

Application of Artificial Neural Networks for Ferroresonance Detection in Inductive Voltage Transformers

Ricardo Sotero da Silva. Ricardo Caneloi dos Santos. Ahda Pionkoski Grilo Pavani

*Universidade Federal do ABC, Santo André, SP, Brasil
Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Aplicadas
(e-mail: ricardo.sotero@ufabc.edu.br).*

Abstract: Ferroresonance phenomenon is an oscillatory effect that can occur when non-linear inductances and equivalent capacitances are present in electrical power systems (EPS). Currently, this kind of occurrence is becoming frequent in electrical wind farms due to the large number of Inductive Voltage Transformers (IVTs) and underground cable circuits (with high equivalent capacitances) used in these types of substations. The accurate detection of the ferroresonant effect may prevent equipment damage as well as prevent revenue loss for utilities. In turn, this work presents a method based on Artificial Neural Networks (ANNs) for detecting the ferroresonant effect, considering only IVT secondary voltage samples. After many simulations and analyses, it was possible to observe that the proposed ANN-based method is able to detect different conditions of ferroresonance.

Resumo: O fenômeno ferorrressonante é um efeito não linear que pode ocorrer quando indutâncias não lineares e capacitâncias equivalentes estão presentes nos sistemas elétricos de potência (SEP). Atualmente, este tipo de ocorrência está se tornando frequente nas fazendas eólicas, devido ao grande número de Transformadores de Potencial Indutivos (TPIs) e circuitos com cabos subterrâneos (com alta capacitância equivalente) usados nesses tipos de subestações. A precisa detecção do efeito ferorrressonante pode evitar danos a equipamentos, bem como perda de receita para as concessionárias. Nesse sentido, este trabalho apresenta um método baseado em Redes Neurais Artificiais (RNAs) para detectar o efeito ferorrressonante, considerando apenas amostras da tensão secundária do TPI. Após um grande número de simulações e análises, foi possível observar que o método proposto baseado em RNAs é capaz de detectar diferentes condições de ferorrressonância.

Keywords: Ferroresonance; Ferroresonance Detection; Ferroresonant Effect; Inductive Voltage Transformer; Grading Capacitor; Artificial Neural Networks.

Palavras-chaves: Ferorrressonância; Detecção da Ferorrressonância; Efeito Ferorrressonante; Transformador de Potencial Indutivo; Capacitor de Equalização; Redes Neurais Artificiais.

1. INTRODUÇÃO

O Sistema Elétrica de Potência (SEP) está continuamente exposto a diversos tipos de distúrbios, que podem ser de baixa ou alta intensidade, permanente ou transitório, dependendo da causa do mesmo, ou seja, variações de carga, conexão ou desconexão de linhas de transmissão, faltas, descargas atmosféricas, entre outros. Em função da resposta em frequência de tais distúrbios, estes também podem ser classificados como de baixa frequência ou alta frequência. Dependendo da configuração da rede elétrica, em termos das capacitâncias equivalentes dos seus componentes (cabos, bancos de capacitores, etc.) e das características do núcleo do TPI (Transformador de Potencial Indutivo) utilizado, um evento particularmente importante e crítico, denominado ferorrressonância, pode ocorrer. Assim, neste contexto, o termo "Ferorrressonância" indica a ressonância provocada

pela interação entre os parâmetros da rede elétrica e o núcleo magnético do TPI. Tal fenômeno ocorre principalmente quando os TPIs operam com relés digitais, pois, diferentemente dos relés eletromecânicos, estes representam uma carga (*burden*) muito pequena, implicando uma dissipação da energia desprezível, não amortecendo as oscilações resultantes de um transitório. A precisa compreensão e análise desse fenômeno permite a proposição de soluções para tentar evitar sua ocorrência ou minimizar seus efeitos, evitando prejuízos e danos maiores aos equipamentos do SEP (HORAK, 2004).

Atualmente, o fenômeno da ferorrressonância está se tornando mais frequente, principalmente nas fazendas eólicas, uma vez que estas possuem inúmeros TPIs e circuitos subterrâneos (cabos com altas capacitâncias equivalentes), sendo um ambiente favorável para a ocorrência do referido fenômeno. Como resultado final, o efeito ferorrressonante

pode trazer danos a equipamentos e/ou perda de receita para o produtor ou concessionárias de energia (VALVERDE *et al.*, 2013) (KARAAGAC; MAHSEREDJIAN; CAI, 2016).

Considerando a importância de manter a continuidade da operação e evitar danos onerosos ou irreversíveis aos equipamentos do parque eólico, este artigo propõe um algoritmo baseado em Redes Neurais Artificiais (RNAs) para a detecção do fenômeno da ferorrressonância em TPIs. Por meio do método proposto será possível detectar tal fenômeno no início, possibilitando a tomada de ações oportunas para evitar a sua evolução, evitando custos com manutenção de equipamentos, penalidades e/ou perda de faturamento. Além disso, este trabalho discute como simulações e análises podem ser conduzidas para prevenir e minimizar os efeitos da ferorrressonância em TPIs utilizados nas instalações de parques eólicos.

2. CLASSIFICAÇÃO DOS MODOS DE FERORRESSONÂNCIA

Em geral, após eventos de comutação (faltas, ação da proteção, comandos de chaveamento, etc.), podem ocorrer sobretensões transitórias, conduzindo o SEP a uma condição de ferorrressonância. Devido a não linearidade desse fenômeno podem existir quatro tipos de respostas em estado estacionário, que são: fundamental, sub harmônico, quase periódico e caótico (FERRACCI, 1998).

2.1 Modo Fundamental

A ferorrressonância em frequência fundamental, conforme representado na figura 1, é o modo mais frequente e fácil de ser estudado, pois tem o mesmo período T do sistema de origem, podendo conter uma taxa de decrescimento harmônica de ordem ímpar. O espectro de frequência dos sinais é descontínuo e contém a frequência fundamental f_0 do sistema de potência (FERRACCI, 1998).

2.2 Modo Sub Harmônico

Estes sinais são periódicos com um período nT que é um múltiplo do período do sinal de origem (figura 2). Este estado é conhecido como sub harmônico n ou harmônico $1/n$. O conteúdo do espectro da frequência é descrito como f_0/n , onde f_0 é a frequência do sistema e n é um número inteiro (FERRACCI, 1998).

2.3 Modo Quase Periódico

Neste modo os sinais não são periódicos, conforme mostra a figura 3. O espectro é descontínuo e as frequências são encontradas na forma: nf_1+mf_2 , onde n e m são menores que f_1/f_2 (FERRACCI, 1998).

2.4 Modo Caótico

Conforme apresentado na figura 4, o espectro correspondente a esse modo caótico é contínuo, ou seja, não é cancelado para qualquer faixa de frequência (FERRACCI, 1998).

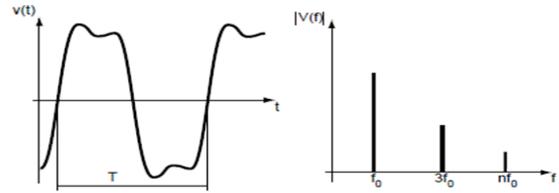


Figura 1: Modo Fundamental. Fonte: (FERRACCI, 1998)

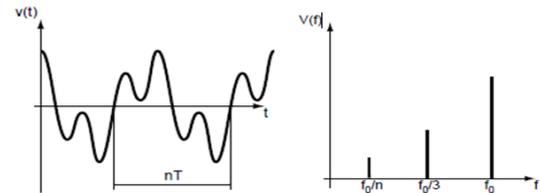


Figura 2: Modo Sub Harmônico. Fonte: (FERRACCI, 1998).

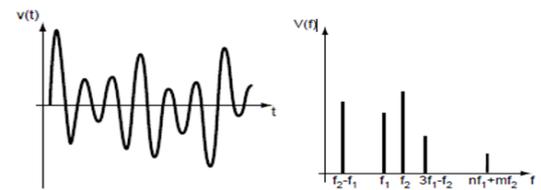


Figura 3: Modo Quase Periódico. Fonte: (FERRACCI, 1998)

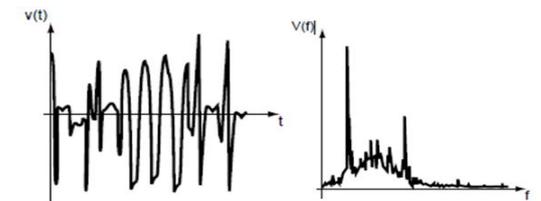


Figura 4: Modo Caótico. Fonte: (FERRACCI, 1998)

3. DISJUNTORES COM CAPACITORES DE EQUALIZAÇÃO (GRADING CAPACITORS)

Alguns disjuntores de alta tensão têm múltiplos contatos. Os capacitores de equalização de tensão (*Grading Capacitors*) são conectados em paralelo com os contatos do disjuntor, como mostrado na figura 5, para garantir uma distribuição uniforme de tensão durante o transitório de abertura (SUN *et al.*, 2017).

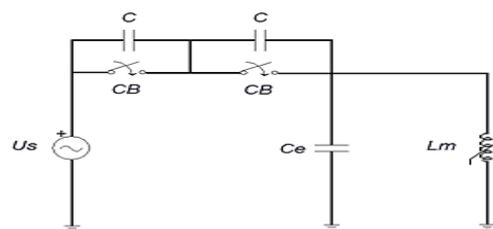


Figura 5: Diagrama unifilar do circuito. Fonte: próprio autor.

Disjuntores do tipo "grounding" podem sofrer interrupções monofásicas em barramentos onde estão conectadas as indutâncias não lineares, criando um circuito LC entre o sistema elétrico, a capacitância de equalização e o TPI. Esse arranjo resultante (favorável a ocorrência de ferrorressonância) somado ao transitório da interrupção pode desencadear o fenômeno da ferrorressonância.

4. PREVENÇÃO OU AMORTECIMENTO DA FERRORESSONÂNCIA

4.1 Prevenção

Algumas medidas práticas de prevenção podem ser tomadas para evitar o aparecimento da ferrorressonância, cujas sobretensões, sobrecorrentes e distorções harmônicas podem resultar em *estresse* dielétrico e térmico, ocasionando o envelhecimento prematuro da isolamento ou até mesmo levando a queima do equipamento.

Os métodos de prevenção mais utilizados são baseados nos seguintes princípios:

- Evitar operações de comutação e ou configurações susceptíveis à ferrorressonância. Isso implica na proibição de algumas configurações relativas a topologia da rede elétrica, além de restrições nas ações de dispositivos de chaveamento (principalmente os monoplares).
- Garantir que o sinal de origem das oscilações não seja suficiente para sustentar o fenômeno ferrorressonante. Essa técnica consiste em introduzir perdas que possam amortecer a ferrorressonância quando ela ocorrer.
- De acordo com a IEC 61869-102, as sobretensões de ferrorressonância (e ressonância) temporárias devem ser evitadas ou limitadas, por um dos meios já mencionados. Estas sobretensões não são consideradas como tensões base para especificações de projetos elétricos e supressores de surtos. Um dos supressores mais utilizados em redes de média e alta tensão são os para-raios, porém a norma de coordenação de isolamento não leva em consideração os níveis de sobretensão gerados pela ferrorressonância.

4.2 Amortecimento

Como medida para amortecer as oscilações provenientes de um evento ferrorressonante, resistores (fixos ou não) são conectados aos secundários dos TPIs. As equações 1 e 2 são utilizadas para especificar o valor desse resistor de amortecimento (R), conectado ao secundário do TPI conforme a figura 6. Os resistores fixos ao enrolamento secundário absorvem energia continuamente, assim que os TPIs são energizados (FERRACCI, 1998).

$$R = \frac{U_{Sec}^2}{kP_t - P_m} \quad (1)$$

$$P_R = \frac{U_{Sec}^2}{R} \quad (2)$$

Onde:

U_{Sec} : Tensão secundária (V)

k : Fator entre 0,25 e 1 conforme IEC 61869-3

P_t : Potência térmica do transformador (VA)

P_m : Potência requerida pelo relé digital (ou medidor) (VA)

R : Resistência (Ohms)

P_R : Potência do resistor (W)

Para o caso de TPIs com dois enrolamentos secundários, sendo um de medição e outro de proteção (residual), é recomendável conectar o resistor de amortecimento no enrolamento residual dos TPIs ligados em delta aberto, como mostra a figura 6. A grande vantagem deste tipo de ligação é que o resistor de amortecimento não interfere na exatidão e não introduz perdas ao núcleo magnético em condições normais de operação (balanceadas). Entretanto, em condições de desbalanço de tensão o resistor é solicitado afim de mitigar o fenômeno (IEC:2014, 2014). As equações 3 e 4 são utilizadas para especificar o valor do resistor de amortecimento (R), neste caso.

$$R = \frac{3\sqrt{3}U_{Sec}^2}{P_e} \quad (3)$$

$$P_R = \frac{(3U_{Sec})^2}{R} \quad (4)$$

Onde:

U_{Sec} : Tensão secundária (V)

P_e : Potência térmica do transformador (VA), sem exceder os limites térmicos do equipamento e os requisitos de exatidão.

R : Resistência (Ohms)

P_R : Potência do resistor (W)

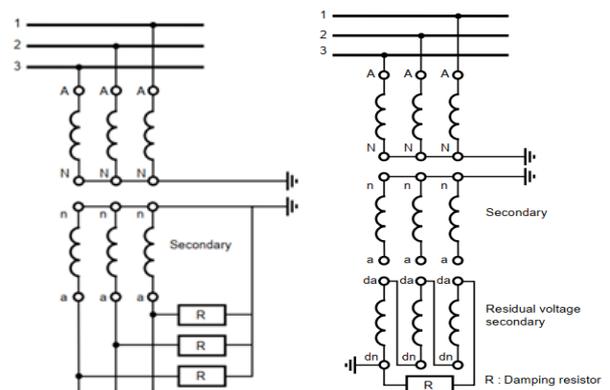


Figura 6: Resistor de amortecimento. Fonte: (FERRACCI, 1998)

5. PARQUE EÓLICO ADOTADO E MODELAGEM DO TPI

Nesta seção são apresentados e discutidos aspectos técnicos relevantes sobre a modelagem e testes do TPI adotado neste trabalho, bem como sobre o cenário selecionado para a geração e análise do fenômeno da ferorrressonância.

5.1 Trecho do Parque Eólico Sob Estudo

A figura 7 representa um trecho do diagrama unifilar do circuito de 34,5kV, relativo a um parque eólico localizado na região nordeste do país, onde foram observadas ocorrências de ferorrressonância. As condições e os parâmetros relativos ao referido trecho dessa subestação foram utilizados para realizar as simulações, o desenvolvimento do algoritmo e os testes das RNAs para a detecção da ferorrressonância.

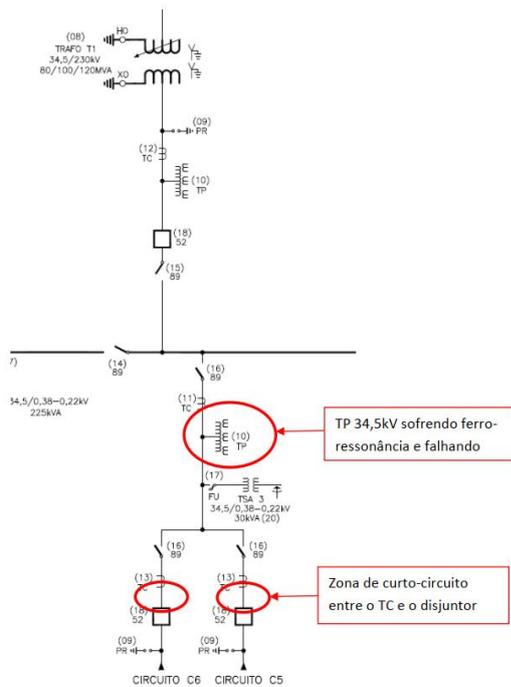


Figura 7: Trecho utilizado para o estudo da ferorrressonância. Fonte: próprio autor.

5.2 Características Elétricas do TPI

A figura 8 apresenta o circuito equivalente do TPI, que foi ensaiado em laboratório e modelado em ambiente computacional, visando gerar as condições ferorrressonantes. Os efeitos da saturação e histerese do núcleo magnético são modelados pela inserção de um indutor não linear e uma resistência em paralelo (ANG, 2010). As características elétricas do TPI modelado são apresentadas na tabela 1.

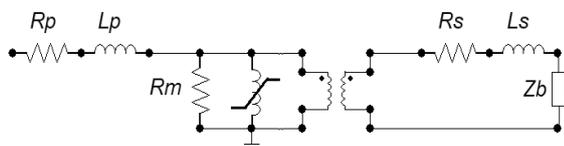


Figura 8: Modelo – TPI (ATPDraw). Fonte: próprio autor.

Tabela 1. Características elétricas do TPI

Modelo	R.N.	Exat.	Freq.	G.L (2)	Pth.	V.max
IPSDE	300/175:1	0,3P75	60Hz	1,2(Cont.) 1,5(30s)	1kVA	36,2kV

A curva de magnetização do TPI foi obtida com o secundário em vazio (ABNT NBR 6855, 2018), no laboratório do fabricante, sendo mostrada na figura 9.

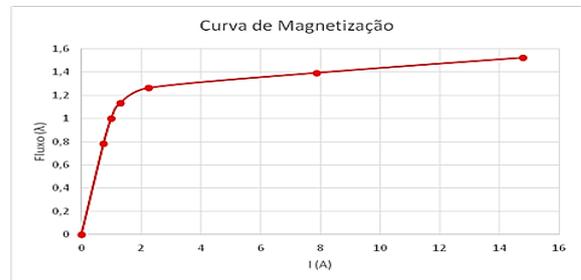


Figura 9: Curva de magnetização do TPI. Fonte: próprio autor.

5.3 Modelo Simplificado no ATPDraw

O modelo simplificado da figura 10 representa o trecho da SE do parque eólico (figura 7) onde foram observados eventos de ferorrressonância, provocando a explosão de alguns TPIs. Neste diagrama simplificado observa-se o equivalente de entrada da subestação, o disjuntor, as capacitâncias equivalentes e o TPI.

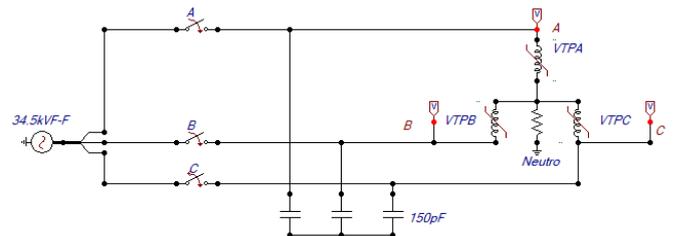


Figura 10: Circuito simplificado do trecho de 34,5 kV. Fonte: próprio autor.

A partir do circuito simplificado da figura 10, contendo o modelo do TPI utilizado em campo e ensaiado em laboratório, foram realizadas diversas simulações. Para cada simulação foram consideradas diferentes condições de operação, ou seja, diferentes instantes de comutação (mudança de estado dos disjuntores) e diferentes valores de capacitâncias equivalentes (representando diversos comprimentos dos cabos utilizados). Os resultados obtidos nas simulações foram comparados com algumas oscilografias armazenadas por relés digitais presentes na subestação em análise, onde o TPI está instalado, validando o modelo proposto, visto que os resultados são bastante similares. Uma vez validado o modelo do TPI (e do equivalente simplificado da subestação), os sinais gerados podem ser utilizados para o desenvolvimento de um método de detecção de ferorrressonância baseado em RNAs.

6. MÉTODO PARA DETECÇÃO DA FERRORESSONÂNCIA UTILIZANDO RNAs

O algoritmo proposto neste trabalho analisa continuamente uma janela de dados deslizante de um ciclo do sinal de tensão em frequência fundamental. A RNA utilizada para processar a janela de dados é do tipo MLP. Para a correta operação da RNA é essencial a redução da amplitude das amostras de tensão (presentes na janela de dados analisada) para o intervalo entre 0 e 1, visto que os neurônios de entrada da RNA trabalham nesta faixa.

A escolha da frequência de amostragem para a aquisição do sinal de tensão levou em consideração os seguintes critérios:

- Adoção de uma frequência de amostragem comumente utilizada por relés de proteção;
- O número de amostras deve ser alto o suficiente para obter uma representação confiável da forma de onda de tensão;
- O número de amostras deve ser suficientemente baixo para não sobrecarregar computacionalmente o esquema proposto.

Considerando os três requisitos supracitados, a frequência de amostragem escolhida para executar as simulações foi 10kHz (100 μ s), com uma janela deslizante de 166 amostras (16,7ms), se deslocando a cada 0,5ms, contemplando sempre um ciclo completo do sinal de tensão. A figura 11 ilustra a janela deslizante sobre o sinal de tensão em diferentes instantes de tempo.

A principal ideia deste projeto é que o esquema proposto analise continuamente as janelas de dados com amostras de tensão, executando em tempo real a seguinte classificação: a) saída da RNA = 0 se o evento de ferroressonância não é detectado; b) saída da RNA = 1 se o evento de ferroressonância é detectado.

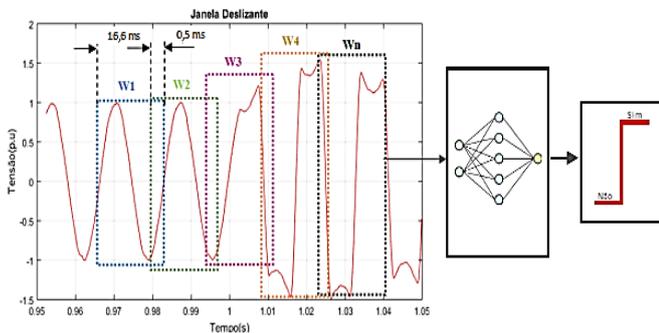


Figura 11: Esquema proposto para a detecção de ferroressonância.

Os valores de tensão utilizados durante o processo de treinamento da RNA são provenientes do secundário do TPI, sob diversas condições de operação, considerando situações de ferroressonância e não ferroressonância (condições normais de operação). Tais condições foram inicialmente geradas por meio de simulações dos possíveis eventos no sistema da figura 10, como, por exemplo: operações de comutação e alterações das capacitâncias. O treinamento da RNA foi desenvolvido no ambiente MATLAB utilizando

uma arquitetura MLP com duas camadas ocultas. O algoritmo de aprendizado *Scaled Conjugate Gradient (trainscg)* foi usado durante o processo de treinamento. Após várias simulações e análises, considerando sinais gerados pelo modelo simplificado mostrado na figura 10, foi observado que uma MLP com topologia 64-32-16-1 é capaz de desempenhar a função desejada com a precisão requerida para a aplicação.

7. TESTE E VERIFICAÇÃO DA RNA

Para a avaliação do desempenho do esquema proposto, baseado em RNA, foram utilizados casos diferentes daqueles utilizados no processo de treinamento. Por meio das figuras 12 a 15, observa-se que o esquema proposto respondeu como esperado, detectando precisamente as condições de ferroressonância. Ressalta-se que a RNA respondeu com "1" sempre que o fenômeno da ferroressonância ocorreu, atendendo às expectativas iniciais do projeto. Mesmo para sinais com algum nível de conteúdo harmônico e amplitude elevada, significativamente maior do que 1,0pu (situação possível na prática), a RNA respondeu com "0", reconhecendo que não se trata de um evento ferroressonante, como mostrado nas figuras analisadas. Tal comportamento possibilita, por exemplo, conectar um resistor de amortecimento ao TPI, quando o evento ferroressonante é detectado, atenuando os efeitos da ferroressonância no sistema elétrico e evitando danos ao TPI. Além disso, é possível armazenar e quantificar a informação de quais TPIs estão passando por tais eventos, permitindo que ações sejam tomadas pelos operadores para evitar consequências piores.

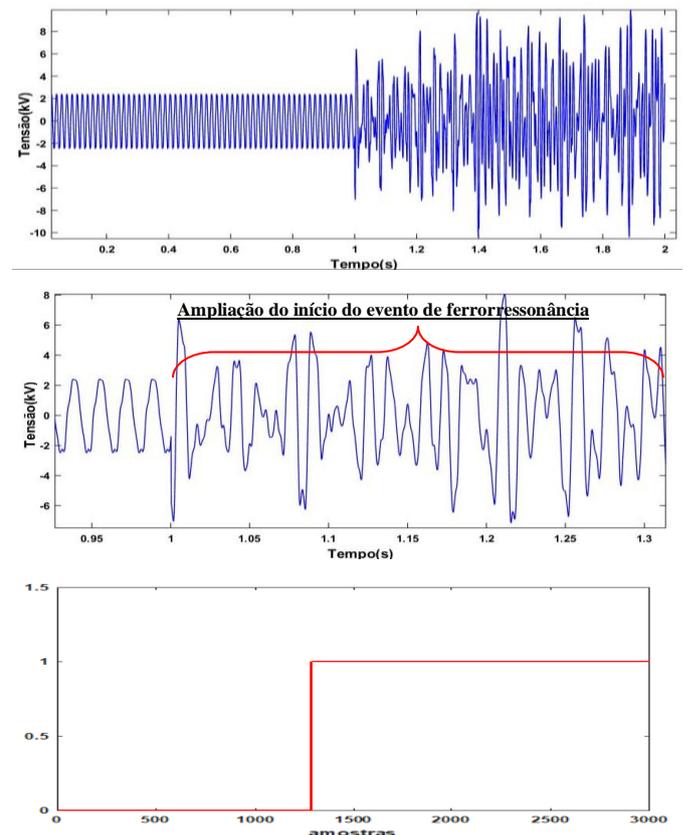


Figura 12. Respostas de detecção da RNA.

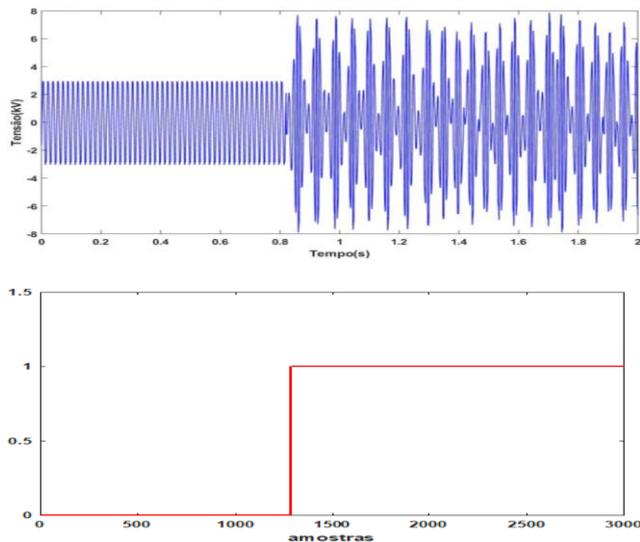


Figura 13. Respostas de detecção da RNA.

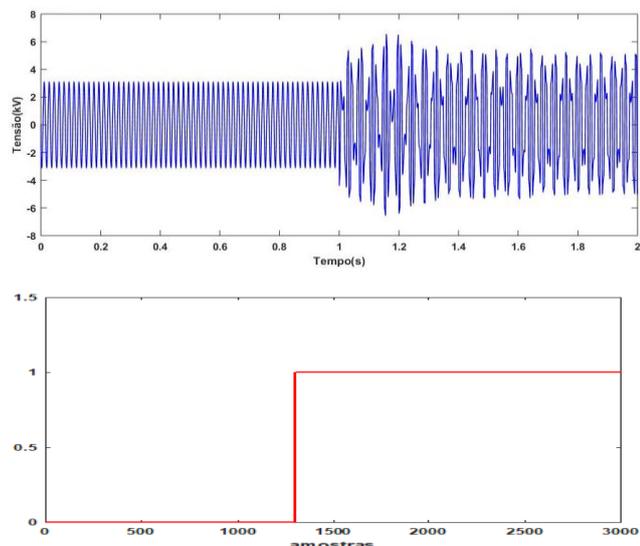


Figura 14. Respostas de detecção da RNA.

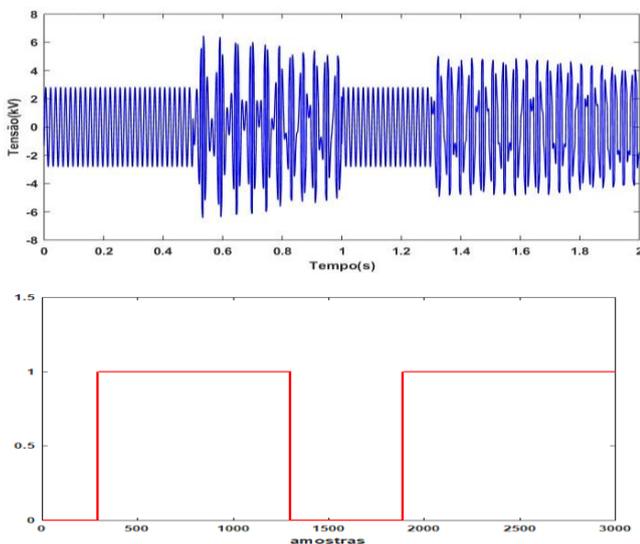


Figura 15. Respostas de detecção da RNA.

6. CONCLUSÕES

As causas do fenômeno da ferroressonância, bem como seus efeitos, tem sido objeto de estudo de diversos especialistas. Contudo, por sua natureza complexa, sua prevenção ou detecção não é uma tarefa simples. Estes fenômenos têm causado grandes impactos em subestações, provocando constantes falhas em TPIs, comprometendo o faturamento da empresa e colocando em risco a proteção do sistema.

Neste sentido este trabalho propõe um método de detecção de ferroressonância através da utilização de RNA. Para o treinamento e testes da RNA foram utilizados sinais de tensão provenientes do secundário de um TPI real modelado no ATPDraw. Tais dados foram validados por meio de comparações com sinais de oscilografia armazenados em relés digitais.

Os resultados obtidos nos testes do esquema inteligente proposto indicam que a utilização de RNA para a detecção de ferroressonância pode ser considerado seguro e eficaz, sendo um caminho para mitigar os danos causados por este evento nos TPIs.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 6855. *Transformador de potencial indutivo - Requisitos e ensaios*. São Paulo: 2018. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=409740>>. , 2018. Acesso em: 10 de janeiro de 2020.

ANG, Swee Peng. *Ferroresonance Simulation Studies of Transmission Systems*. 2010. 271 f. The University of Manchester, 2010.

FERRACCI, Ph. Ferroresonance. *Cahier technique Schneider Electric*, n. 190, p. 1–28, 1998.

HORAK, John. A Review of Ferroresonance. *57th Annual Conference for Protective Relay Engineers*, p. 1–29, 2004.

IEC:2014, TR 61869-102 ©. *Instrument transformers - Part 102: Ferroresonance oscillations in substations with inductive voltage transformers*. [S.l.: s.n.], 2014. Disponível em: <<https://webstore.iec.ch/publication/6048>>. Acesso em: 10 de janeiro de 2020

KARAAGAC, U.; MAHSEREDJIAN, J.; CAI, L. Ferroresonance conditions in wind parks. *Electric Power Systems Research*, v. 138, p. 41–49, 2016.

SUN, Q. *et al*. Influence of grading capacitor of multiple-break circuit breaker on the extinction of secondary arc - A new method for reducing dead time. *IET Generation, Transmission and Distribution*, v. 11, n. 8, 2017.

VALVERDE, V *et al*. Verification tests of a novel ferroresonance detection technique Key words. v. 1, n. 11, p. 388–392, 2013.