

# Passive Islanding Detection Based on Angular Velocity Harmonic Patterns with Perceptron Neural Network

K. Maresch, G. Marchesan and L. F. Freitas-Gutierrez, *Member, IEEE*

**Abstract**—Traditional islanding detection methods present improper action when the power mismatch between generation and load in the islanded system is small. The minimum power mismatch for correct islanding detection defines the limits of a Non-Detection Zone. This paper proposes an efficient method for islanding detection based on angular velocity harmonic patterns. To accomplish this, the measured frequency is decomposed by a Fourier Transform and applied to a Perceptron artificial neural network for pattern classification. The performance of the proposed method is evaluated by tests on a modified IEEE 34 node test system. Several islanding and non-islanding cases were simulated. The proposed method achieved a performance of 88.16% in the classification of harmonic patterns with a small training set. Compared with the Under/Over frequency method, the proposed method represents a performance improvement of 17%.

**Index Terms**—Distributed generation, Harmonics, Islanding, Neural network, Passive method.

## I. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento tecnológico vem causando a reestruturação do setor elétrico por intermédio do emprego de unidades de Geração Distribuída (GD). As GDs apresentam diversos aspectos positivos para o sistema elétrico, relacionados principalmente com a diminuição das perdas na transmissão de energia elétrica. Entretanto, o sistema elétrico que, baseia-se em geral no fluxo de potência radial, deve ser adaptado para essa nova forma de geração de energia elétrica descentralizada.

Com a reestruturação do sistema elétrico tradicional em razão das GDs, existem riscos à operação dos esquemas de proteção. Exemplo disso é a descoordenação entre dispositivos de proteção e oilhamento não intencional. O ilhamento ocorre quando um trecho da rede elétrica é seccionado e uma parte dele permanece energizada por uma GD [1]. A detecção do ilhamento vem sendo discutida nos últimos anos e diversos (C1) métodos passivos e ativos foram propostos [2].

A não-deteção de ilhamento ou o desligamento tardio podem implicar em problemas relacionados à qualidade de energia, ao risco de vida das equipes de manutenção e à proteção do sistema elétrico suprido pela GD.

K. Maresch, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Centro de Excelência em Energia e Sistemas de Potência (CEESP), Laboratório de Análise e Proteção de Sistemas Elétricos (LAPES), Santa Maria, RS, Brasil (e-mail: kaynan\_maresch@hotmail.com).

G. Marchesan, UFSM, PPGEE, Departamento de Eletromecânica e Sistemas de Potência (DESP), CEESP, LAPES, Santa Maria, RS, Brasil (e-mail: guto.marchesan@gmail.com).

L. F. Freitas-Gutierrez, UFSM, DESP, CEESP, LAPES, Santa Maria, RS, Brasil (e-mail: luiz.gutierrez@ufsm.br).

Métodos passivos são aqueles que usam medidas elétricas locais para detectar o ilhamento. Na maior parte das vezes, os valores de tensão, corrente e frequência são medidos e tratados de formar a tornar possível a deteção do evento. Os métodos ativos são aqueles que inserem uma pequena perturbação no sistema elétrico através da GD [2] e [3]. Nos casos em que a GD está conectada a um grande sistema interligado, as perturbações apresentam pouco efeito. Entretanto, quando a GD se encontra em estado ilhado, seus parâmetros se desviam dos nominais e o ilhamento é identificado. Apesar de muitos métodos ativos conseguirem eliminar a zona de não-deteção (do inglês, *Non-Detection Zone* — NDZ) [4] e [5], eles inserem perturbações no sistema de distribuição que frequentemente comprometem a qualidade da energia elétrica. Exemplo disso, são os métodos que forçam um desvio da frequência, dentre eles o *Sandia Frequency Shift* (SFS), o *Slip-Mode Frequency Shift* (SMS) e o *Active Frequency Drift* (AFD) [6]. Além disso, esses métodos são geralmente adequados para a aplicação em unidades geradoras conectadas através de conversores estáticos. No entanto, geradores síncronos não apresentam essa capacidade, pois estão conectados diretamente ao sistema de distribuição.

Como demonstram trabalhos recentes [7], métodos passivos vêm sendo desenvolvidos no intuito de diminuir a NDZ. Porém, métodos passivos podem falhar quando o fluxo de potência no ponto de desconexão com o sistema é baixo e, muitas vezes, atuam indevidamente para curtos-circuitos e para chaveamento de grandes blocos de cargas. Assim, a deteção de ilhamento pode ser ainda considerada como um problema não resolvido.

Buscando reduzir esses problemas, novos métodos foram propostos. Em [8] é proposto um método baseado na classificação de padrões, em que um método de aprendizado de máquina não supervisionado para agrupar eventos de ilhamento e não-ilhamento é utilizado. Métodos baseados na análise das componentes simétricas da tensão e da corrente foram também publicados recentemente. Em [9] aplica-se a Transformada Wavelet ao sinal de tensão de sequência negativa e determina-se o desvio padrão associado a esse sinal. Se um limiar previamente estabelecido é extrapolado, identifica-se o ilhamento. Em [10] é definido um limiar entre o estado ilhado e o não-ilhado. Além disso, são usados os valores das taxas de variação das sequências positiva e negativa da tensão e da corrente. Já em [11], os valores da componente de sequência positiva da tensão e as componentes de sequência zero, positiva e negativa da corrente são utilizadas. Uma técnica baseada na resposta da forma de onda da tensão durante transitórios é

apresentada por [12] em que são usados o valor instantâneo máximo e a tensão de sequência positiva.

Em [13]-[15] são propostos métodos comparativos. Em [13] utiliza-se uma análise espectral para estabelecer uma diferença entre a forma de onda da tensão entre o modo ilhado e não-ilhado de uma GD. Em [14] emprega-se o deslocamento de fase da tensão de forma *feedforward* e em [15] são usadas medidas de impedância, pois a mesma varia do estado ilhado para o não-ilhado em referência ao Ponto Comum de Conexão (PCC). Em [16] é proposto um método baseado na taxa de variação de potência reativa no qual é estabelecido um valor máximo admissível baseado na potência nominal da GD. A estimação de um fasor síncrono é feita por [17], sendo coletado através de uma unidade de medição fasorial em tempo real (do inglês, *Phasor Measurement Unit* — PMU).

Existem ainda métodos baseados na análise de componentes harmônicas para a detecção de ilhamento em GDs. Exemplo disso é o uso das componentes harmônicas da impedância em [18] e [19]. Em [20] é utilizada a quinta harmônica da tensão e em [21] é proposto um método passivo que utiliza a modulação por largura de pulso (do inglês, *Pulse Width Modulation* — PWM) associada aos sinais harmônicos da tensão. Em [22] é proposto um método que combina o uso da distorção harmônica total com a variação de potência reativa.

Para os métodos baseados em componentes simétricas, como [10]-[13], são usados ajustes empíricos. Nesse sentido, um elevado grau de desequilíbrio nas fases do sistema elétrico de distribuição pode levar a atuações indevidas ou a não-identificação do ilhamento devido ao ajuste que pode não estar devidamente calibrado ao sistema elétrico. Os métodos apresentados em [14]-[16] são usados apenas para GDs conectadas por inversores em que métodos ativos podem ser empregados. Com foco nas taxas de variação da potência ativa e reativa, os métodos [17] e [18] podem falhar dependendo da potência máxima de curto-circuito. Sinais harmônicos de ordem superior ou inter-harmônicos manipulados nos métodos de detecção discutidos em [13]-[17] podem sofrer influência de cargas não-lineares e de cargas dependentes do tempo.

Este trabalho apresenta um novo método de detecção de ilhamento através da análise das componentes harmônicas da frequência (ou da velocidade de rotação) em geradores síncronos obtidas pela Transformada de Fourier. Para isso, são usadas a componente contínua e a primeira harmônica da frequência. Essa abordagem une a ideia do uso de uma medida de referência (componente contínua) com uma variação de conteúdo harmônico (primeira harmônica). Essas variáveis apresentam um comportamento característico para eventos de ilhamento e de não-ilhamento. Isso quer dizer, a componente contínua é capaz de informar a ocorrência de um evento fora do normal, enquanto a primeira harmônica classifica esse evento como uma situação ilhada ou não. A classificação desses grupos de sinais é feita através do uso de uma Rede Neural Artificial (RNA) Perceptron com a ponderação dos pesos sinápticos através de um processo de treinamento. Isso evita o uso de limiares, como realizado por alguns métodos clássicos, e uma classificação mais precisa dos sinais pode ser feita. O método de aprendizado da RNA pode ser contínuo. Isso quer dizer que,

quando em funcionamento, novos sinais são adquiridos e novas ponderações podem ser feitas. Em outras palavras, o método se adapta às situações que está exposto.

## II. EQUAÇÃO DA OSCILAÇÃO DA MÁQUINA SÍNCRONA

### A. Considerações Gerais

Os diferentes eventos que uma máquina síncrona está sujeita, como variações de carga e curtos-circuitos, conduzem a diferentes respostas. Como será demonstrado doravante, isso possibilita a classificação dos eventos de ilhamento e não-ilhamento em GDs.

A capacidade dinâmica de um sistema elétrico poder ou não voltar ao estado normal de operação após uma perturbação define o conceito de estabilidade. A estabilidade do sistema elétrico pode ser avaliada por meio de uma equação diferencial de segunda ordem conhecida como equação da oscilação de uma máquina síncrona (1) [23] e [24]. No presente trabalho, a análise da estabilidade demonstrará a capacidade de estabilização da GD após um evento de não-ilhamento, como um chaveamento de carga ou curto-circuito, ou a sua incapacidade de voltar ao estado normal de operação, como quando se encontra em estado ilhado.

$$M \frac{d^2\theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt} = P_m - P_e \quad (1)$$

Equação (1) representa os esforços elétricos e mecânicos que uma máquina síncrona está sujeita. O termo  $M$  é dado por (2), sendo dependente da constante de inércia  $H$ , da potência aparente  $S$  e da frequência elétrica  $f$ . O termo  $D$  é o amortecimento que depende das características do sistema elétrico onde a máquina está inserida. O ângulo  $\theta$  corresponde à posição angular do rotor da máquina. Além disso,  $P_m$  e  $P_e$  são as potências mecânica e elétrica respectivamente.

$$M = \frac{HS}{\pi f} \quad (2)$$

### B. Comportamento dos Geradores Durante o Ilhamento

Na ocorrência do ilhamento, a máquina síncrona está sujeita a um desbalanço de potência ( $\Delta P$ ), ou seja, ocorre uma mudança súbita entre as potências geradas e consumida. A derivada da solução de (1) para essa situação é dada por (3).

$$\Delta\omega = \frac{d\theta}{dt} = \frac{\Delta P}{D} \left(1 - e^{-\frac{\omega_s D}{2H}t}\right) \quad (3)$$

A resposta de frequência de um sistema elétrico ilhado possui características exponenciais como pode ser verificado na Fig. 1 na qual o comportamento da GD frente a diferentes patamares de desbalanço de potência é apresentado.

### C. Resposta a um Curto-Circuito

Para pequenas oscilações, a Equação (1) pode ser linearizada, considerando uma variação máxima de  $10^\circ$  na qual é válida a aproximação do seno para o próprio valor do ângulo e do cosseno para a unidade. Derivando a solução de (1) para  $\Delta\delta < 10^\circ$  obtém-se (4), onde  $\omega_s$  é a velocidade síncrona,  $\omega_n$  é a frequência natural definida por (5),  $\Delta\delta_0$  é a variação angular

aplicada,  $\omega_d$  é a frequência amortecida obtida por (6) e  $\zeta$  é o fator de amortecimento que respeita (7).

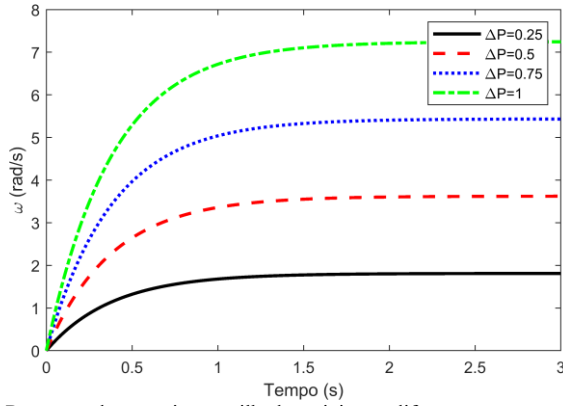


Fig. 1. Resposta de um sistema ilhado sujeito a diferentes patamares de desbalço de potência.

$$\Delta\omega = -\frac{\omega_n \Delta\delta_0}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{\zeta\omega_n t} \text{sen}(\omega_d t) \quad (4)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{P_{\text{máx}} \cos(\delta_0) \omega_s}{2H}} \quad (5)$$

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1-\zeta^2} \quad (6)$$

$$\zeta = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{\omega_s}{2H P_{\text{máx}} \cos(\delta_0)}} \quad (7)$$

Segundo as formulações apresentadas acima, observa-se que a frequência do gerador síncrono oscila em casos de pequenas perturbações. No contexto deste artigo, pode-se relacionar este comportamento como o ocorrido em casos de chaveamentos de cargas, gerações, bancos de compensação reativa e curtos-circuitos em sub-ramais distantes à GD ou com alta impedância de falta.

Durante um curto-circuito ocorre um aumento da impedância equivalente entre o sistema e o gerador ilhado. Isso provoca a redução da potência máxima que pode ser transmitida por parte da unidade geradora. Para essa classe de eventos, (1) não possui solução analítica. Dessa forma, a solução numérica foi obtida por meio da implementação do método de Runge-Kutta [25].

As respostas de um gerador síncrono para curtos-circuitos com potências máximas iguais a 1 p.u. e a 0 p.u. são ilustradas na Fig. 2. Comparando-as, nota-se que o comportamento da máquina varia de acordo com o nível de curto-circuito, demonstrando uma característica de um sinal senoidal amortecido para o comportamento exponencial.

O método proposto consiste na análise das componentes harmônicas que compõem o sinal da frequência de rotação do gerador síncrono, ilustrados na Fig. 1 e Fig. 2. Observa-se que, para curto-circuito e outros eventos que não anulam a potência transferida da GD para o sistema interligado, é possível estabelecer diferenças com ilhamentos (veja a Fig. 1 e Fig. 2).

A solução da equação de oscilação para uma pequena perturbação em que o gerador síncrono está conectado a um sistema elétrico interligado mostra que a frequência de oscilação é  $\omega_d$  e a amplitude de oscilação é  $\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}$ .

No entanto, em um sistema elétrico real existem não-linearidades, controladores e atuadores que modificam a oscilação da frequência do gerador síncrono. Por esse motivo, este trabalho propõe o uso de um método de reconhecimento de padrões baseado nas componentes senoidais que compõem o sinal de frequência.

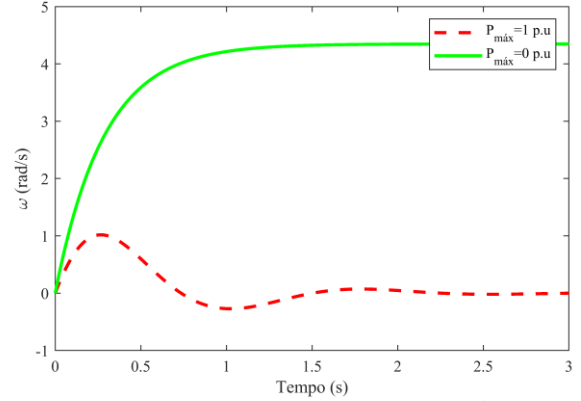


Fig. 2. Resposta a um curto-circuito com potência máxima de 1 e 0 p.u.

### III. TRANSFORMADA DE FOURIER

Como demonstrado anteriormente, a equação da oscilação de uma máquina síncrona possui comportamentos diferentes em determinados eventos. Casos de curtos-circuitos no percurso entre a GD e o sistema interligado com impedância de falta nula limitam a potência máxima transferida a zero, podendo tornar o comportamento da frequência muito parecido daquele dos casos de ilhamento. Para realizar a classificação desses sinais foi inicialmente aplicada a Transformada de Fourier [26].

A representação espectral de um sinal por uma série de Fourier ocorre através do somatório de componentes em uma base de funções ortogonais, ou seja, é a representação de um vetor em componentes de uma base vetorial de funções senoidais ou exponenciais.

Levando em conta que a análise é feita computacionalmente, a Transformada Discreta de Fourier trabalha com a restrição de que os sinais possuam duração infinita. Essa consideração implica que, se o sinal for periódico, a janela de tempo escolhida deve conter todos os dados que se repetem periodicamente no tempo. Se o sinal for aperiódico, considera-se que os valores que estão fora da janela de tempo são nulos.

Portanto, admite-se no cálculo, com conhecimento do erro implícito a essa aplicação, que o sinal utilizado se repete periodicamente na janela de tempo atribuída.

Com o emprego da Transformada Rápida de Fourier (do inglês, *Fast Fourier Transform* — FFT), a análise baseia-se em duas componentes harmônicas do sinal que se mostraram promissoras para a classificação dos eventos. As partes analisadas são referentes à componente contínua (0 Hz) e à frequência de oscilação do sistema. Como observado na seção anterior, perturbações no sistema interligado tendem a causar oscilações na frequência. A amplitude dessa oscilação é estimada pela primeira componente harmônica obtida pela FFT. Foi observado, através de sinais sujeitos a diferentes condições, que os valores da componente contínua e de oscilação tendiam a representar certos comportamentos característicos. Durante

cenários de ilhamentos, as componentes contínua e de oscilação aumentam consideravelmente. No caso antagônico, as componentes respeitam certa proporção limite entre elas.

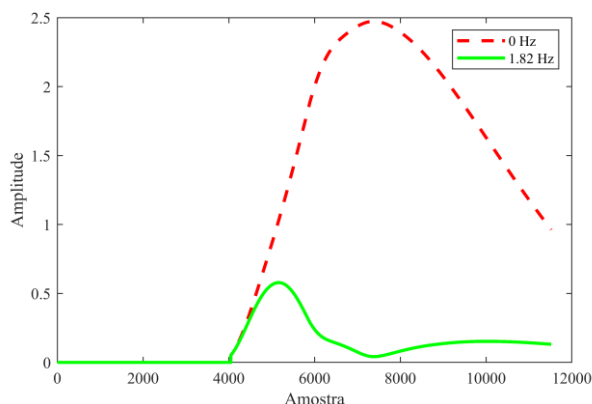


Fig. 3. Componente contínua e a primeira harmônica de um caso típico de ilhamento.

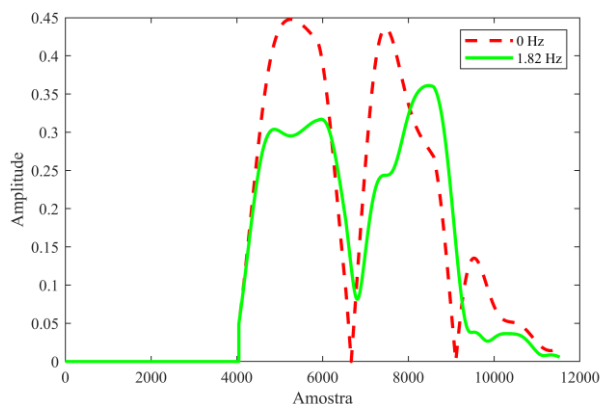


Fig. 4. Componente contínua e a primeira harmônica de um caso típico de não-ilhamento.

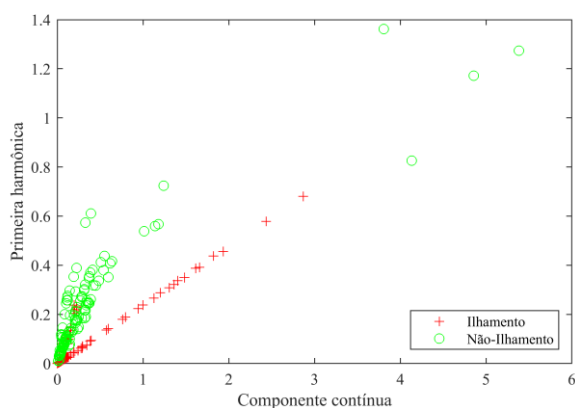


Fig. 5. Picos de primeira harmônica e componente contínua de todos os sinais simulados.

Em uma análise prévia do sistema teste constatou-se que a frequência de oscilação é aproximadamente igual a 1,82 Hz. Em razão disso, adotou-se uma janela deslizante FIFO (do inglês, *first-in-first-out*) de 0,53 segundos. Nota-se através da Fig. 3 (ilhamento) e da Fig. 4 (não-ilhamento) o comportamento típico das duas categorias de eventos sendo passíveis de discriminação.

Na Fig. 5 são apresentados os valores máximos da componente contínua e a primeira harmônica de todos os sinais simulados. São tomados os valores máximos de cada

componente harmônica dentro de uma janela de tempo de 0,53 segundos a partir do momento em que ocorre uma perturbação. É possível observar que os eventos se encontram linearmente separáveis na maioria dos casos simulados. Como é demonstrado na próxima seção, isso é uma informação importante para a tomada de decisão do tipo de RNA a ser utilizada neste trabalho.

#### IV. REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

Explicando de forma simplificada, Redes Neurais Artificiais (RNAs) são modelos matemáticos que imitam o funcionamento do sistema nervoso dos seres vivos, possuindo a capacidade de aprender com exemplos [27].

O elemento básico de um sistema nervoso é o neurônio, que tem o papel de conduzir impulsos por meio de sua membrana. Fazendo um paralelo entre o modelo biológico e o artificial, é possível dividir o neurônio em três partes: dendritos, corpo celular e axônios. Os dendritos capturam os estímulos oriundos de outros neurônios ou células sensitivas que são como as entradas ponderadas pelos seus respectivos pesos. Essa informação é utilizada como potência para uma função de ativação e equivalente ao corpo celular. Finalmente, a saída gerada é conduzida pelos axônios.

As RNAs podem apresentar diferentes arquiteturas e cada qual possui uma diferente aplicação. As características básicas de uma RNA são o número de entradas, o número de neurônios em cada camada, o número de camadas, o tipo de função de ativação do neurônio, o número de saídas e a topologia que pode ser direta (*feedforward*) ou recorrente (*feedback*). A topologia dita de que forma os neurônios se ligam para formar a rede. O fator que difere uma arquitetura da outra é que a rede direta possui um fluxo de informação unidirecional, enquanto na rede recorrente existe uma realimentação em pelo menos um ciclo.

Tendo em vista as características básicas discutidas acima, busca-se uma RNA que possua duas entradas (componente contínua e primeira harmônica) e uma saída (ilhamento ou não-ilhamento). Como a saída deve estar contida dentro de um intervalo com duas respostas possíveis, a função de ativação da saída deve ser alguma da classe das parcialmente diferenciáveis. Dentre essa classe de funções de ativação, as três principais são a Função Degrau (*Heavyside/Hard Limiter*) com saída contida entre o intervalo [0 1], a Função Degrau Bipolar (*Symmetric Hard Limiter*) e a Função Rampa Simétrica, as duas últimas com saída contida entre o intervalo [-1 1]. Por se tratar de um problema de reconhecimento de padrões, a literatura sugere o uso de uma RNA *feedforward* [28]-[30].

Depois de testados diferentes tipos de RNAs que atendiam as características citadas anteriormente, a RNA que se mostrou mais promissora foi a *Perceptron*. É um tipo de RNA capaz de classificar padrões quando as classes do problema a serem mapeadas são linearmente separáveis (veja a Fig. 5) [27].

Portanto, a RNA escolhida foi a *Perceptron*, de arquitetura direta com uma camada e um neurônio, contendo duas entradas e uma saída. Optou-se pelo uso da Função Degrau, sendo que a Função Degrau Bipolar apresentou resultados semelhantes e a Função Rampa Simétrica não apresentou resultados satisfatórios para esta aplicação. A função degrau unitário foi escolhida por uma questão de conveniência, atribuindo ao

estado não-ilhado o valor zero e o estado ilhado o valor um, ou seja, zero é considerado como a não atuação do método e um como atuação (*trip*).

#### A. Processo de Treinamento da RNA Perceptron

O processo de treinamento da RNA *Perceptron* deve ser feito de maneira supervisionada, ou seja, durante o treinamento a saída produzida pela RNA é comparada com a resposta verdadeira. Dessa forma, os pesos sinápticos podem ser ajustados. Essa metodologia é conhecida como Regra de Aprendizado de Hebb (8). O processo é repetido sequencialmente para todas amostras de treinamento até que a saída produzida pela RNA seja similar à saída desejada [27].

$$\begin{cases} w_i^{atual} = w_i^{anterior} + \mu(d^{(k)} - y)x_i^{(k)} \\ \theta_i^{atual} = \theta_i^{anterior} + \mu(d^{(k)} - y)(-1) \end{cases} \quad (8)$$

Em (8),  $w$  corresponde aos pesos sinápticos e  $\theta$  ao bias que podem ser entendidos como o coeficiente angular e linear de uma reta respectivamente. O coeficiente  $d$  é o valor desejado,  $y$  é o valor produzido pela *Perceptron* e  $x$  é um vetor que contém as amostras de treinamento. A velocidade do processo de treinamento é estabelecida pelo fator  $\mu$ , seu valor deve escolhido com cautela de forma a evitar instabilidades no problema e são geralmente usados valores entre zero e um.

#### B. Função Degrau

Como mencionado previamente, a função de ativação utilizada é a Função Degrau. Ela atua de forma a saturar a saída do neurônio, produzindo valores no intervalo fechado [0 1]. Quando a função de ativação produz a saída igual a zero, o evento é classificado como não-ilhamento e, quando produz a saída igual a um, o evento é classificado como ilhamento.

Sendo  $u$  o valor produzido pela multiplicação dos pesos sinápticos  $w$  pelo vetor de amostras  $x$ , a saída da Função Degrau é expressa por (9).

$$g(u) = \begin{cases} 1, & \text{se } u \geq 0 \\ 0, & \text{se } u < 0 \end{cases} \quad (9)$$

Dessa forma, a classificação busca satisfazer (10).

$$\begin{cases} \text{Ilhamento, se } g(u) = 1 \\ \text{Não Ilhamento, se } g(u) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

### V. SISTEMA ELÉTRICO TESTE

As simulações foram feitas utilizando o sistema elétrico teste IEEE 34 barras (veja a Fig. 6) modificado por [32], em que as modificações consistem no acréscimo de geradores síncronos (GD1 e GD2), assim como proposto por [31]. O banco de sinais consiste em um total de 228 sinais.

Do total de sinais, 144 pertencem ao grupo de não-ilhamento e 84 ao grupo de ilhamento. Mais detalhes sobre os eventos simulados são apresentados na Tabela I.

TABELA I  
BANCO DE SINAIS

| Tipo   | Caso | Evento             | Barra da perturbação               | GD <sup>1</sup> | Carga <sup>2</sup> | Resistência de falta   |
|--|------|--------------------|------------------------------------|-----------------|--------------------|--|
| Não-ilhamento  |      |                    |                                    |                 |                    |  |
| Curto-circuito   | 1    | Monofásico         | 802,830, 852 e 842                 | 2,5 e 1 MW      | 100% e 50%         | 0 Ω, 20 Ω e 60 Ω   |
|  | 2    | Bifásico           | 802,830, 852 e 842                 | 2,5 e 1 MW      | 100% e 50%         | 0 Ω, 20 Ω e 60 Ω   |
|  | 3    | Trifásico          | 802,830, 852 e 842                 | 2,5 e 1 MW      | 100% e 50%         | 0 Ω, 20 Ω e 60 Ω   |
| Abertura de elemento                                       | 4    | Abertura capacitor | 844                                | 2,5 e 1 MW      | 100% e 50%         | -  |
| Abertura de elemento                                       | 5    | Abertura GD2       | 854                                | 2,5 e 1 MW      | 100% e 50%         | -  |
| Ilhamento  |      |                    |                                    |                 |                    |  |
| Abertura de linhas que resultam em um estado ilhado da GD1 | 6    | Abertura tripolar  | 800-802, 830-854, 854-852, 834-842 | 2,5 e 1 MW      | 100% e 50%         | -  |
| Curtos-circuitos seguidos de ilhamento                     | 7    | Monofásico         | 802, 830, 852 e 842                | 2,5 e 1 MW      | 100% e 50%         | 0 Ω e 60 Ω   |
|  | 8    | Bifásico           | 802, 830, 852 e 842                | 2,5 e 1 MW      | 100% e 50%         | 0 Ω e 60 Ω   |
|  | 9    | Trifásico          | 802, 830, 852 e 842                | 2,5 e 1 MW      | 100% e 50%         | 0 Ω e 60 Ω   |
| Abertura de linhas que resultam em um estado ilhado da GD1 | 10   | Abertura tripolar  | 800-802                            | 1MW             | 50%                | Fluxo de potência <sup>3</sup><br>0,001; 0,01; 0,05;<br>0,015 0,2; 0,3; 0,4;<br>0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9<br>MW/MVAr |

<sup>1</sup>Potência da GD.

<sup>2</sup>Carregamento do sistema.

<sup>3</sup>Refere-se ao fluxo de potência que flui da ilha para o sistema. Foi simulado para excesso e déficit das potências ativas e reativas que constam na tabela. Esses são valores são usados para a construção da zona de não-deteção.

A GD1 é a máquina síncrona em que são realizadas as medidas elétricas e se deseja identificar o ilhamento. A GD2 é uma máquina idêntica a GD1, porém ela é apenas usada para criação de perturbações, com o intuito de observar o comportamento das variáveis elétricas na GD1. Ambas máquinas síncronas possuem potência nominal de 2,5 MW, fator de potência de 0,98 e tensão nominal de 2,4 kV.

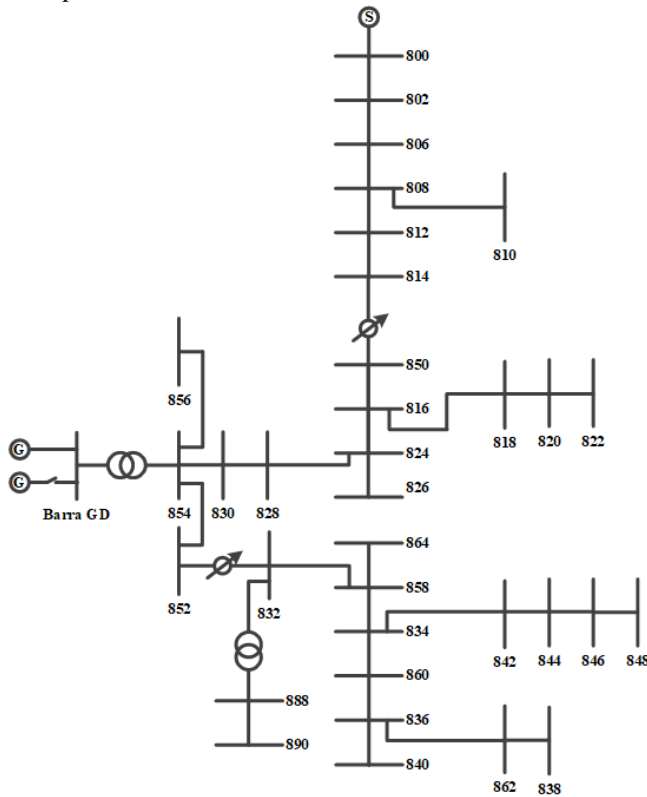


Fig. 6. Sistema elétrico teste IEEE 34 barras modificado [31].

## VI. DESENVOLVIMENTO DA RNA E SIMULAÇÃO

O método funciona em duas etapas: treinamento e execução. No treinamento, realizado offline, são ponderados os pesos sinápticos da RNA. Já na execução, novos sinais são testados. O método promove a classificação em grupos (ilhamento ou não-ilhamento), de acordo com a avaliação realizada pela RNA.

### A. Treinamento

Com a arquitetura e parâmetros estabelecidos para a RNA, o próximo passo é fornecer um conjunto de treinamento adequado. Assim, a RNA poderá encontrar a ponderação que melhor discrimine as classes. Para tanto, foram usados 21 sinais do grupo de ilhamento e 30 sinais do grupo de não-ilhamento, correspondendo a aproximadamente 24% e 20% do total de cada grupo respectivamente. Como os sinais são variantes no tempo, o valor  $x$  de (8) é uma matriz  $2 \times 11520$  em que as linhas correspondem à componente contínua (linha 1) e à primeira harmônica (linha 2).

As colunas correspondem ao número de amostras obtidas dentro do intervalo de tempo da simulação em que a simulação está ocorrendo.

O treinamento deve ser feito de forma cíclica, isto é, as ponderações dos pesos são efetuadas após a passagem de todo o sinal. Isso quer dizer que o cálculo dos pesos sinápticos é

realizado somente após a rede observar os 11520 pontos de cada amostra. O processo se repete até que todo conjunto de treinamento seja apresentado para a RNA.

Os sinais que formam o conjunto de treinamento do grupo de não-ilhamento foram escolhidos aleatoriamente dentre os eventos 1, 2 e 3 identificados na Tabela I. Após diversos testes realizados, foi observado que os sinais dos eventos de curtos-circuitos possuem um comportamento característico predominante. Os poucos que eventualmente possuem um comportamento diferente, não apresentam uma inferência considerável, pois são corrigidos pela média do conjunto.

Para o conjunto de treinamento do grupo de ilhamento, foram usados 3 sinais aleatórios do evento 7, um curto-circuito monofásico seguido de ilhamento, e o restante do grupo foi formado por sinais do evento 10 (Tabela I). A intenção do uso de sinais predominantemente do evento 10 ocorre em virtude desse evento ser o de maior dificuldade de distinção. Destaca-se que quanto menor o desbalanço de potência na ilha formada (isto é, a potência que flui entre o sistema e a futura ilha antes da abertura) menor será a perturbação na GD. Os sinais que não apresentam variações significativas de frequência não são identificados pelo método e formam a zona de não-deteção. Dessa forma, foram usados os sinais correspondentes a situações com geração excedente de potência ativa de 0,001; 0,01; 0,05; 0,015; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; e 0,9 MW e com geração excedente de potência reativa de 0,001; 0,01; 0,05; e 0,015 MVar.

### B. Execução

A execução ocorre em um processo, que pode ser entendido em duas partes. Primeiro é realizado o cálculo da DFT (componente contínua e da primeira harmônica). Esses valores são fornecidos à RNA que os pondera de acordo com os pesos sinápticos encontrados no processo de treinamento. Se o valor produzido pela RNA for  $g(u) = 1$  (10), entende-se que os sinais pertencem ao grupo de ilhamento. Portanto deve ser realizada a desconexão da GD. Para uma saída igual a  $g(u) = 0$  (10), entende-se que o evento não é um caso de não-ilhamento. Dessa forma, o método volta à etapa de aquisição de dados. O processo de execução é ilustrado no fluxograma da Fig. 7.

### C. Testes do Método Proposto

Com a RNA *Perceptron* treinada, ou seja, com os pesos sinápticos ponderados, todo o banco de sinais (228 sinais, apresentados pela Tabela I) foi analisado. Foram reconhecidos corretamente 88,16% de todos os sinais. Os níveis de erros e de acertos estão organizados na matriz de confusão vista na Tabela II.

Como se observa na Tabela II, a RNA implementada possui alta sensibilidade para a identificação de ilhamentos, porém classifica erroneamente alguns eventos do grupo de não-ilhamento. Essas falhas se devem à semelhança da frequência nos casos de curtos-circuitos trifásicos com impedância de falta zero com os casos de ilhamento conforme foi discutido na Seção II. Devido aos graves riscos da não-identificação do ilhamento, é preferível que métodos de detecção de ilhamento tenham alta sensibilidade, mesmo que isso cause algumas atuações indevidas. Nesse contexto, entende-se que o desligamento indevido de uma GD fornece muito menos

prejuízo ao sistema elétrico do que a não atuação do método frente a um caso real.

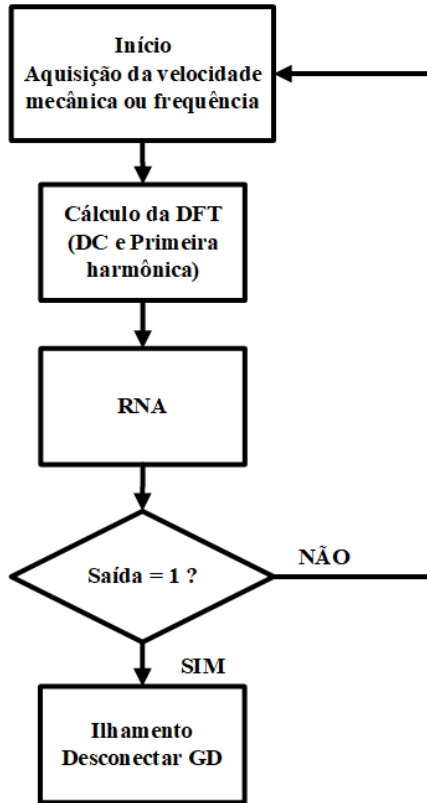


Fig. 7. Fluxograma do processo de execução.

TABELA II  
MATRIZ DE CONFUSÃO

|            |               | Resposta da RNA |               |
|------------|---------------|-----------------|---------------|
|            |               | Ilhamento       | Não-Ilhamento |
| Sinal real | Ilhamento     | 92,86%          | 7,14%         |
|            | Não-ilhamento | 15,97%          | 84,03%        |

\*Em verde são apresentados os verdadeiros positivos e negativos e em vermelho os falsos positivos e negativos.

Por fim, o método proposto foi comparado ao método de sub/sobre frequência, pois é um dos métodos mais comumente empregados. O método proposto apresentou um desempenho consideravelmente superior, acertando com uma superioridade de 17% em relação ao método de sub/sobre frequência. Os erros e acertos são mostrados na Tabela III. Os resultados apresentados na Tabela III foram obtidos através da modelagem do método de sub/sobre frequência no MATLAB. O método foi ajustado conforme as recomendações da norma IEEE 1547 com limite de atuação superior de 60,5 Hz e inferior de 59,3 Hz para uma temporização de 160 ms [1].

Como demonstrado, a capacidade de aprendizado das RNAs pode eliminar o uso de ajustes empíricos, bem como demonstra a capacidade de ajuste dinâmico e adaptativo. Com efeito, o método é capaz de melhorar seu desempenho conforme sujeito ao treinamento de novos casos. Esta funcionalidade pode ser disponibilizada ao operador que informa o tipo de evento que a GD esteve sujeita após a verificação técnica. Assim a RNA amplia seu conjunto de treinamento, refinando as ponderações dos pesos sinápticos e, por consequência, aumentando a precisão de classificação com o passar do tempo.

TABELA III  
COMPARATIVO ENTRE A RNA PERCEPTRON E O MÉTODO  
DE SUB/SOBRE FREQUÊNCIA

|                   | RNA Perceptron | Sub/Sobre-frequência |
|-------------------|----------------|----------------------|
| Atuações corretas | 88,16%         | 70,18%               |
|                   |                | Erros                |
| Curto-circuito    | 8,33%          | 8,33%                |
| Aberturas DG2     | 1,75%          | 0,00%                |
| Ilhamento         | 1,75%          | 29,82%               |

## VII. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Apesar dos desligamentos indevidos causados pelos falsos negativos prejudicarem a qualidade de energia elétrica, elevando os custos operacionais, não existe na literatura um consenso para quais valores são aceitáveis para a não-identificação do ilhamento.

Com efeito, os falsos negativos (7,14%) correspondem a 6 eventos de ilhamento, com desbalanço de potência ativa e reativa menores que 0,004% da potência nominal da GD1. Conforme ilustra Fig.8, é possível observar a pequena ZND do método proposto que é formada pelos sinais em vermelhos.

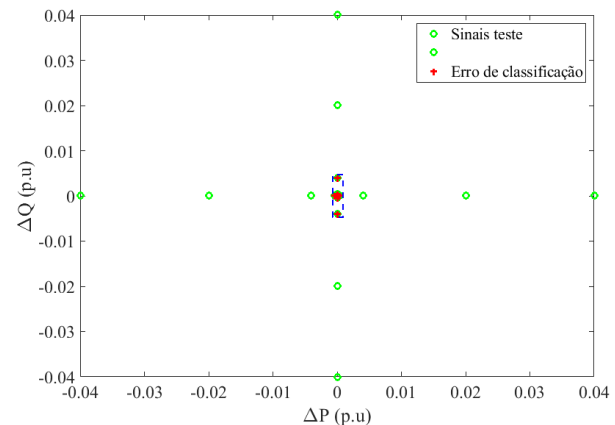


Fig. 8. Sinais pertencentes ao evento 10 – Ilhamento por aberturas tripolares (Tabela I). Em verdes são os sinais do grupo 10 e em vermelho os não identificados de forma correta pelo método proposto.

Os falsos positivos são formados em sua grande maioria por sinais de curtos-circuitos. Conforme discutido na Seção II, quando um curto-circuito apresenta altas potências (próximas a 1 p.u), a característica do sinal (velocidade de rotação da máquina síncrona) é muito semelhante ao caso de um ilhamento, causando a atuação indevida do método.

## VIII. CONCLUSÃO

Este artigo propôs um método de detecção de ilhamento baseado nas componentes harmônicas da frequência da GD. Foi demonstrado que a frequência das gerações síncronas durante ilhamento diferenciam-se daquelas apresentadas em outros eventos. A diferenciação por valores absolutos, como é o caso dos métodos de sub/sobrefrequência não é eficiente, pois eventos de não-ilhamento também causam grandes variações de frequência. Por outro lado, o conteúdo harmônico da frequência elétrica representa característica importante para a classificação de uma perturbação em ilhamento ou não-ilhamento. Observou-

se graficamente que os casos podem ser linearmente separáveis. A classificação das componentes harmônicas através de uma RNA *Perceptron* mostrou-se eficiente. Apesar de o método exigir o treinamento, um pequeno grupo de sinais foi suficiente para atingir uma elevada precisão na classificação.

A alta taxa de acertos da metodologia proposta, superior a 87%, mesmo quando sujeita a casos severos de curtos-circuitos e baixos fluxos de potências no ponto de desconexão, demonstra a eficiência do método proposto.

#### REFERÊNCIAS

- [1] IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces," in *IEEE Std 1547-2018* (Revision of IEEE Std 1547-2003), 6 April 2018.
- [2] S. Palm and P. Schegner, "Fundamentals of detectability and detection methods of unintentional electrical islands," 2015 *IEEE Eindhoven PowerTech, Eindhoven*, 2015, pp. 1-6.
- [3] D. Velasco de la Fuente, C. L. Trujillo Rodriguez and E. A. Narvaez, "Review of Anti-Islanding Methods: Analysis by Figures of Merit Tools for Controllers Reconfiguration in Microgrids," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, no. 3, pp. 679-686, March 2015.
- [4] Z. Mi and F. Wang, "Power Equations and Non-Detection Zone of Passive Islanding Detection and Protection Method for Grid Connected Photovoltaic Generation System," 2009 *Pacific-Asia Conference on Circuits, Communications and Systems, Chengdu*, 2009, pp. 360-363.
- [5] Y. Fan and C. Li, "Analysis on non-detection zone of the islanding detection in photovoltaic grid-connected power system," 2011 *International Conference on Advanced Power System Automation and Protection, Beijing*, 2011, pp. 275-279.
- [6] M. J. Mukarram and S. V. Murkute, "Sandia Frequency Shift Method for Anti-Islanding Protection of a Gridtied Photovoltaic System," 2020 *IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS), Bhopal, India*, 2020, pp. 1-5.
- [7] S. C. Paiva, H. S. Sanca, F. B. Costa and B. A. Souza, "Reviewing of anti-islanding protection," 2014 11th *IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, Juiz de Fora*, 2014, pp. 1-8.
- [8] B. M. Biaz, V. H. Ferreira, M. Z. Fortes, T. T. Lopes and G. B. A. Lima, "Islanding Detection in Distributed Generation using Unsupervised Learning Techniques," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, no. 1, pp. 118-125, Jan. 2018.
- [9] O. Koduri, S. S. Duvvuri and S. D. K. Varma, "A Novel Passive Islanding Detection Methods Using Wavelet Transform for Grid Connected PV System," 2018 *IEEE 13th International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS), Rupnagar, India*, 2018, pp. 422-426.
- [10] A. Rostami, A. Jalilian, S. B. Naderi, M. Negnevitsky, P. Davari and F. Blaabjerg, "A novel passive islanding detection scheme for distributed generations based on rate of change of positive sequence component of voltage and current," 2017 *Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Melbourne, VIC*, 2017, pp. 1-5.
- [11] B. Anudeep and P. K. Nayak, "A passive islanding detection technique for distributed generations," 2017 *7th International Conference on Power Systems (ICPS), Pune*, 2017.
- [12] R. Nale, M. Biswal and N. Kishor, "A Transient Component Based Approach for Islanding Detection in Distributed Generation," in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 10, no. 3, pp. 1129-1138, July 2019.
- [13] A. Singh, R. S. Bhatia, S. Chanana and P. Gupta, "A Passive Islanding Detection Technique for Grid-Connected Photovoltaic Inverters," 2018 *IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS), Bhopal*, 2018, pp. 1-6.
- [14] D. Kim and S. Kim, "Anti-islanding Detection Method using Phase Shifted Feed-Forward Voltage," 2019 *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Anaheim, CA, USA*, 2019, pp. 1480-1486.
- [15] N. Liu, C. Diduch, L. Chang and J. Su, "A Reference Impedance-Based Passive Islanding Detection Method for Inverter-Based Distributed Generation System," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 3, no. 4, pp. 1205-1217, Dec. 2015.
- [16] S. Nikolovski, H. R. Baghaee and D. Mlakic, "Islanding Detection of Synchronous Generator-Based DGs using Rate of Change of Reactive Power," in *IEEE Systems Journal*, vol. 13, no. 4, pp. 4344-4354, Dec. 2019.
- [17] S. Barzentewicz and D. Borkowski, "Synchrophasor based islanding detection method," 2015 *International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation (ISNCC), Lagow*, 2015, pp. 1-4.
- [18] J. Zhao, D. Zhang and J. He, "A passive islanding detection method based on interharmonic impedance," 2017 *IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), Beijing*, 2017, pp. 1-6.
- [19] N. Liu, A. Aljankawey, C. Diduch, L. Chang and J. Su, "Passive Islanding Detection Approach Based on Tracking the Frequency-Dependent Impedance Change," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 6, pp. 2570-2580, Dec. 2015.
- [20] J. Merino, P. Mendoza-Araya, G. Venkataramanan and M. Baysal, "Islanding Detection in Microgrids Using Harmonic Signatures," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 5, pp. 2102-2109, Oct. 2015.
- [21] K. Colombage, J. Wang, C. Gould and C. Liu, "PWM Harmonic Signature-Based Islanding Detection for a Single-Phase Inverter With PWM Frequency Hopping," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 1, pp. 411-419, Jan.-Feb. 2017.
- [22] G. Wang, F. Gao, J. Liu, Q. Li and Y. Zhao, "Design consideration and performance analysis of a hybrid islanding detection method combining voltage unbalance/total harmonic distortion and bilateral reactive power variation," in *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*, vol. 5, no. 1, pp. 86-100, March 2020.
- [23] H. Saadat, *Power System Analysis*, New York: McGraw-Hill, 1999.
- [24] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, New York: McGraw-Hill, 1994.
- [25] R. Szilard. John Wiley and Sons .Theories and Applications of Plate Analysis: Classical, Numerical and Engineering Methods. New York. 2004.
- [26] J. N. Kutz, *Data-Driven Modeling & Scientific Computation: Methods for Complex Systems & Big Data*, Oxford University Press, Oxford, UK. 2013.
- [27] I. N. da Silva, D. Spatti, e R. Flauzino. Redes neurais artificiais para engenharia e ciências aplicadas: curso prático, Artliber Editora Ltda, São Paulo, SP, Brasil. 2010.
- [28] S. Haykin. Redes Neurais- Princípios e Práticas. BOOKMAN, São Paulo, 2ª ed. 2001.
- [29] F. Rosenblatt. Principles of neurodynamics: Perceptions and the theory of brain mechanism. Spartan Books. Washington, DC. 1961.
- [30] H. Demuth, M. Beale, M. Hagan *Neural Network Toolbox for Use with MATLAB* The Mathworks, Inc., Natick, MA (2006).
- [31] M. R. Muraro, "Uma proposta de interconexão de proteções para detecção de ilhamento em sistemas de geração distribuída". M.S. Dissertação, Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, 2014.
- [32] K. E. Yeager, J. R. Willis, "Modeling of emergency diesel generators in na 800 megawatt nuclear power plant. *Emergency Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 8, no. 3, pp. 433-441, 1993.



**Kaynan Maresch** é natural de Ribeirão Pires, SP, Brasil. Possui graduação em Engenharia de Energia pela Universidade Federal do Pampa. Atualmente é aluno da Universidade Federal de Santa Maria no Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) pelo Centro de Excelência em Energia e Sistemas de Potência (CEESP).





**Gustavo Marchesan** possui graduação, mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria em 2011, 2013 e 2016, respectivamente. Atuou como professor na Universidade Federal do Pampa-Campus Bagé de 2016 a 2019. Atualmente é professor da Universidade Federal de Santa Maria.



**Luiz Fernando Freitas-Gutierrez** é Professor Adjunto da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, RS, Brasil, lotado no Departamento de Eletromecânica e Sistemas de Potência (DESP). Recebeu os graus de Bel., Me., Lic. e Dr. em engenharia elétrica pela UFSM em 2010, 2013, 2013 e 2018 respectivamente. Dedicar-se às seguintes áreas de estudo: eletromagnetismo (teoria, modelagem, aplicações e métodos numéricos), análise de transitórios em sistemas elétricos de potência e proteção de redes elétricas de transmissão e distribuição.