E então segue para outro TC, bem como outro TP e mais um para-raio.

### 4.0 COMPOSIÇÃO BÁSICA DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO EÓLICO

A priori, existem algumas configurações disponíveis para a conexão dos equipamentos presentes em um aerogerador. Entretanto, de maneira simplificada e mais conveniente para o presente trabalho, será apresentada aqui uma configuração que explicita de maneira mais direta como são instalados os elementos de eletrônica de potência nestes dispositivos a fim de mostrar como o impacto das distorções geradas pelos inversores podem afetar diretamente o sistema de medição presente na subestação.

Desta forma, a Figura 4.1 [7] mostra um diagrama esquemático de como é a topologia de um sistema eólico a conversores plenos.

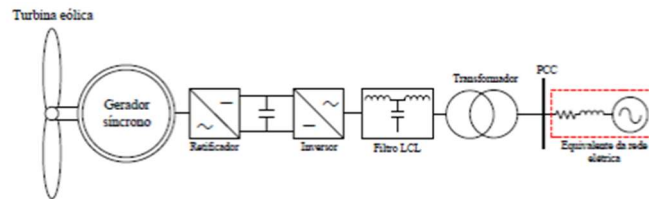


Figura 4.1 - Aerogerador com sistema de conversores plenos.

De acordo com a Figura 4.1, a presença de conversores AC/DC e dos inversores CC/AC se dão pela dificuldade da conexão dos sistemas de geração com o sistema devido à frequência de geração oriunda dos aerogeradores.

Entretanto, cada vez que o sinal de tensão passa por uma cadeia de conversores e inversores, na saída deste último equipamento, não é possível gerar uma onda perfeitamente senoidal, o que provoca a incidência de harmônicos na rede.

De forma mais direta, os harmônicos que mais afetam o funcionamento dos equipamentos se dão pelos harmônicos de terceira ordem, uma vez que estes representam correntes e tensões de sequência zero.

Sendo assim, é importante levar em consideração os efeitos da distorção harmônica gerada a fim de se dimensionar corretamente os sistemas de medição e proteção presentes na subestação.

## 5.0 CONTRIBUIÇÃO DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS PARA A FERRORESSONÂNCIA

Os efeitos das distorções harmônicas na rede podem ser prejudiciais em várias escalas. Para o caso dos transformadores de potencial, essas distorções comprometem a medição nos valores de tensão.

As consequências das distorções harmônicas na rede podem gerar transitórios com um espectro de frequências muito grande, o que pode favorecer a existência de uma faixa de frequência dentro do espectro harmônico que provoque o surgimento do fenômeno em estudo, provocando sobretensões de longa duração e, assim, comprometendo o funcionamento do equipamento.

Muitos trabalhos buscam maneiras de mitigar o surgimento das tensões harmônicas no sistema, entretanto, com o aumento da tecnologia e com a instalação de cargas não-lineares na rede, torna-se um problema extremamente complexo criar soluções para amenizar os efeitos dos harmônicos.

Afim de ilustrar os motivos do surgimento das tensões harmônicas na rede, pode-se dizer que existem, basicamente, três formas associadas à geração de distorções nos sinais de tensão geradas pelos inversores de frequência [7]

- Chaveamento do PWM;
- “Tempo morto” entre as comutações das chaves e;
- Distorções existentes previamente no barramento de conexão.

## 6.0 PARAMETRIZAÇÃO DO PROBLEMA PARA A SIMULAÇÃO NO ATPDRAW

Existem várias maneiras de modelar os fenômenos de ferroressonância em transformadores no *ATPDraw*. Para esta seção, o transformador de potencial representado será modelado a partir do circuito equivalente de um transformador monofásico, o qual tem por finalidade mostrar qual o comportamento dos transitórios no equipamento, bem como qual os impactos que o dispositivo deve sofrer operando com os níveis de harmônicos mencionados. [8].

Em relação aos parâmetros fornecidos para o TP da simulação, foram fornecidos dados comuns a transformadores de potencial presentes em subestações de parques eólicos.

Desta forma, os dados utilizados na simulação foram os seguintes [9]:

- Isolamento a seco;
- Potência de 2100 kVA;
- Tensão primária entre fases de 36 kV;
- Tensão secundária entre a fase e a terra de 115 V;

Também, para a simulação, foi utilizada a decomposição harmônica de uma fonte que representa a geração a partir do equivalente de Thévenin, uma vez que não se faz necessário para o escopo do estudo aqui proposto.

A intenção da decomposição do espectro de harmônicos é a de analisar a quantidade da presença de harmônicos de 3 harmônico, uma vez que este componente é um dos responsáveis pela presença de tensões de sequência zero no sistema.

É conhecido que, além dos harmônicos de Terceira ordem, há também a contribuição dos harmônicos múltiplos de três, os quais também compõem as tensões de sequência zero. Entretanto, as outras frequências aparecem em muito menor quantidade, podendo ser desprezadas no resultado final.

Assim, a Figura 6.1 mostra a decomposição por amostras de cada harmônico utilizados na fonte.

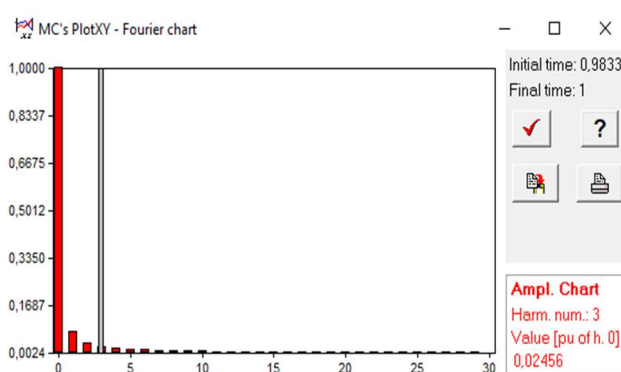


Figura 6.1 – Valores de tensão decopostos pela transformada de Fourier.

A partir destes dados, foi possível criar o gráfico de decomposição por amostra de cada valor de tensão relacionada ao seu respectivo harmônico, os quais forneceram os dados que foram utilizados no modelo de fonte HFS (*Harmonic Frequency Scan*), a qual permite ao usuário colocar os valores das tensões harmônicas como *input* e, assim, fornecem um panorama do comportamento do circuito a partir da excitação com harmônicos presentes na simulação.

É importante ainda frisar que o valor mais alto na Figura 6.1 representa a componente DC da operação, ou seja, a amplitude da tensão de sequência zero presente no sistema.

Desta forma, para se implementar os dados necessários para os equipamentos da simulação, foram utilizados como valores base.

- Tensão da fonte: 36 kV;
- Capacitância do cabo: 1  $\mu\text{F}$ ;
- Resistência do enrolamento primário: 400  $\Omega$ ;
- Resistência do enrolamento secundário: 37,5  $\Omega$ ;
- Indutância do enrolamento primário: 2850 mH;
- Indutância do enrolamento secundário: 247 mH;
- Resistência de magnetização: 100 k $\Omega$ .

Para a indutância de magnetização, foi utilizada o método da linearização da característica do fluxo em função da corrente, de forma que os valores obtidos fossem implementados em um indutor cuja indutância varia com a corrente.

## 7.0 ESPECIFICAÇÕES PARA A SIMULAÇÃO DO TP NO ATPDRAW

É importante mencionar que o sistema descrito pela subestação da Figura 2.1 é uma representação genérica do que ocorre realmente em uma subestação de um parque eólico.

Assim, para a simulação, foi considerada a condição da Figura 7.1 a seguir, onde o circuito representa o circuito equivalente do TP em questão operando em uma situação onde possa ser observado qual é a tensão medida no secundário do transformador de potencial.

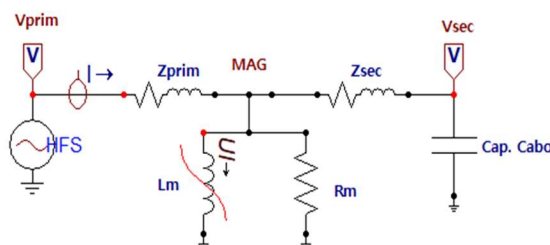


Figura 7.1 – Circuito equivalente do transformador de potencial.

Porém, de forma a representar o efeito indutivo variável da parte indutiva do transformador, é inserida uma indutância cujos valores seguem o método de linearização proposto anteriormente [4]. A proposta é realizar uma

aproximação dos valores de fluxo enlaçado pela corrente de magnetização, a fim de se explorar o comportamento do equipamento em uma situação onde o sistema atinge o espectro de frequência ferorrressonante.

Ainda, é importante mencionar que o software *ATPDraw* utiliza métodos numéricos para realizar o processo de solução das equações diferenciais geradas pela modelagem do circuito do transformador de potencial, o que, pode demandar muito tempo de simulação dependendo da relação do processo com o passo de integração.

De forma simplificada, a Figura 7.2 mostra a relação da curva que relaciona os efeitos do fluxo de campo magnético com a corrente de magnetização do núcleo.

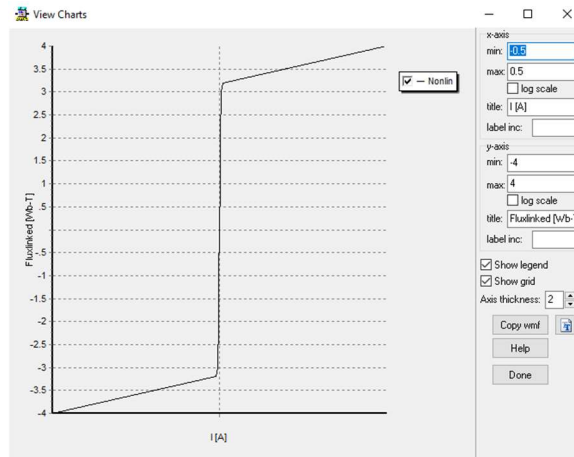


Figura 7.3 – Curva característica da relação entre fluxo enlaçado e a corrente de magnetização.

Analisando a curva característica é possível obter uma equação para esta curva. Porém, como o foco deste trabalho é analisar as respostas dadas pelo software estas equações não serão demonstradas aqui bem como não será proposta uma solução analítica das equações geradas.

Para fins de referência, a Figura 7.3 mostra a forma de onda da tensão na entrada do circuito, ou seja, a forma de onda representada pelo modelo de fonte utilizado.

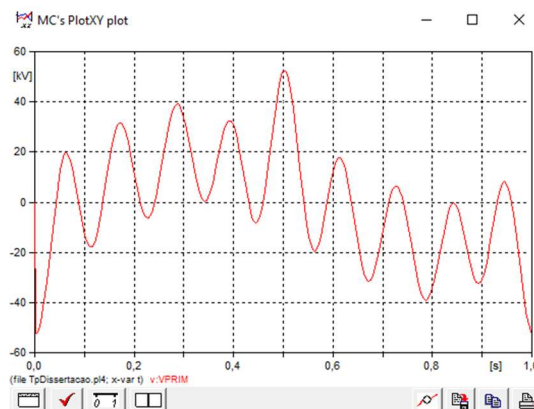


Figura 7.3 – Forma de onda da tensão na fonte devido aos harmônicos implementados.

É importante reforçar que o modelo da fonte *HFS* utilizado tem como finalidade representar o equivalente de tensão já distorcida com a ideia de se analisar o impacto destas distorções no secundário do TP e como isto afeta a medição dos valores de tensão do sistema.

Também vale mencionar que a ideia é analisar qual o comportamento dos efeitos dos harmônicos em um único dispositivo, o que permite algumas simplificações no circuito representativo do TP.

## 8.0 RESPOSTA NO DOMÍNIO DO TEMPO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Como mencionado na seção anterior, a linearização da curva característica que relaciona o fluxo enlaçado com a corrente de magnetização é linearizada de acordo com o modelo escolhido para simular os efeitos transitórios oriundos da circulação dos harmônicos pela rede.

Também, a solução das equações diferenciais representativas do modelo do circuito ferorrressonante fornecem respostas que possuem um determinado comportamento no tempo. Também como mencionado anteriormente, as

equações não serão mostradas aqui devido ao fato de não estarem no foco deste trabalho. Entretanto, essas equações têm suas respostas mostradas pelas formas de ondas obtidas nas saídas da simulação do sistema.

Nesta seção, as respostas analisadas serão as obtidas no domínio do tempo, de forma a ser possível observar em que instantes acontecem os valores de sobretensão na saída do TP e por quanto tempo esses valores duram em uma situação de operação corriqueira em uma subestação de um parque eólico.

A seguir, a forma de onda da Figura 8.1 mostra o comportamento da tensão no ramo magnetizante do TP.

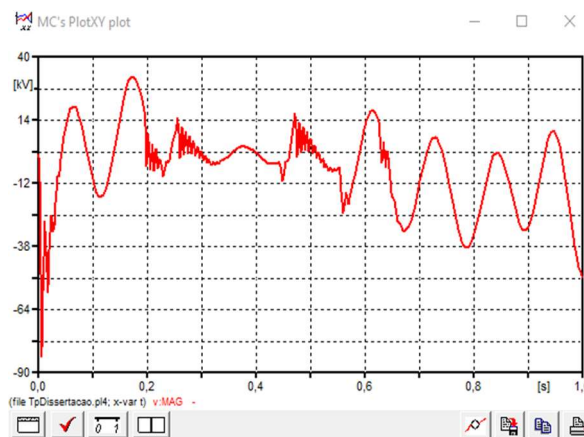


Figura 8.1 – Tensão do ramo magnetizante do TP.

A simulação mostra um caso em que o transformador de potencial resistisse os efeitos da sobretensão acima do fator de sobretensão determinado em projeto, até onde este dispositivo poderia encontrar intempéries envolvendo a sobretensão.

Entretanto, de acordo com a literatura, uma sobretensão de mais de 5 pu para as medições do TP já são suficientes para que o mesmo entre em colapso térmico e possa provocar um incêndio na subestação.

Na prática, o que ocorre em subestações é o uso de resistores previamente dimensionados, a fim de promover a atenuação dos sinais de sobretensão. Porém, ao recorrer a este artifício, compromete – se o espaço em que o TP é instalado.

Desta forma, torna – se necessária extremamente difícil mitigar ou até mesmo atenuar os sinais das sobretensões geradas nos TPs das subestações de parques eólicos.

## 9.0 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram mostrados como os efeitos de harmônicos podem induzir o TP a um fenômeno ferromressonante, ou seja, o equipamento atinge níveis de sobretensão que podem provocar o colapso térmico do mesmo, gerando problemas, não só para a subestação em que o equipamento se encontra instalado, mas, também, ao sistema a que esta subestação está inserida.

Na prática, isto ocorre por conta da dificuldade de se acoplar o sistema de geração eólico à rede de distribuição devido à frequência da rede e a frequência da geração, as quais apresentam uma diferença de valor considerável. Desta forma, é necessário que haja os conversores e os inversores nos aerogeradores para que se possa corrigir a frequência de geração para que a mesma possa ser compatível com a frequência da rede.

Entretanto, até mesmo os inversores possuem imperfeições na sua forma de operação, seja por conta dos distúrbios da rede ou por conta das suas características que, muitas vezes, são projetadas para condições obtidas em laboratório, mas que, em campo, passam a ser diferentes das que estes equipamentos foram ensaiados previamente para determinadas funções em campo.

Contudo, é imprescindível a geração pela energia dos ventos, uma vez que a matriz energética encontra cada vez mais necessidade de expansão devido à demanda por energia. Assim sendo, é importante encontrar maneiras de realizar as operações relacionadas à conversão de tensão e, principalmente, à conexão do sistema de geração com a rede de distribuição a fim de promover o melhor funcionamento dos equipamentos das subestações devido à presença dos harmônicos que ocasionam o fenômeno da ferromressonância.

## 10.0 REFERÊNCIAS

- [1] M. P. PEREIRA, "Ressonância e Ferromressonância em Sistemas Elétricos," Departamento de Planejamento de Transmissão, Furnas Centrais Elétricas, Furnas, MG.
- [2] J. A. M. N. L. B. M. E. N. K. J. R. C. H. W. D. N. C. DE JESUS, "INVESTIGAÇÃO E DIAGNÓSTICO DA QUEIMA DE PÁRA-RAIOS EM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO: UM CASO DE FERROMRESSONÂNCIA," V SBQEE - Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica, 17 a 20 Agosto 2003.

- [3] R. P. FRANÇA, *MODELO DE PROXIMIDADE AO LAÇO PRINCIPAL DE HISTERESE EXPANDIDO APLICADO AO ESTUDO DA FERRORESSONÂNCIA EM UM TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE POTÊNCIA*, Salvador, Bahia, 2016.
- [4] A. B. DE SOUZA, *MÉTODOS COMPUTACIONAIS DA RESPOSTA DE CIRCUITOS NÃO LINEARES*, Campina Grande, Paraíba: Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, 1995.
- [5] E. P. MACHADO, *Uma Técnica para Compensação Dinâmica de Transformadores de Potencial Capacitivos*, Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, 2009.
- [6] G. P. Secco, *Procedimento para estudo de coordenação das proteções elétricas em Centrais de Geração Eólica*, São Paulo, 2015.
- [7] A. d. O. J. C. Reis, "Uma análise dos fatores de influência na geração de distorções harmônicas em unidades eólicas," 2015.
- [8] L. B. VIENA, *MODELAGEM DE TRANSFORMADORES NO PROGRAMA ATP PARA O ESTUDO DO FENÔMENO DA FERRORESSONÂNCIA*, Salvador: Universidade Federal da Bahia - UFBA, 2010.
- [9] J. C. L. RIBAS, *MODELAGEM DO FENÔMENO DA FERRORESSONÂNCIA CONSIDERANDO HISTERESE: ANÁLISE EM SUBESTAÇÃO DE ENERGIA*, Curitiba: Universidade Federal do Paraná - UFPR, 2012.

#### DADOS BIOGRÁFICOS



Luiz Gustavo Pieve Nunes, natural de Jacareí, São Paulo. É engenheiro eletricitista, formado pela Universidade Federal de Itajubá. Mestrando em Engenharia Elétrica com ênfase em sistemas de Alta Tensão. Atuou como professor voluntário no Curso Assistencial Amigos de Itajubá e como diretor geral da mesma instituição. Atuou como professor de matérias técnicas, como Circuitos Elétricos e Acionamentos Elétricos no Colégio Técnico de Itajubá. Atualmente, empreende na área de ensino a distância para alunos de graduação em engenharia.

(2)	ESTÁCIO	TAVARES	WANDERLEY	NETO
-----	---------	---------	-----------	------

Estácio Tavares Wanderley Neto graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal da Paraíba em 2001, concluindo o Mestrado e Doutorado na Área de Sistemas Elétricos de Potência pela Universidade Federal de Campina Grande em 2003 e 2007, respectivamente. Atualmente é professor Associado da Universidade Federal de Itajubá, atuando junto ao Laboratório de Alta Tensão e lecionando as disciplinas Eletricidade Básica, Técnicas de Alta Tensão, Materiais Elétricos e Coordenação de Isolamento. Em suas atividades profissionais tem atuado em projetos de Pesquisa & Desenvolvimento com diversas empresas do setor elétrico. É também conselheiro da Câmara Especializada em Engenharia Elétrica do CREA-MG.