



**Universidade de São Paulo – USP**

**Escola de Engenharia de São Carlos – EESC**

**Departamento de Engenharia Elétrica e de  
Computação**

**Trabalho de Conclusão de Curso**

**Aplicação de Redes Neurais Artificiais  
para a Detecção de Ilhamento de  
Geração Distribuída**

Autor:

**Diógenes da Silva**

Número USP:

**6812921**

Orientador:

**Prof. Dr. José Carlos de Melo Vieira Júnior**

São Carlos, Junho de 2014.



**Diógenes da Silva**

# **Aplicação de Redes Neurais Artificiais para a Detecção de Ilhamento de Geração Distribuída**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Escola de Engenharia de  
São Carlos, da Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase  
Sistemas de Energia e Automação

ORIENTADOR: Prof. Dr. José Carlos de Melo Vieira Júnior

São Carlos  
2014

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTA TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

SS581a Silva, Diogenes  
Aplicação de Redes Neurais Artificiais para a  
Detecção de Ilhamento de Geração Distribuída / Diogenes  
Silva; orientador José Carlos Melo Vieira Júnior. São  
Carlos, 2014.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com  
ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de  
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,  
2014.

1. Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. 2.  
Proteção. 3. Geração Distribuída. 4. Ilhamento. 5.  
Redes Neurais Artificiais. I. Título.

# FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Diógenes da Silva

Título: "Aplicação de redes neurais artificiais para a detecção de ilha de geração distribuída"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado  
em 25 / 06 / 2014,

com NOTA 8,0 (oito, zero), pela Comissão Julgadora:

*Prof. Dr. José Carlos de Melo Vieira Júnior - (Orientador - SEL/EESC/USP)*

*Prof. Dr. Ricardo Augusto Souza Fernandes - (DEE/CCET/UFScar)*

*Mestre Rogerio Lucio Lima - (Doutorando - SEL/EESC/USP)*

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:  
Prof. Associado Homero Schiabel



## **Agradecimentos**

- A Deus.
- Ao professor José Carlos de Melo Vieira Júnior pela orientação, disposição e valiosos conselhos.
- Ao Thiago Reginato Lunardi pelo seu apoio em todos momentos necessitados.
- À Priscila Silenci pelo seu amor, carinho, paciência e compreensão.
- À minha família, sem a qual, não seria possível estar aqui.
- A todos moradores e ex-moradores da República Paiero pela amizade e momentos de alegria.



## Resumo

Devido à mudança no cenário dos sistemas elétricos de potência, os sistemas de geração distribuída tornam-se alternativas interessantes para sanar a necessidade crescente de energia, além de prover maior confiabilidade ao suprimento de energia elétrica. A implementação de sistemas de geração distribuída traz a necessidade do estudo de proteção com estas novas características, a fim de evitar danos a equipamentos, instalações, segurança e problemas de qualidade de energia. O ilhamento não-intencional de geradores é uma avaliação fundamental para os sistemas de geração distribuída.

A detecção do ilhamento possui a finalidade da desconexão dos geradores distribuídos, isolando-os do sistema caso o sistema da concessionária esteja desconectado, evitando que linhas de distribuição e transmissão permaneçam energizadas por esses geradores.

Este estudo busca estabelecer um método baseado em redes neurais artificiais para a detecção de ilhamentos em sistemas de distribuição com geração distribuída. O método é baseado na análise da tensão do ponto de acoplamento do gerador distribuído a ser protegido. A tensão obtida é amostrada e colocada na forma de janela de dados para ser processada pelo algoritmo da rede neural artificial.

Para finalizar o estudo, são apresentados os resultados do algoritmo proposto para diversas situações. O resultado se mostrou eficaz, apenas falhando em poucas situações.

Palavras-chave: Geração Distribuída, Ilhamento, Redes Neurais Artificiais, Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica, Proteção.



## **Abstract**

Due to the change in the scenario of electric power systems, distributed generation systems become interesting to solve the increasing need for alternative energy, and provide greater reliability of supply of electricity. The implementation of distributed generation systems brings the need for studying protection with these new features, in order to avoid damage to equipment, facilities, safety and power quality problems. Unintentional islanding is a fundamental analysis for distributed generation systems.

The islanding detection has the purpose of disconnecting the distributed generators, isolating them from the system if the utility system is disconnected; preventing transmission and distribution lines to remain energized by these generators.

This study aims to establish a method based on artificial neural networks for detecting islanding in power distribution systems. The method is based on the analysis of the voltage at the point of common coupling of the distributed generator. The voltage obtained is sampled and placed in the form of a data window to be processed by the artificial neural network algorithm.

To conclude the study, the results of the proposed algorithm are presented for different situations. The result was effective, only failing in few situations.

**Keywords:** Distributed Generation, Islanding, Artificial Neural Networks, Power Distributed Systems, Protection.



## Sumário

1) Introdução.....	1
1.1) Justificativa e objetivos.....	3
1.2) Organização do trabalho.....	3
2) Geração Distribuída e Ilhamento.....	5
2.1) Requisitos para Geração Distribuída.....	7
2.2) Ilhamento em sistemas de distribuição de energia elétrica.....	8
2.2.1) Relé de frequência.....	9
2.2.2) Relé salto de vetor.....	9
2.2.3) Relé de tensão.....	9
2.3) Considerações Finais sobre o Capítulo.....	10
3) <i>SimPowerSystems</i> .....	11
3.1) Informações sobre o <i>SimPowerSystems</i> .....	11
3.1.1) Estrutura lógica simplificada.....	11
3.2) Modelagem do <i>SimPowerSystems</i> .....	12
3.2.1) Gerador Síncrono.....	13
3.2.2) Alimentador.....	15
3.2.3) Transformadores.....	15
3.2.4) Carga.....	16
3.2.5) Sistema Simulado.....	17
4) Redes Neurais Artificiais.....	19
4.1) Perceptron Multicamadas.....	19
4.2) Função de Ativação.....	21
4.3) Método de Treinamento: Gradiente Conjugado Escalonado.....	25
5) Metodologia do Trabalho.....	29
5.1.1) Ilhamento com potência de gerador distribuído variando e carga constante.....	30
5.1.2) Ilhamento com potência ativa do gerador constante e cargas variando.....	31
5.1.3) Retirada da maior carga, variando-se a potência do gerador distribuído.....	32
5.1.4) Retirada da maior carga, variando-se a potência das cargas.....	33
5.1.5) Entrada da maior carga, variando-se a potência do gerador distribuído.....	34
5.1.6) Entrada da maior Carga, variando-se a potência das cargas.....	34
5.1.7) Entrada da carga mais próxima do gerador distribuído, variando-se a potência do gerador distribuído.....	35
5.1.8) Entrada da carga mais próxima do gerador distribuído, variando-se a potência das cargas.....	36
5.1.9) Saída da carga mais próxima do gerador distribuído, variando-se a potência do gerador distribuído.....	36
5.1.10) Saída da carga mais próxima do gerador distribuído, variando-se a potência das cargas.....	37
5.2) Amostragem dos dados.....	37
5.3) Treinamento da rede neural artificial.....	38

<b>5.4) Classificação dos eventos</b> .....	38
<b>6) Análise dos Resultados</b> .....	41
<b>7) Conclusão</b> .....	45
<b>Referências Bibliográficas</b> .....	47
Anexo A .....	49
Anexo B .....	53
Anexo C .....	55

## Índice de figuras

Figura 1: Ilustração da ocorrência de um ilhamento.....	2
Figura 2: Ilhamento ocorrido em um sistema de distribuição. ....	8
Figura 3: Interconexão entre modelos lineares e não-lineares.....	12
Figura 4: Circuito equivalente do modelo do gerador síncrono. ....	13
Figura 5: Esquema de controle de um gerador síncrono [4].....	14
Figura 6: Modelo de linha curta no SimPowerSystems.....	15
Figura 7: Modelo do Transformador T [4].....	15
Figura 8: Representação do transformador pelo SimPowerSystems. ....	16
Figura 9: Modelo de carga utilizado no SimPowerSystem.....	17
Figura 10: Sistema utilizado para a simulação.....	17
Figura 11: Perceptron Multicamadas. ....	19
Figura 12: Exemplo de topologias com diferente número de neurônios na camada de intermediária. ....	21
Figura 13: Função Degrau Unitário. ....	22
Figura 14: Função Degrau Bipolar.....	22
Figura 15: Função Rampa Simétrica.....	23
Figura 16: Função Logística.....	24
Figura 17: Função Tangente Hiperbólica. ....	24
Figura 18: Aba inicial do Neural Network Toolbox.....	26
Figura 19: Janela para inserir dados.....	26
Figura 20: Escolha da proporção de dados utilizadas para cada aplicação de RNA.....	27
Figura 21: Escolha do número de neurônios na camada escondida. ....	28
Figura 22: Etapas do desenvolvimento deste trabalho. ....	29
Figura 23: Comportamento da tensão no ponto de acoplamento. ....	31
Figura 24: Comportamento da tensão no ponto de acoplamento. ....	32
Figura 25: Comportamento da tensão no ponto de Acoplamento. ....	33
Figura 26: Comportamento da tensão no ponto de Acoplamento. ....	33
Figura 27: Comportamento da Tensão no ponto de Acoplamento.....	34
Figura 28: Comportamento da Tensão no ponto de Acoplamento.....	35
Figura 29: Comportamento da Tensão no ponto de Acoplamento.....	35
Figura 30: Comportamento da Tensão no ponto de Acoplamento.....	36
Figura 31: Comportamento da Tensão no ponto de Acoplamento.....	37
Figura 32: Comportamento da Tensão no ponto de Acoplamento.....	37
Figura 33: Amostragem de um ciclo de janelamento utilizado no trabalho. ....	38
Figura 34: Gráfico do erro médio quadrático pelo número de épocas.....	41



## Índice de tabelas

<b>Tabela 1: Tecnologias para Geração Distribuída [6].</b> .....	5
<b>Tabela 2: Fontes geradoras do sistema elétrico brasileiro [7].</b> .....	6
<b>Tabela 3: Empreendimentos em construção no Brasil [7].</b> .....	6
<b>Tabela 4: Resultado do Treinamento da RNA.</b> .....	42
<b>Tabela 5: Resultado do Teste da RNA.</b> .....	42
<b>Tabela 6: Valor de saída obtido e valor desejado.</b> .....	42
<b>Tabela 7: Valor de saída obtido e valor desejado.</b> .....	43
<b>Tabela 8: Valor de saída obtido e valor desejado.</b> .....	43
<b>Tabela 9: Valor de saída obtido e valor desejado.</b> .....	43
<b>Tabela 10: Dados equivalentes a subestação da concessionária.</b> .....	49
<b>Tabela 11: Dados dos transformadores conectados a subestação de energia.</b> .....	49
<b>Tabela 12: Dados dos transformadores conectados as cargas.</b> .....	50
<b>Tabela 13: Dados das linhas do sistema elétrico.</b> .....	50
<b>Tabela 14: Dados das linhas do sistema elétrico.</b> .....	50
<b>Tabela 15: Dados dos transformadores conectados a subestação de energia.</b> .....	51
<b>Tabela 16: Análise de configurações da Rede Neural Artificial.</b> .....	53
<b>Tabela 17: Vetores analisadas no capítulo 7.</b> .....	55

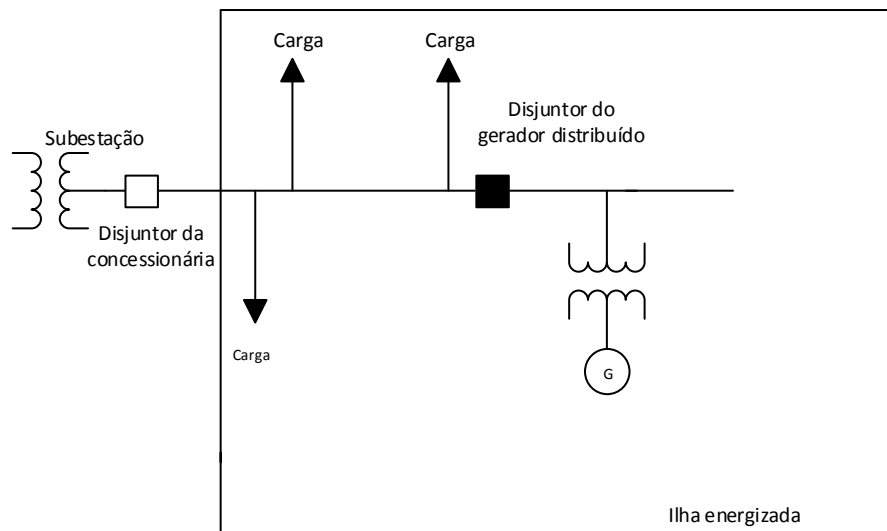


## 1) Introdução

A reestruturação do setor elétrico proporcionou mudanças no sistema elétrico. Uma dessas mudanças é a geração distribuída. O surgimento de novos agentes geradores proporciona maior oferta de recursos energéticos, além de maior confiabilidade do sistema, devido à redução da dependência de poucas fontes geradoras [1]. Como resultado da estruturação, tem-se a geração distribuída (também denominada geração dispersa, ou ainda, geração descentralizada). Ainda não há uma definição unânime de geração distribuída, porém, pode ser definida da seguinte forma: energia produzida visando consumo local, as unidades geradoras são iguais ou menores que 50 MW de capacidade instalada, diversidade de tecnologia geradora, unidades geradoras conectadas diretamente ao sistema de subtransmissão e distribuição de energia elétrica [2] [3]. Dentre essas tecnologias, podem ser destacadas [3]:

- Geradores síncronos convencionais: são utilizados, geralmente, em pequenas centrais hidroelétricas (PCHs) e usinas térmicas;
- Geradores de indução: são encontrados, principalmente, na geração eólica, entretanto, é possível encontrar esse gerador em centrais de cogeração e em PCHs.
- Células fotovoltaicas;
- Células a combustível.

Contudo, para que a geração distribuída possa, de fato, exercer um papel de importância nos sistemas elétricos, alguns estudos são necessários para verificar os impactos nas redes de transmissão, subtransmissão e distribuição, tais como: avaliação no perfil da tensão, estabilidade, nível de curto-circuito e perdas elétricas. Além disso, a concessionária estabelece critérios de controle, instalação e localização [4] que os consumidores deverão respeitar. Um dos principais problemas enfrentados pela geração distribuída é quando parte da rede de distribuição torna-se eletricamente isolada da principal fonte de energia elétrica (subestação), contudo, este subsistema permanece energizado devido a um ou mais geradores distribuídos. Este problema é o ilhamento não intencional [5], referido neste trabalho como ilhamento. A Figura 1 demonstra uma situação de ilhamento. Assim, supõe-se que o disjuntor da subestação da concessionária abra por algum motivo, e então o gerador distribuído passa a alimentar as cargas, formando um subsistema.



**Figura 1: Ilustração da ocorrência de um ilhamento.**

Há diversas motivações para a necessidade de detecção do efeito de ilhamento, estendendo-se do escopo técnico ao escopo de segurança humana [1]-[4]:

- A garantia de segurança da equipe de manutenção da rede da concessionária de energia elétrica, uma vez que o sistema pode permanecer energizado sem o conhecimento da equipe, gerando riscos de acidentes;
- Como a concessionária de energia, na maioria dos casos, não monitora tensão e corrente do subsistema do gerador distribuído, os critérios de qualidade de energia, que deve ser garantida pela concessionária, não será monitorada;
- Dispositivos de proteção podem perder a coordenação entre si ao ocorrer um ilhamento, uma vez que haverá redução significativa da corrente de curto-circuito, fazendo com que os dispositivos possam deixar de funcionar em situações que deveriam responder de forma devida;
- O sistema pode apresentar aterramento inadequado, pois o ilhamento poderá fazer com não exista conexão com o aterramento da concessionária;
- Ao reenergizar o sistema, o fornecimento do gerador distribuído pode não estar em sincronismo com a rede, devido aos elevados transitórios de corrente;

Não há metodologia única para proteção contra o ilhamento, sendo atualmente mais aplicados os relés de frequência, taxa de variação da frequência e salto de vetor. Contudo, há limitações para esses métodos, sendo o ponto limitante a não atuação desses dispositivos devido ao baixo desbalanço de potência ativa entre carga e geração [1].

Este trabalho propõe um método inteligente, que aprenderá a reconhecer padrões por meio do treinamento de uma rede neural artificial para identificação do ilhamento em um sistema de distribuição de energia elétrica. Como a rede neural artificial reconhece padrões, não

há problemas de identificação de ilhamentos em situações que há pequeno desbalanço de potência.

### 1.1) Justificativa e objetivos

Para que um sistema de distribuição e subtransmissão utilizem geradores distribuídos, é de fundamental importância estudar os impactos dessa inserção. O estudo sobre a proteção do sistema faz parte do conjunto de impactos que deverá ser analisado. A proteção dimensionada corretamente é uma estratégia para minimizar ou eliminar impactos no sistema ao acontecer uma condição anormal de operação.

Este trabalho propõe uma solução para detecção de ilhamento com a utilização de um algoritmo baseado em Rede Neural Artificial (RNA), cuja atuação é por meio do reconhecimento de padrões presentes na tensão do acoplamento do gerador distribuído, visando classificar cada ciclo de tensão como sendo padrão “ilhamento” ou padrão “não ilhamento”. A escolha de RNA deve-se pela robustez, tolerância a falhas e capacidade de “aprender” por meio de exemplos. Portanto, essa técnica aparece como uma solução para o problema de detecção de ilhamentos.

Devido ao grande número de condições anormais que o sistema pode ser submetido e dificuldade de obtenção de dados reais, esse trabalho utilizará a ferramenta *SimPowerSystems* do *Simulink* para simular estas condições.

### 1.2) Organização do trabalho

Este trabalho está organizado da seguinte maneira:

- **Capítulo 2:** discorre sobre conceitos de geração distribuída, seu crescimento e importância. Além disso, discorre sobre o fenômeno de ilhamento e as principais técnicas empregadas atualmente para sua detecção.
- **Capítulo 3:** trata das ferramentas do *MATLAB*, *SimPowerSystems* e *Neural Network*. No *SimPowerSystems* mostra-se a estrutura lógica, modelagem dos componentes utilizados no sistema e a apresentação do sistema elétrico estudado. Apresentação da ferramenta *Neural Network Toolbox* que implementa a rede neural artificial do trabalho, bem como um breve guia de sua utilização.
- **Capítulo 4:** este capítulo aborda conceitos das redes neurais artificiais, bem como algumas aplicações, apresentação da arquitetura utilizada e o algoritmo do método de treinamento utilizado.

- **Capítulo 5:** mostra o algoritmo de como se procedeu o trabalho, detalhando cada atividade realizada. Esse capítulo aborda desde a obtenção dos dados do *SimPowerSystems* até a obtenção dos resultados da *Neural Network Toolbox*.
- **Capítulo 6:** esta etapa realiza análise dos resultados obtidos no fim dos simulações. Pode-se observar a funcionalidade e limitação do algoritmo empregado.
- **Capítulo 7:** apresenta a conclusão deste trabalho.
- **Anexo A:** apresenta os dados do sistema elétrico em que este trabalho foi proposto.
- **Anexo B:** estudo realizado para encontrar a rede neural artificial que apresenta melhor resultado para a rede,
- **Anexo C:** tabela com os vetores estudados em cada caso de análise do Capítulo 7.

## 2) Geração Distribuída e Ilhamento

A concepção tradicional dos sistemas elétricos de potência é ter as grandes usinas de geração de energia elétrica gerenciadas de forma centralizada. As principais características deste sistema são a utilização de grandes centrais de geração de energia elétrica muitas vezes afastadas do centro de consumo, extensa rede de transmissão e distribuição para levar essa energia até o consumidor [3]-[6].

A geração distribuída não possui definição unânime, como a geração centralizada. No entanto, é possível citar características em comum sobre geração distribuída [2] [3] [6]:

- Normalmente menor ou igual a 50 MW;
- Geralmente é conectada à rede de distribuição de energia elétrica;
- Não é planejada como fonte central de despacho de energia;
- Diversidade de tecnologia geradora;
- Geração de energia para consumo local;

As tecnologias de geração distribuídas existentes são apresentadas na Tabela 1[6].

**Tabela 1: Tecnologias para Geração Distribuída [6].**

Tecnologia	Fonte de combustível	Interface	Pequeno <100 kW	Intermediário 100 kW - 1 MW	Grande > 1 MW
Pequenas turbinas a gás	Combustível fóssil e biogás	Conexão direta			X
Motores recíprocos com geradores síncronos ou de indução	Combustível fóssil e biogás	Conexão direta	X	X	X
Geotérmico	Renovável	Conexão direta		X	X
PCHs	Renovável	Conexão direta		X	X
Eólica	Renovável	Inversor	X	X	X
Fotovoltaico	Renovável	Inversor	X	X	X
Células a combustível	Combustível fóssil e renovável	Inversor	X	X	X
Solar térmico	Renovável	Conexão direta	X	X	X
Armazenamento em baterias	Rede elétrica	Inversor	X	X	X
Armazenamento em capacitores	Rede elétrica	Inversor	X	X	
Armazenamento em volantes	Rede elétrica	Inversor		X	X
Micro turbinas	Combustível fóssil	Inversor	X	X	

Pode-se encontrar algumas destas tecnologias no sistema elétrico brasileiro. A Tabela 2 contém os tipos de fontes geradoras, quantidade, potência outorgada e potência fiscalizada. Nesta tabela, a potência outorgada é a potência considerada no ato da outorga. Já a potência fiscalizada é igual à considerada no momento da operação comercial da primeira unidade geradora.

**Tabela 2: Fontes geradoras do sistema elétrico brasileiro [7].**

Empreendimentos em Operação				
Tipo	Quantidade	Potência outorgada (kW)	Potência fiscalizada (kW)	%
Central Geradora Hidrelétrica	425	258.101	259.307	0,21
Central Geradora Eólica	103	2.134.968	2.137.372	1,71
Pequena Central Hidrelétrica	462	4.634.488	4.569.748	3,65
Central Geradora Fotovoltaica	34	6.772	2.772	0
Usina Hidrelétrica	194	86.713.255	80.731.224	64,57
Usina Termelétrica	1763	37.205.783	35.341.103	28,27
Usina Termonuclear	2	1.990.000	1.990.000	1,59

É possível observar que a geração distribuída já representa mais de 5% da matriz energética nacional, com destaque para as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH), que representam 3,65% de toda potência fiscalizada.

Como pode ser observado na Tabela 3, as fontes alternativas de energia elétrica vêm assumindo um papel mais significativo na geração de energia do Brasil, com destaque para Central Geradora Eólica, em que sua potência outorgada se assemelha a de usina termelétrica.

**Tabela 3: Empreendimentos em construção no Brasil [7].**

Empreendimentos em Construção			
Tipo	Quantidade	Potência outorgada (kW)	%
Central Geradora Hidrelétrica	1	848	0
Central Geradora Eólica	93	2.346.066	11,35
Pequena Central Hidrelétrica	32	338.961	1,64
Usina Hidrelétrica	7	14.060.800	68,02
Usina Termelétrica	21	2.575.220	12,46
Usina Termonuclear	1	1.350.000	6,53

## 2.1) Requisitos para Geração Distribuída

Para que um gerador distribuído possa ser conectado à rede de energia elétrica, ele deve estar em vigência com padrões de qualidade, segurança e confiabilidade, que são estabelecidos pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) e pela concessionária local.

O Módulo 3 do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional) define os requisitos para conexão com o sistema de distribuição. As principais exigências são [9]:

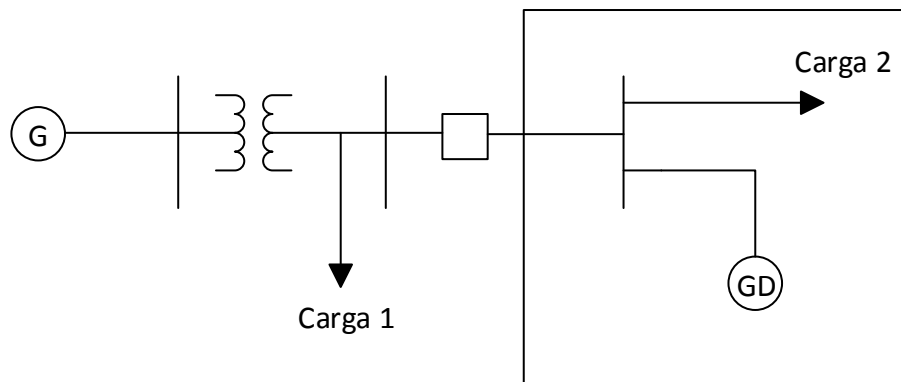
- A conexão deve ser realizada em corrente alternada com frequência de 60 Hz;
- O paralelismo com a rede acessada não deve causar problemas técnicos ou de segurança aos demais acessantes, ao sistema de distribuição associado, e aos profissionais de manutenção e operação;
- Para um melhor desempenho de operação em paralelo, deve existir um sistema de comunicação entre acessada e acessante;
- O acessante é o único responsável pela sincronização entre o sistema de geração acessante com sistema acessado;
- O acessante deve ajustar sua proteção para que desfaça-se o paralelismo em caso de desligamento, antes da subsequente tentativa de religamento;
- O acordo operativo definirá os arranjos de interface entre as partes;
- Os estudos básicos, de responsabilidade do acessante, devem avaliar tanto o ponto de conexão, bem como sua área de influência no sistema elétrico acessado. Tais estudos são:
  - A. Nível de curto-circuito;
  - B. Capacidade de disjuntores, malhas de terra, transformadores de instrumento e barramentos;
  - C. Ajuste dos parâmetros dos sistemas de controle de tensão e frequência, e para altas tensões, os sinais estabilizadores;
  - D. Adequação do sistema de proteção envolvido na integração do sistema e sua coordenação;
- Os estudos operacionais para instalação do acessante são de responsabilidade da acessante, sendo a concessionária responsável pela aprovação;

Após a conexão do acessante com a rede, este deverá respeitar os padrões de qualidade da energia, que são definidos pelo Módulo 8 do PRODIST (Qualidade de Energia Elétrica). Os principais aspectos de qualidade são [10]:

- Os sistemas de distribuição e instalações conectadas a ele deverão operar dentro dos limites de 59,9 Hz e 60,1 Hz, em condições normais e regime permanente;
- As instalações conectadas ao sistema devem garantir que a frequência retorne para a faixa 59,5 Hz a 60,5 Hz em um período inferior a 30 segundos, após a ocorrência de distúrbio na rede, desta forma, garantindo equilíbrio da geração-carga;
- Caso seja necessário corte de carga ou de geração, após uma anormalidade, para que seja reestabelecido o equilíbrio da geração-carga, a frequência não deverá exceder 66 Hz ou ser inferior a 56,5 Hz;
- Ainda com relação ao aspecto anterior, a frequência deverá ficar no máximo 10 segundos abaixo de 58,5 Hz ou ficar no máximo por 5 segundos abaixo de 57,5 Hz. Para o limite superior, a frequência poderá permanecer acima de 62,5 Hz por no máximo 30 segundos e acima de 63,5 Hz por no máximo 10 segundos.

## 2.2) Ilhamento em sistemas de distribuição de energia elétrica

O fato da rede de distribuição tornar-se eletricamente isolada da principal fonte de energia elétrica (subestação), contudo, mantendo energizada uma porção devido a um gerador distribuído (Figura 2) é definido como ilhamento.



**Figura 2: Ilhamento ocorrido em um sistema de distribuição.**

Para a detecção do ilhamento é possível utilizar técnicas remotas e técnicas locais. Dentro das técnicas remotas são encontradas técnicas baseadas em sistemas SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*), PLCC (*Power Line Carrier Communication*) e na rede de comunicação dos relés. Já as técnicas locais, são subdivididas em passivas e ativas. As técnicas ativas são baseadas na injeção de perturbações na rede, fazendo com que o gerador apresente respostas diferentes à condição normal das respostas quando o gerador estiver ilhado

[1]. As técnicas passivas são baseadas em medidas elétricas no ponto de acoplamento comum entre o gerador distribuído e o sistema de distribuição, sendo o ilhamento identificado caso as grandezas elétricas medidas ultrapassem condições pré-estabelecidas. Em todos os métodos, sejam passivos ou ativos, há zonas de não detecção (ZND), que são zonas em que os métodos podem falhar.

As técnicas passivas de detecção são mais utilizadas por serem alternativas mais vantajosas economicamente. Dentro das técnicas passivas de detecção de ilhamentos, os relés mais comuns são os relés de frequência (sub e sobrefrequência), salto de vetor e relés de tensão (sub e sobretensão).

### **2.2.1) Relé de frequência**

Para a detecção de ilhamentos com a utilização de relés frequência, é medida a frequência do sinal de tensão no ponto de acoplamento da rede com o gerador distribuído, e então, é comparada com os ajustes de sub e sobrefrequência do relé. Caso o valor medido esteja fora da faixa pré-definida, um sinal é enviado pelo relé afim de desconectar o gerador distribuído. Geralmente, esses relés possuem dispositivo para seu bloqueio: se a tensão do terminal estiver abaixo de um valor mínimo determinado. Esse dispositivo tem como finalidade evitar a operação do relé no momento da partida do gerador distribuído [1].

### **2.2.2) Relé salto de vetor**

Para estes relés, também conhecidos como relés de deslocamento de fase, se a variação do ângulo da tensão medida pelo relé for maior do que um ângulo de referência pré-determinado, um sinal é enviado para o disjuntor desconectar o gerador distribuído. Tipicamente, relés de deslocamento de fase são ajustados em valores entre 2 e 20 graus. Estes relés também são equipados com um elemento que bloqueia o funcionamento do relé caso a tensão do terminal estiver abaixo de um determinado mínimo determinado [1] [4].

### **2.2.3) Relé de tensão**

Este método consiste no monitoramento da tensão do ponto de interconexão. Assim, a variação brusca na carga do gerador distribuído na ocorrência de um ilhamento fará com que o gerador não consiga manter o valor da tensão nominal. Haverá diminuição da tensão caso a

carga total remanescente seja maior. Em contrapartida, a tensão aumentará quando a carga total for muito menor que a potência nominal do gerador.

### **2.3) Considerações Finais sobre o Capítulo**

A geração distribuída vem crescendo em sua potência outorgada no Brasil. Devido ao aumento considerável, é fundamental o estudo do ilhamento para evitar problemas técnicos de operação e de segurança. Os métodos passivos são os mais difundidos atualmente, devido a sua vantagem econômica, contudo, possuem limitações. Esses métodos possuem zonas de não detecção, que são complicadas de serem reduzidas, pois um ajuste sensível demais pode levar o sistema a ter atuações indevidas em determinadas situações, tal como o chaveamento de uma grande carga do sistema.

A utilização de redes neurais artificiais possibilita o reconhecimento de padrões, o que ajudaria a diferenciar as situações de chaveamento com um ilhamento, então, obtendo um sistema mais confiável em relação aos métodos passivos mais usuais.

### 3) *SimPowerSystems*

O ilhamento é um evento dinâmico, pois está associado às variações de frequência e de tensão causadas pelo desbalanço entre geradores e cargas. Devido a isso, faz-se necessária a utilização de uma ferramenta de simulação dinâmica não-linear. Então, foi escolhido o *SimPowerSystems*, módulo do *Simulink*, que é uma ferramenta para simulação de sistemas elétricos de potência e faz parte do *MATLAB* [12] [13].

Durante este trabalho, foram realizadas várias simulações, visando estabelecer perfil de tensões e correntes nas cargas, alimentador e gerador distribuído do sistema, a fim de se obter uma base rica de dados para treinar a rede neural multi-camadas empregada neste trabalho.

A justificativa desse capítulo deve-se à apresentação dos elementos do *SimPowerSystem*, e em seguida, apresentação da modelagem realizada, e finalmente, apresentação do sistema elétrico estudado neste trabalho.

#### 3.1) **Informações sobre o SimPowerSystems**

O *SimPowerSystems* é uma ferramenta *Blockset* do *Matlab/Simulink* recente e poderosa para análise de estabilidade e de transitórios eletromagnéticos. Esta ferramenta fornece modelos de diversos componentes elétricos: disjuntores; elementos RLC concentrados; dispositivos para mensuração; cargas não-lineares; modelos de linhas de transmissão; máquinas elétricas e controles; dispositivos de eletrônica de potência; fontes de alimentação; entre outros. Além disso, há outros modelos do *Simulink* que podem ser usados em conjunto, ou até permitir o usuário construir seu próprio modelo. O *Simulink* possui a capacidade de utilizar compilação de seus arquivos em Linguagem C ou Fortran, operando em conjunto com algum compilador correspondente [12].

##### 3.1.1) **Estrutura lógica simplificada**

A primeira etapa de uma simulação é a construção do modelo por meio da biblioteca do *SimPowerSystems* e do *Simulink*. As etapas são as seguintes:

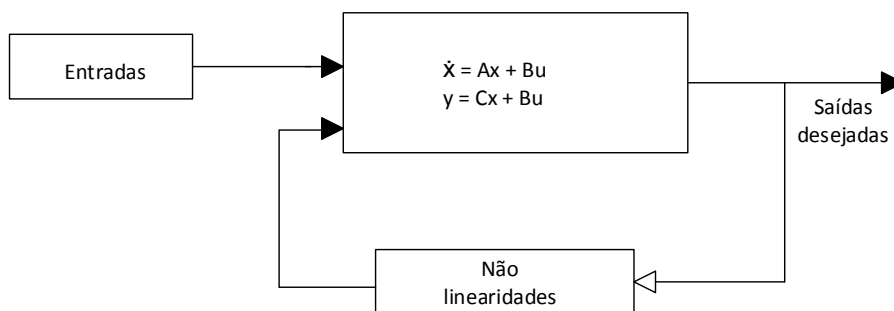
- A) A função *power2sys* faz a divisão dos blocos do *SimPowerSystems* e do *Simulink*. Após isso, são obtidos os parâmetros da rede elétrica e obtida sua topologia. Os blocos do *SimPowerSystem* são diferenciados em blocos lineares e não-lineares, enumerando cada nó elétrico.

B) A função `circ2sys` constrói o modelo de variáveis de estado, após a obtenção da topologia da rede. O modelo de variáveis de estado é construído considerando apenas a parte linear do circuito. Este modelo é dado por (3.1):

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad (3.1)$$

Este é o momento em que ocorrem os cálculos em regime permanente do sistema.

C) Após esta análise, a simulação é iniciada interconectando modelos lineares e não-lineares do programa. Conforme a Figura 3, os elementos não-lineares são modelados por meio de uma relação de tensão-corrente.



**Figura 3: Interconexão entre modelos lineares e não-lineares.**

A velocidade de simulação varia conforme o método de resolução. Exemplarmente, o método de solução fasorial, utilizado por muitos programas de simulação de estabilidade transitória de sistemas de energia elétrica, reduz consideravelmente o tempo de simulação, visto que suas equações são algébricas, que fatalmente serão de mais rápida e fácil solução. Apesar de influenciar no tempo de simulação, o grau de precisão da resposta também auxiliará na escolha do método adequado: contínuo, discreto ou fasorial. Neste trabalho foi descrito o funcionamento do método contínuo, que utiliza modelos mais detalhados das máquinas e fornece os valores instantâneos das correntes e tensões.

### 3.2) Modelagem do `SimPowerSystems`

Esta seção apresentará a modelagem dos elementos do sistema elétrico estudado no `SimPowerSystems`, para que possa ser realizada as simulações de operação do sistema elétrico de potência estudado.

### 3.2.1) Gerador Síncrono

A máquina síncrona é utilizada, na geração distribuída, como unidades geradoras de PCHs e termoelétricas [1] [4] [13].

A máquina síncrona pode ser representada em um modelo matemático de até oitava ordem, que leva em consideração a dinâmica do estator, do enrolamento de campo e do enrolamento amortecedor. O circuito equivalente do modelo é representado na estrutura  $dq0$  de referência do rotor. Todos os parâmetros do rotor e grandezas elétricas são referidos para o estator. O modelo é representado pela Figura 4.

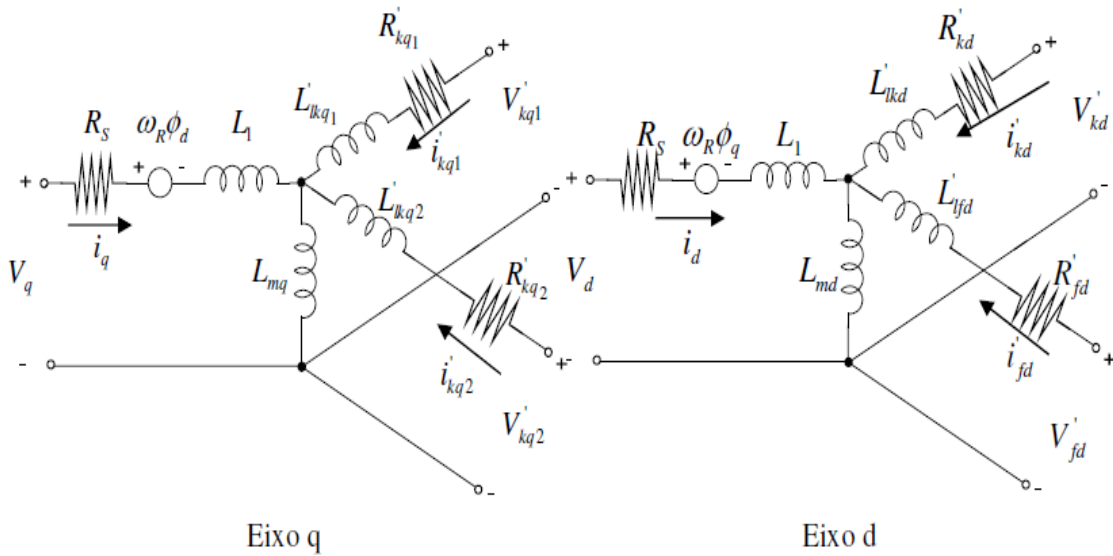


Figura 4: Circuito equivalente do modelo do gerador síncrono.

Em que o significado dos sub-índices das grandezas representadas na Figura 6 são:

- $d, q$ : eixo direto e eixo em quadratura, respectivamente;
- $R, S$ : Rotor e estator, respectivamente;
- $f, k$ : enrolamento de campo e amortecimento, respectivamente;
- $l, m$ : indutâncias de dispersão e magnetização, respectivamente;

O sistema de excitação de geradores síncronos conectados à rede de transmissão é controlado de forma a manter a tensão terminal constante. Todavia, em geradores síncronos conectados à rede de distribuição, não há consenso. Há diferentes práticas adotadas por concessionárias sobre a filosofia adotada para o sistema de excitação. De forma geral, há duas formas que podem ser adotadas: tensão constante ou potência reativa constante [4]. A Figura 5 mostra um esquema simplificado do sistema de excitação dos geradores síncronos. Este circuito consiste em um circuito de medição e de processamento de sinais, um regulador e a excitatriz.

Um sinal de erro é enviado ao regulador, sendo a tensão de campo da excitatriz ajustada baseada na saída do regulador. O conjunto regulador/excitatriz é equipado com limitadores de sub e sobre e subexcitação, os quais limitam a potência reativa consumida ou gerada pelo gerador [4].

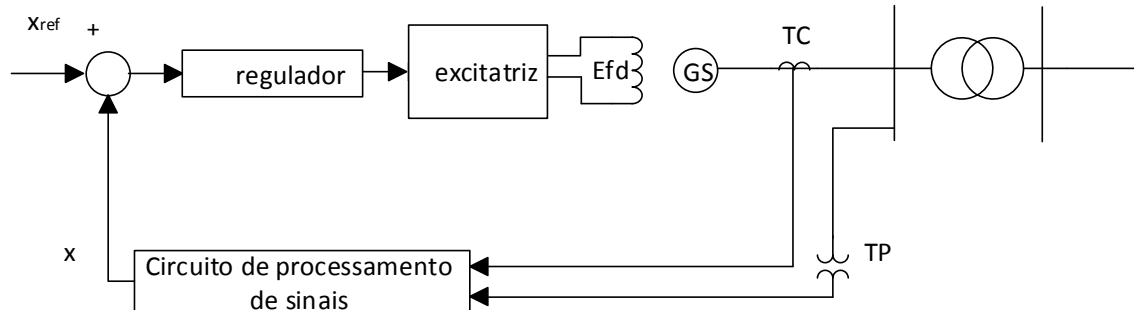


Figura 5: Esquema de controle de um gerador síncrono [4].

Regulador de tensão: Neste caso, o sinal medido  $x_{ref}$  é o fasor da tensão terminal de corrente e tensão. Neste trabalho, para manter a generalidade dos estudos, foi negligenciado a compensação de corrente reativa, afim de manter a generalidade do estudo. Desta forma, a tensão de referência é comparada diretamente com a corrente do terminal do gerador. O regulador de tensão é modelado pela equação abaixo:

$$x = || \bar{V}_T - j\bar{I}_T X_C || \quad (3.2)$$

- $x$ : sinal medido pelo controlador;
- $\bar{V}_T$ : fasor da tensão terminal;
- $\bar{I}_T$ : fasor da corrente terminal;
- $j$ : operador complexo  $(-1)^{1/2}$
- $X_C$ : reatância de compensação da corrente reativa.

Como foi negligenciada a compensação de corrente reativa, a tensão terminal do gerador é comparada diretamente com a tensão de referência [1]–[4].

Regulador de potência reativa ou fator de potência: Neste caso, o sinal medido  $x_{ref}$  é a potência reativa ou o fator de potência. A tensão de campo é ajustada automaticamente para manter o fator de potência ou a potência reativa constante. Essa estratégia de controle adotada por produtores independentes para evitar o pagamento de penalidades devido ao consumo de potência reativa ou para maximizar a geração de potência ativa. Neste caso, a operação com fator de potência unitário é adotada [4].

### 3.2.2) Alimentador

Como os alimentadores são de distribuição e podem ser considerados linhas curtas, o efeito capacitivo pode ser desconsiderado. Então, o modelo dos alimentadores é uma impedância RL em série, sendo sua representação no *SimPowerSystem* conforme a Figura 6.

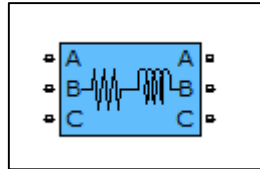


Figura 6: Modelo de linha curta no *SimPowerSystems*.

### 3.2.3) Transformadores

Os transformadores utilizam o modelo T, pois foram levadas em consideração as perdas no núcleo [12] [13] [14]. Na figura 7 é representado o circuito do transformador T:

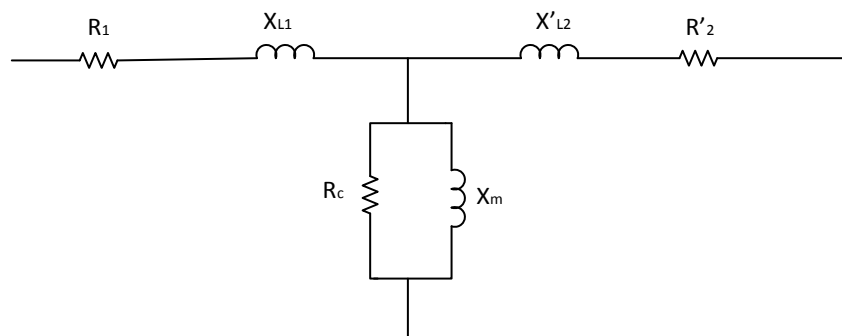


Figura 7: Modelo do Transformador T [4].

Na Figura 7,  $R_1$  e  $X_{L1}$  representam a resistência e reatância do primário.  $R'_2$  e  $X'_{L2}$  representam a resistência e reatância do secundário, sendo que seus valores são referidos para o primário.  $R_c$  e  $X_m$  representam a resistência do ramo magnetização (perdas no núcleo) e reatância de magnetização.

A Figura 8 é a representação do *SimPowerSystems* para o transformador.

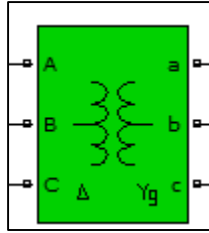


Figura 8: Representação do transformador pelo SimPowerSystems.

### 3.2.4) Carga

As cargas do sistema foram representadas por modelos estáticos que dependem da tensão, como descrito em [14]. O modelo descrito é expresso pelas expressões (3.2) e (3.3) para potência ativa e reativa, respectivamente.

$$P = P_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{n_p} \quad (3.2)$$

$$Q = Q_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{n_q} \quad (3.3)$$

O significado de cada variável é relacionado a seguir:

- $P$  = potência ativa consumida pela carga (pu);
- $P_0$  = potência ativa nominal da carga (pu);
- $Q$  = potência reativa consumida pela carga (pu);
- $Q_0$  = potência reativa nominal da carga (pu);
- $V$  = tensão nodal da carga (pu);
- $V_0$  = tensão nominal da carga (pu);
- $n_p$  = expoente que indica o comportamento da componente de potência ativa da carga em relação à variação tensão nodal;
- $n_q$  = expoente que indica o comportamento da componente de potência reativa da carga em relação à variação tensão nodal.

Os expoentes 0, 1 e 2 representam, respectivamente, carga do tipo potência constante, corrente constante e impedância constante. Expoentes divergentes significam a combinação de duas destas características. O modelo utilizado na simulação de ilhamento foi de impedância constante. O modelo utilizado no *SimPowerSystems* é apresentado pelo diagrama da Figura 9.

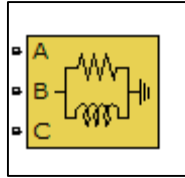


Figura 9: Modelo de carga utilizado no SimPowerSystem.

### 3.2.5) Sistema Simulado

Para a realização deste trabalho, o sistema utilizado para as simulações é representado pela Figura 10. Este sistema possui um gerador síncrono distribuído com controle de potência ativa e de tensão terminal. Os detalhes do sistema podem ser encontrados no Anexo A.

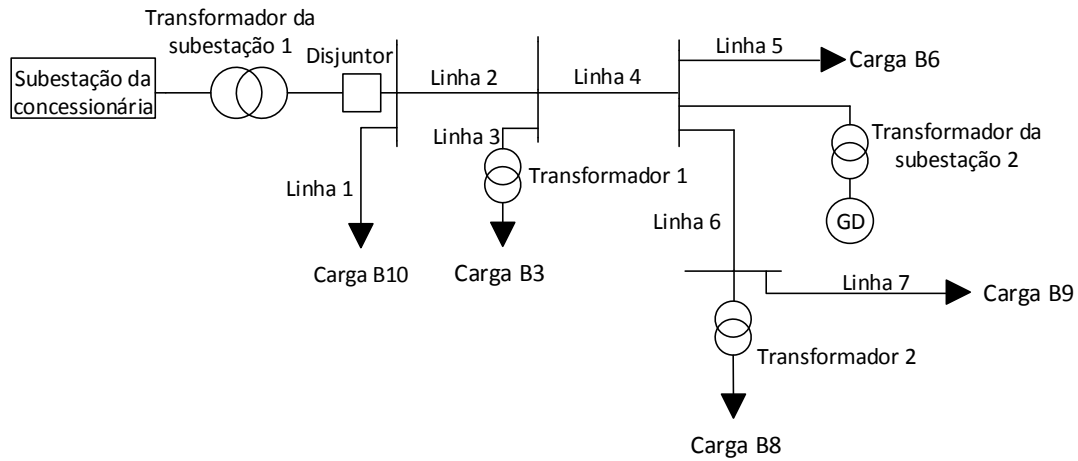


Figura 10: Sistema utilizado para a simulação.



## 4) Redes Neurais Artificiais

Redes neurais artificiais (RNAs) são métodos computacionais inspirados no cérebro humano para solucionar determinados tipos de problemas. Estas redes simulam as conexões neurais que existem no cérebro de seres dotados de inteligência, adquirindo conhecimento com o aprendizado [15].

A aplicação de redes neurais visa solucionar diversos problemas, sendo dos tipos [16]:

- Reconhecimento de Padrões;
- Classificação de Padrões;
- Correção de Padrões;
- Previsão de Séries Temporais;
- Aproximação de Funções;
- Suporte à Decisão;
- Extração de Informações.

As áreas de aplicações de RNAs possuem aplicações na biomedicina, economia, administração da produção e engenharia. Este trabalho está relacionado à aplicação de RNAs em engenharia, mais especificamente, em sistemas elétricos de potência, para classificação de transitórios que ocorrem na rede de distribuição quando há geração distribuída.

### 4.1) Perceptron Multicamadas

A Perceptron Multicamadas é uma arquitetura de redes neurais artificiais. Constituída pelas entradas  $x_1, x_2, \dots, x_n$  (dendritos) e saída  $y_1, y_2, \dots, y_m$  (axônio), necessita também dos pesos  $w_1, w_2, \dots, w_n$  para representar o comportamento das sinapses, excitatórias ou inibitórias [16][17]. A Figura 15 representa essa arquitetura.

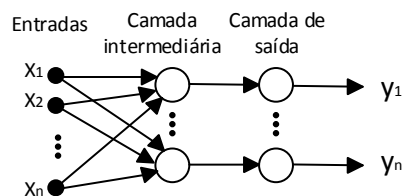


Figura 11: Perceptron Multicamadas.

A justificativa da utilização da arquitetura de múltiplas camadas intermediárias se deve à limitação da arquitetura Perceptron de Camada Simples, que utiliza apenas um neurônio na camada intermediária. Essa limitação se deve ao fato de que a Perceptron de camada simples

resolve apenas problemas linearmente separáveis, ou seja, problemas que possuem soluções que são obtidas através da separação de duas regiões por uma reta [17].

O treinamento da rede neural é supervisionado, ou seja, um grupo de dados de entrada e resposta esperada serão utilizados para que a rede possa aprender e estabelecer a matriz de pesos. Caso este procedimento seja executado com eficiência, a rede neural estará apta a responder corretamente para diferentes entradas.

Os neurônios artificiais nas redes Perceptron Multicamadas são encontrados nas seguintes camadas [16]-[18]:

- **Camada de Entrada:** É a camada de neurônios responsável por receber os sinais de entrada.
- **Camada Intermediária (oculta):** Na configuração Perceptron Multicamadas, é normal haver mais de uma camada intermediária. Essa camada é responsável por definir uma reta no espaço de decisão e pode receber os dados da camada de entrada ou de outra camada oculta. Então, pode-se concluir que essas camadas da rede neural são detectores de características, as quais são representadas através dos pesos sinápticos. Pesquisas sobre o número de camadas intermediárias necessárias para implementar uma rede neural indicam que:
  1. Uma camada é suficiente para aproximar qualquer função contínua;
  2. Duas camadas são suficientes para aproximar qualquer função matemática.
- **Camada de Saída:** Combina as regiões formadas pelas camadas intermediárias, definindo o espaço de saída da rede.

Para a escolha do número de unidades em cada camada, os seguintes fatores devem ser considerados:

1. Quantidade de exemplos de treinamento;
2. A quantidade de ruído contido nos exemplos;
3. A complexidade do problema que será aprendido pela rede;
4. Distribuição estatística dos dados de treinamento.

O número de neurônios em cada camada deve ser selecionado com cuidado, pois caso seja realizado de forma qualquer, poderão ocorrer os seguintes problemas [17]:

- **Overfitting:** É causado por utilizar mais neurônios do que realmente necessita. Isto pode levar a rede a memorizar os dados do treinamento, tornando-se incapaz de generalizar.

5. **Underfitting:** Ao utilizar-se de número de unidades de neurônios inferiores ao número necessário, pode ser que a rede gaste muito tempo para aprender, podendo não alcançar os pesos adequados.

A Figura 16 ilustra a diferença entre *Overfitting* e *Underfitting* [17]. A topologia 1 exemplifica um treinamento que apresentou *overfitting*, pois apresentou maior erro frente as amostras de teste e menor erro frente as amostras de treinamento. A topologia 2 apresentou maior erro frente as amostras de treinamento em relação às amostras de teste, o que caracteriza *underfitting*.

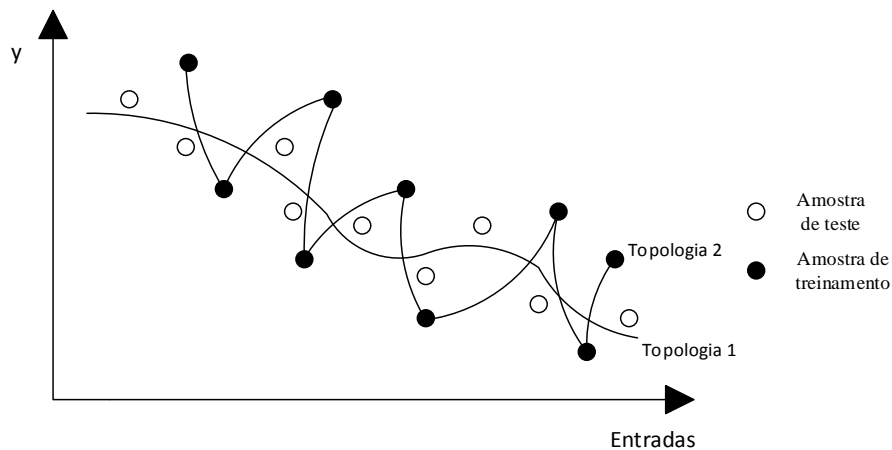


Figura 12: Exemplo de topologias com diferente número de neurônios na camada de intermediária.

#### 4.2) Função de Ativação

Ao valor obtido da combinação linear das entradas e adição do limiar de ativação, é aplicada uma função que apresenta valores de saída limitados, que forneça valores compatíveis com a resposta do neurônio. A função de ativação é a resposta do neurônio para o conjunto de estímulos recebidos, chamada de camada de saída do neurônio artificial. A seguir são apresentadas as funções de ativação possíveis:

- **Função Degrau:** É uma função binária. Sua saída é igual a 1 ou 0 (Equação 4.1). A Figura 17 representa a função degrau.

$$f(x) = \begin{cases} 1, & \text{se } x \geq 0 \\ 0, & \text{se } x < 0 \end{cases} \quad (4.1)$$

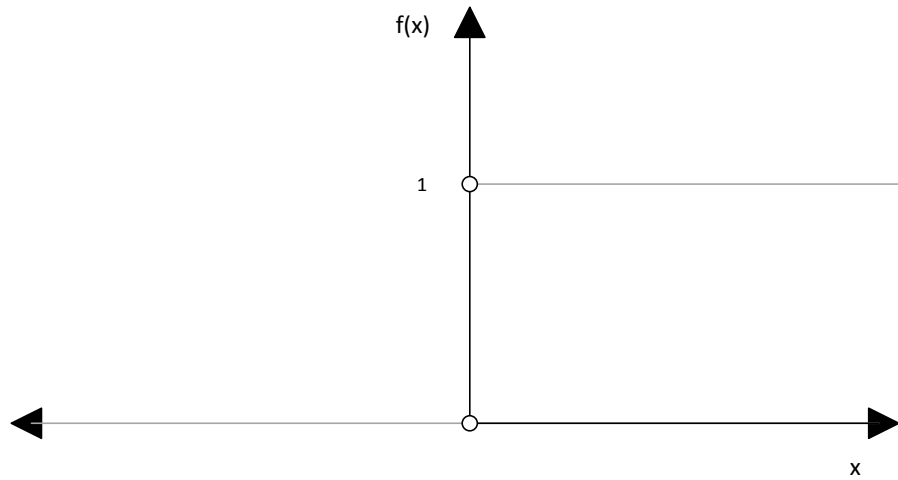


Figura 13: Função Degrau Unitário.

- **Função Degrau Bipolar:** A saída pode assumir três valores: -1, 0 ou 1. Valor -1 para potencial de ativação menor que zero, valor 0 para potencial de ativação nulo e valor 1 para potencial de ativação maior que 0 (Equação 4.2). A Figura 18 representa essa função.

$$f(x) = \begin{cases} 1, & \text{se } x > 0 \\ 0, & \text{se } x = 0 \\ -1, & \text{se } x < 0 \end{cases} \quad (4.2)$$

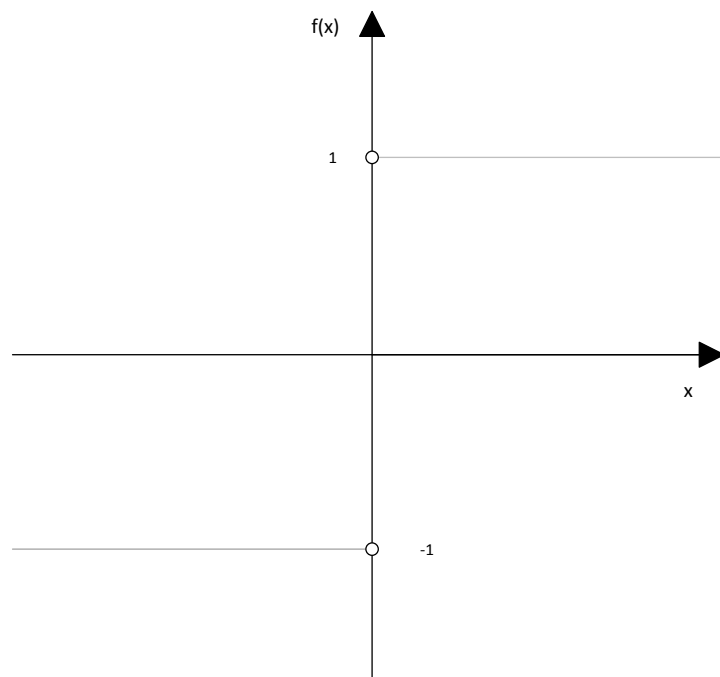


Figura 14: Função Degrau Bipolar.

- **Função Rampa Simétrica:** Os valores de saída são iguais aos valores da entrada para o intervalo  $[-y,y]$  (Equação 4.3). A Figura 19 representa essa função.

$$f(x) = \begin{cases} a, & \text{se } x > a \\ x, & \text{se } -a \leq x \leq a \\ -a, & \text{se } x < -a \end{cases} \quad (4.3)$$

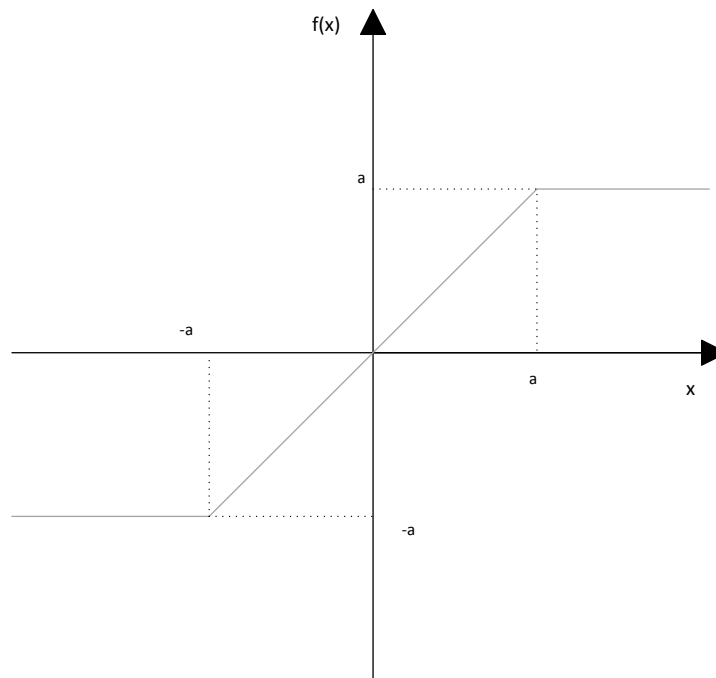
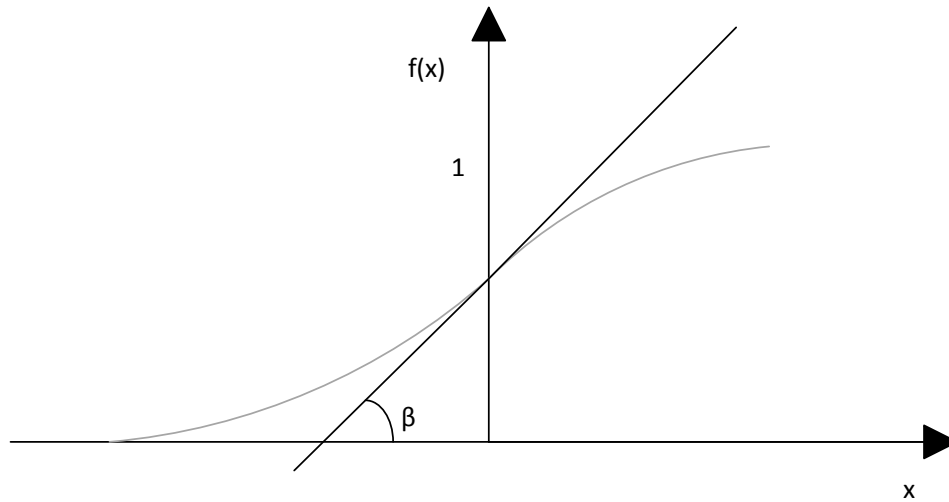


Figura 15: Função Rampa Simétrica.

- **Função Logística:** Esta função pode assumir valores entre 0 e 1. Sua função de ativação é fornecida pela equação (4.4). A Figura 20 representa essa função.

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-\beta x}} \quad (4.4)$$

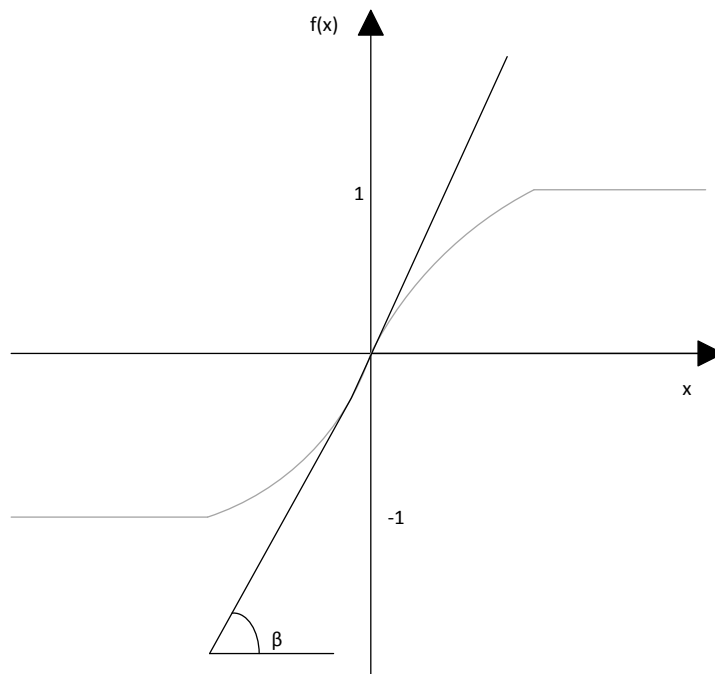


**Figura 16: Função Logística.**

O valor  $\beta$  indica nível de inclinação da função em relação ao seu ponto de inflexão.

- **Função Tangente Hiperbólica:** A saída desta função pode variar entre -1 e 1. O ponto de inflexão é o ponto (0,0). Esta função é representada pela equação (4.5) e pela Figura 21:

$$g(x) = \frac{1 - e^{-\beta x}}{1 + e^{-\beta x}} \quad (4.5)$$



**Figura 17: Função Tangente Hiperbólica.**

O valor  $\beta$ , assim como na função logística, indica o nível de inclinação com relação ao seu ponto de inflexão.

### **4.3) Método de Treinamento: Gradiente Conjugado Escalonado**

Os métodos de treinamento que utilizam em sua essência o gradiente conjugado remetem à busca unidimensional para determinar a aprendizagem. Este processo é extremamente custoso computacionalmente, pois envolve diversas avaliações da função e sua derivada, que consomem grande recurso computacional [19].

A escolha do algoritmo de gradiente conjugado escalonado de Moller justifica-se por sua velocidade de convergência, baixo uso de recurso computacional e boa taxa de convergência, características fundamentais em problemas desta complexidade. Este método de treinamento é de segunda ordem. Este algoritmo utiliza abordagem de Levenberg-Marquardt, que busca fazer um escalonamento do passo de ajuste, evitando a busca unidimensional a cada iteração. Este método utiliza o vetor de parâmetros e escalares iniciais para o cálculo do gradiente da informação de primeira ordem até a convergência. Após isso, há o cálculo da informação de segunda ordem, e em seguida, é calculada uma taxa de ajuste e a taxa de comparação, que são utilizadas para atualizar o vetor de pesos. Este procedimento é realizado até encontrar o valor do parâmetro de comparação for mínimo [19][20].

### **4.4) Neural Network Toolbox**

Para realizar os procedimentos de rede neural, foi utilizado o *Neural Network Toolbox* do *Matlab*. Essa ferramenta fornece funções e aplicativos para a modelagem de sistemas não-lineares complexos. Ela também suporta o aprendizado não supervisionado com mapas auto-organizáveis e camadas competitivas.

A partir dessa ferramenta é possível projetar, treinar, visualizar e simular. A aplicabilidade desta ferramenta se adequa para ajuste de curvas, reconhecimento de padrões, previsão de séries temporais e modelagem do sistema dinâmico e controle [21].

Essa ferramenta vem sendo utilizada para aplicações como [21]:

- Exploração mais segura de jazidas de petróleo pela Halliburton;
- Pesquisas para previsão de crises financeiras;
- Estudo de compatibilidade de corações transplantados.

#### 4.5) Aplicações da *Neural Network Toolbox*

Ao iniciar o *toolbox*, é possível escolher a aplicação da RNA. A Figura 11 ilustra as aplicações disponíveis na ferramenta.

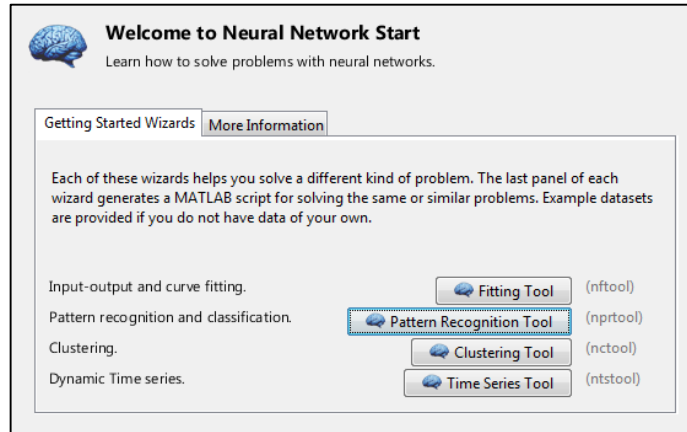


Figura 18: Aba inicial do Neural Network Toolbox.

Como o escopo deste trabalho é de reconhecimento de padrões e classificação, foi utilizada a ferramenta *Pattern Recognition Tool*.

#### 4.6) Metodologia da *Pattern Recognition Tool*

Após a escolha da abordagem mais apropriada para o problema, basta entrar com as matrizes de dados e as respectivas saídas desejadas. A Figura 12 demonstra como se selecionam os dados de entrada e a saída desejada para esse conjunto.

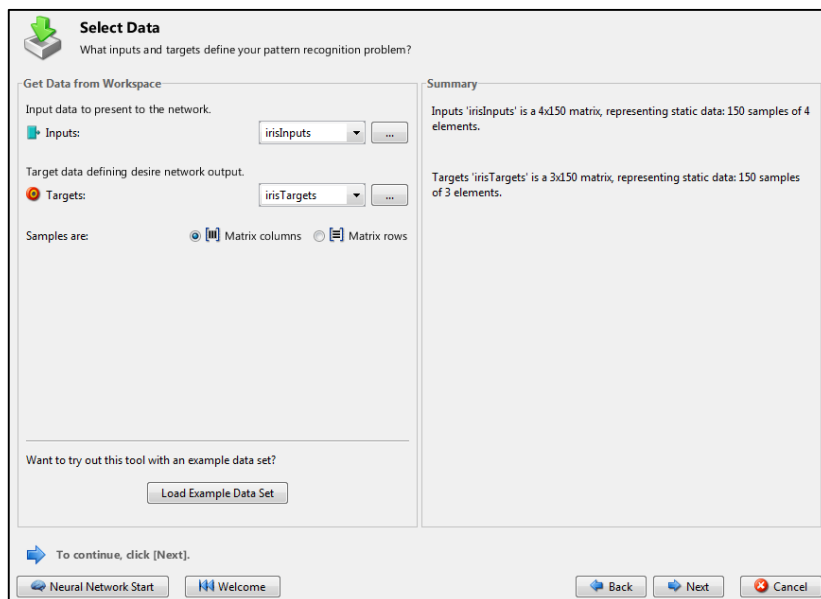
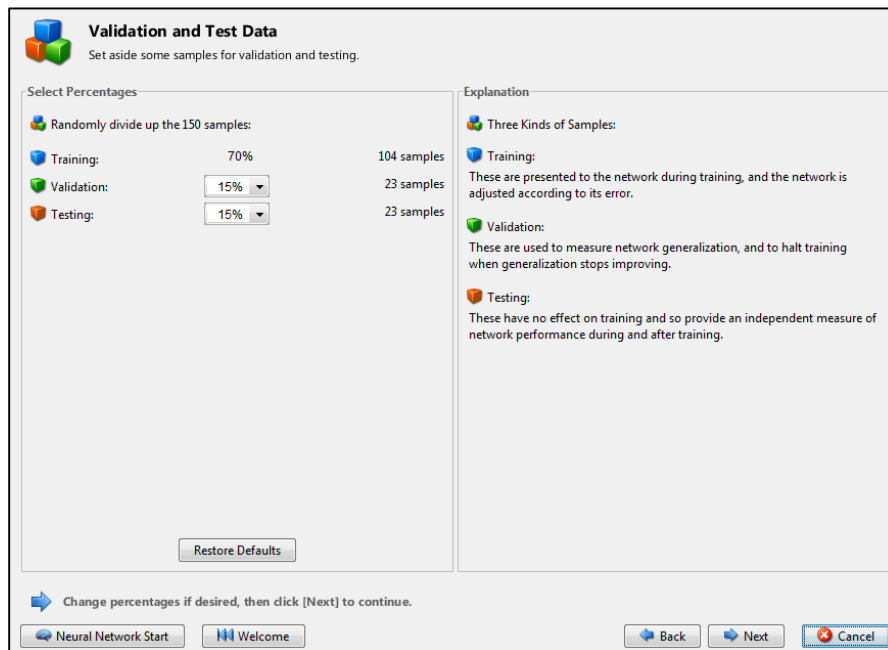


Figura 19: Janela para inserir dados.

Após a inserção dos dados, é necessária a escolha da proporção de vetores que serão utilizados para a fase de treinamento, validação e teste. Durante o processo de treinamento, um critério para parada é a validação. Um dos critérios de parada do treinamento é a classificação correta de 6 amostras separadas no conjunto de validação, de forma sequencial. A Figura 13 mostra esse procedimento.



**Figura 20: Escolha da proporção de dados utilizadas para cada aplicação de RNA.**

É necessário nesta etapa escolher o número de neurônios da camada escondida. A Figura 14 mostra como se determina o número de neurônios na camada escondida. Deve-se escolher o número adequado de neurônios na camada escondida, a fim de obter a convergência ou para a obtenção de resultados satisfatórios.

**Network Architecture**  
Set the dimensions of the self-organizing map's output layer.

Hidden Layer  
Define a pattern recognition neural network. (patternnet)  
Number of Hidden Neurons:

Recommendation  
Return to this panel and change the number of neurons if the network does not perform well after training.

Restore Defaults

Neural Network

The diagram illustrates a feedforward neural network with three layers: an Input layer with 4 neurons, a Hidden Layer with 10 neurons, and an Output Layer with 3 neurons. Each layer is represented by a box containing a weight matrix 'W' and a bias 'b', followed by an addition node '+' and an activation function block. The flow of information is indicated by arrows connecting the layers from left to right.

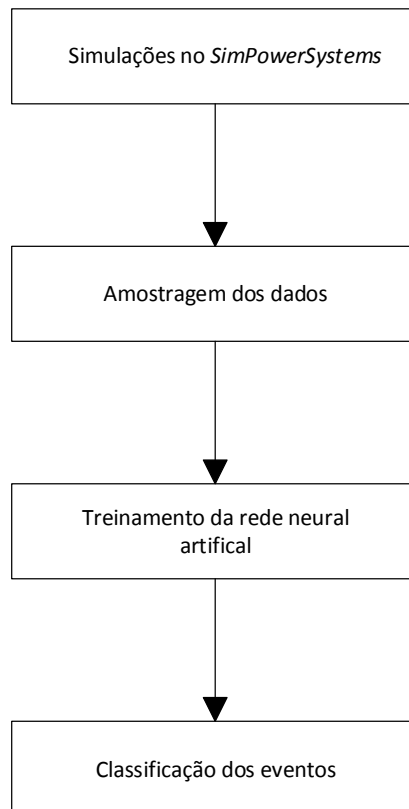
Change settings if desired, then click [Next] to continue.

Neural Network Start Welcome Back Next Cancel

**Figura 21: Escolha do número de neurônios na camada escondida.**

## 5) Metodologia do Trabalho

Este trabalho busca implementar um método inteligente para detecção de ilhamentos de geradores distribuídos. Para isso, foi estudado o sistema da Figura 10. Buscou-se conhecer o perfil de tensão de uma fase no acoplamento do gerador em regime permanente, no momento de chaveamento de cargas e durante o ilhamento. A partir destes dados, foi possível treinar uma RNA para reconhecer e classificar os eventos. A metodologia do trabalho segue o fluxograma da Figura 22.



**Figura 22: Etapas do desenvolvimento deste trabalho.**

A etapa de simulações no *SimPowerSystems* busca analisar diversas situações que podem ocorrer em um sistema elétrico: situações em que há ilhamento que apresentem subfrequência ou sobrefrequência, e situações de retirada ou entrada de cargas. A simulação foi realizada em um período de quinze segundos, sendo que o evento de ilhamento ou chaveamento ocorre aos dez segundos.

A amostragem de dados busca segmentar os dados que são interessantes para seguir com o treinamento da rede neural artificial e tomar 64 amostras por ciclo dos primeiros nove ciclos completos após a realização do evento estudado e dos dois últimos ciclos completos pré-evento.

Após a obtenção dos dados, faz-se o treinamento da rede neural artificial com 70% dos dados obtidos para obter a melhor configuração da rede neural artificial.

Com 25% dos dados não coincidentes com os dados de treinamento, houve o processo de testes para obter resposta da rede neural artificial.

### **5.1) Simulações no *SimPowerSystems***

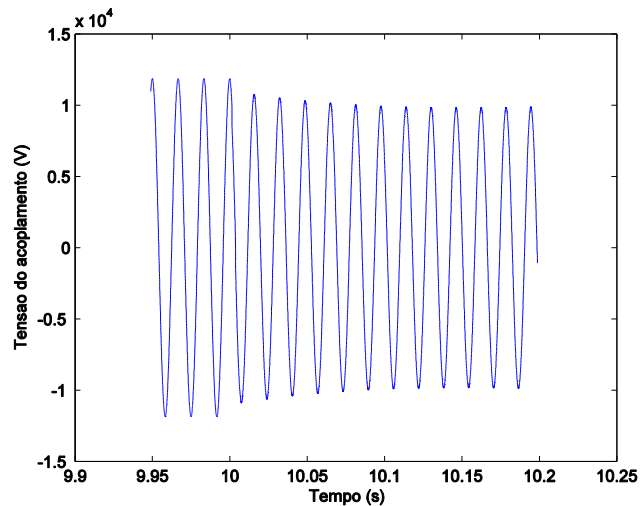
Para a obtenção dos dados para serem a entrada da rede neural artificial, foi utilizado o *SimPowerSystems* para realizar a simulação. O sistema analisado foi o sistema da Figura 10. Foram realizadas simulações de ilhamento, chaveamento da carga mais próxima (carga B6) do gerador distribuído e chaveamento da maior carga do sistema (carga B10), variando-se tanto a carga quanto a potência do gerador distribuído para todos os casos, a fim de obter casos em que se tenha subfrequência e sobrefrequência. Estas situações serão mais bem descritas nas subseções seguintes.

#### **5.1.1) Ilhamento com potência de gerador distribuído variando e carga constante**

Nesta simulação foram mantidos os parâmetros das cargas (veja anexo A), ou seja, suas potências ativas e reativas ficaram constantes durante toda a simulação. A tensão de referência do controlador de tensão e velocidade do rotor foi mantida constante em 1 pu, em todas as simulações (ilhamento ou chaveamento). A potência de referência do controle de velocidade foi variada de 0,1 a 0,9 pu para obter diversos casos de variação do desbalanço de potência ativa.

O tempo de simulação foi de quinze segundos, sendo dez segundos pré-evento e os últimos cinco segundos de pós-evento. Ao atingir o tempo de dez segundos, o disjuntor da Figura 10 é aberto, ocasionando o ilhamento.

A Figura 23 demonstra a simulação desta situação para a potência ativa de 2,76 MW. A potência de referência do controlador é de 0,18 pu. Todos as tensões dos gráficos desta seção estão em valor de pico.



**Figura 23: Comportamento da tensão no ponto de acoplamento.**

Como pode ser observado na Figura 23, há uma queda de tensão no acoplamento do gerador síncrono com a rede assim que ocorre o ilhamento. Como neste caso há déficit de potência ativa e reativa, haverá desaceleração do gerador síncrono (então haverá subfrequência) e redução do nível de tensão. A tensão e a frequência tendem a voltar ao valor normal devido ao controle do gerador síncrono.

Devido ao fato de que todo o período da simulação não é de interesse para obter os casos para estudo da rede neural, este trabalho se concentrou nos primeiros nove ciclos completos pós-evento (para todos os casos simulados) e nos últimos dois ciclos completos antes de haver o evento (ilhamento ou chaveamento).

### **5.1.2) Ilhamento com potência ativa do gerador constante e cargas variando**

Nesta simulação foi mantido o parâmetro a potência de referência do controlador do gerador distribuído em 0,9 pu, variando-se a potência ativa e reativa das cargas entre 0,1 e 0,9 pu, semelhante à simulação anterior.

Ao atingir o tempo de dez segundos, a subestação da concessionária é retirada do sistema, deixando o sistema abastecido exclusivamente pelo gerador distribuído.

Na Figura 24 pode ser observada a forma de tensão de uma fase no ponto de acoplamento do gerador distribuído para a situação em que a potência ativa e reativa de todas as cargas são fixadas em 0,13 pu.

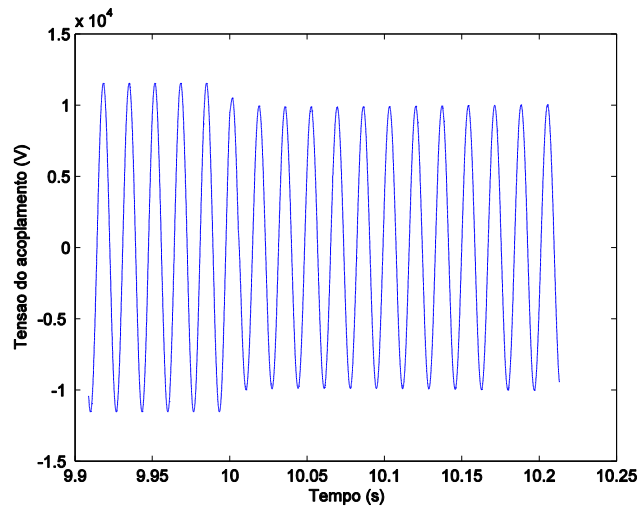


Figura 24: Comportamento da tensão no ponto de acoplamento.

Como pode ser observado na Figura 24, há uma queda de tensão no ponto de acoplamento do gerador síncrono, elevando após alguns instantes, buscando retomar o valor anterior. No instante do ilhamento havia excesso de potência ativa e déficit de potência reativa. O excesso de potência ativa será responsável pela sobrefrequência do sinal, que tenderá a voltar para 60 Hz devido ao controle do gerador. O déficit de potência reativa fará com que exista abaixamento da tensão, que será corrigida pelo controle do gerador, que não responde instantaneamente, uma vez que o gerador possui capacidade de geração maior que a potência demandada.

### 5.1.3) Retirada da maior carga, variando-se a potência do gerador distribuído

Esta simulação consiste em utilizar as cargas com seus valores nominais fixos, variar a potência de referência do controle do gerador. Ao atingir o tempo de dez segundos, é retirada a Carga B10, maior carga do sistema. A Figura 25 mostra a simulação em que todas as cargas possuíam seu valor nominal e a potência do gerador é fixada em 0,69 pu.

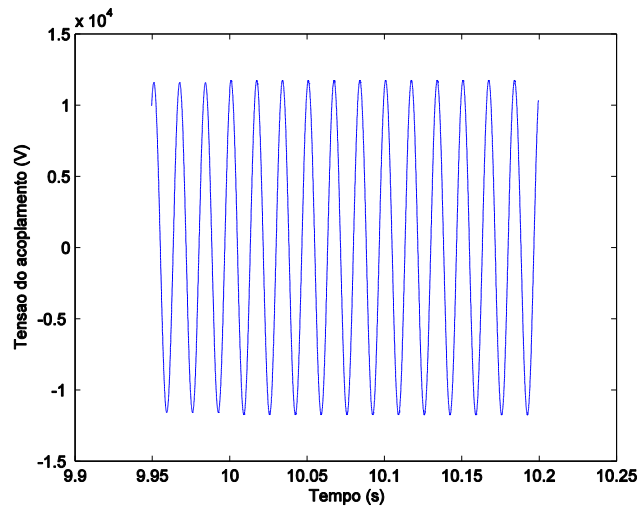


Figura 25: Comportamento da tensão no ponto de Acoplamento.

Há pequena elevação na tensão ao retirar a carga B10 do sistema. A elevação da carga é explicada devido a menor corrente que irá circular pelo alimentador, causando menor queda de tensão. A elevação da tensão pode ser observada para as situações 5.1.4, 5.1.9 e 5.1.10.

#### 5.1.4) Retirada da maior carga, variando-se a potência das cargas

Esta simulação, como na anterior de manter a potência de referência do controlador do gerador em 0,9 pu. As simulações em que vai chavear cargas, as potências das cargas chaveadas são fixadas em 1,0 pu, enquanto as que são mantidas no sistema são variadas. A Figura 26 mostra um caso em que as cargas estão com 0,69 pu de potência ativa e reativa.

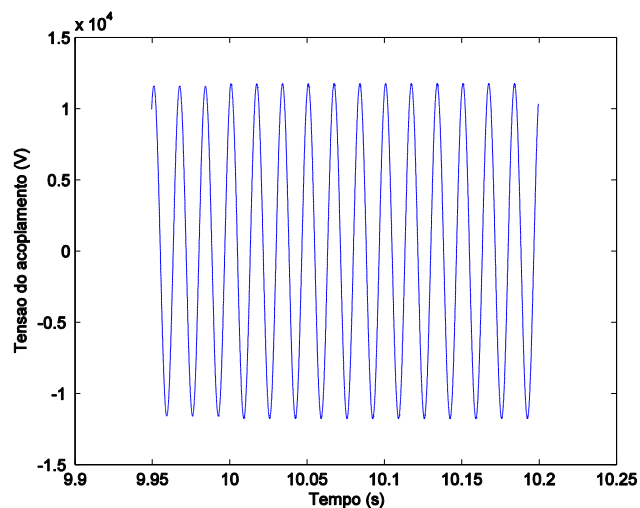


Figura 26: Comportamento da tensão no ponto de Acoplamento.

### 5.1.5) Entrada da maior carga, variando-se a potência do gerador distribuído

Segue os mesmos passos da seção 5.1.4, apenas diferenciando que neste momento a carga é conectada ao sistema. A Figura 27 mostra a simulação em que todas as cargas possuíam seu valor nominal e a potência do gerador em 0,30 pu.

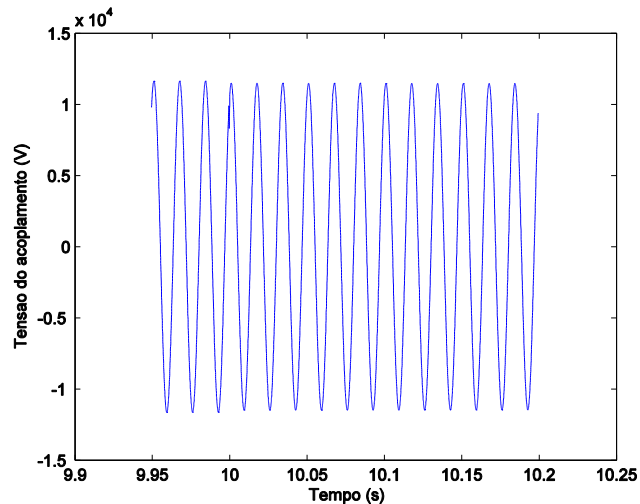


Figura 27: Comportamento da Tensão no ponto de Acoplamento.

Há pequeno abaixamento na tensão ao entrar a carga B10 do sistema. A elevação da carga é explicada devido a maior corrente que irá circular pelo alimentador, causando maior queda de tensão. O abaixamento da tensão pode ser observado para as situações 5.1.5, 5.1.7 e 5.1.8.

### 5.1.6) Entrada da maior Carga, variando-se a potência das cargas

Segue os mesmos passos da seção 5.1.5, apenas diferenciando que neste momento a carga é conectada ao sistema. A Figura 28 mostra um caso em que as cargas estão com 0,69 pu de potência ativa e reativa.

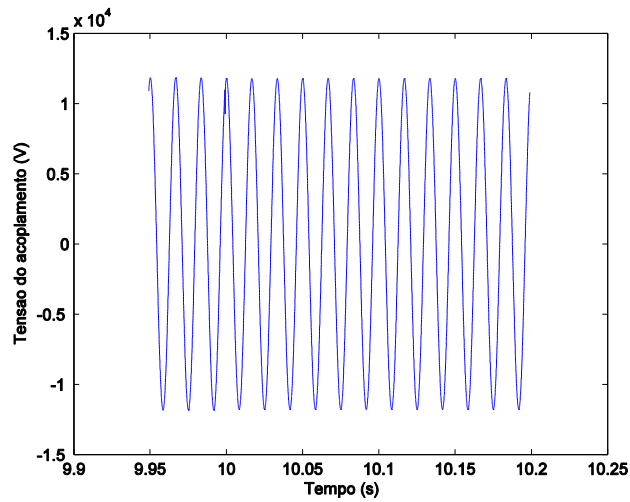


Figura 28: Comportamento da Tensão no ponto de Acoplamento.

### 5.1.7) Entrada da carga mais próxima do gerador distribuído, variando-se a potência do gerador distribuído

Esta simulação consiste em utilizar as cargas com seus valores nominais fixos, variando a potência da referência do controle do gerador e, ao atingir o tempo de dez segundos, a Carga B6, carga mais próxima do gerador distribuído, é conectada ao sistema. A Figura 29 retrata o caso em que a potência de referência do controlador de potência do gerador foi fixada em 0,80 pu.

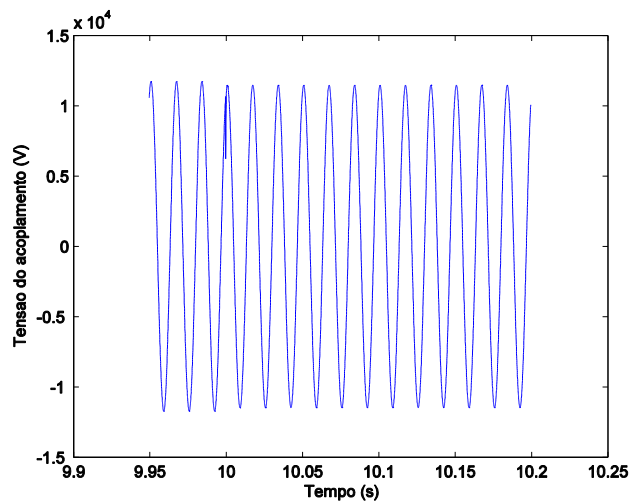


Figura 29: Comportamento da Tensão no ponto de Acoplamento.

### 5.1.8) Entrada da carga mais próxima do gerador distribuído, variando-se a potência das cargas

Esta simulação consiste em variar a potência das cargas não chaveadas, mantendo fixa a potência de referência do controle do gerador, ao atingir o tempo de dez segundos, a Carga B6, carga mais próxima do gerador distribuído, é conectada ao sistema. A Figura 30 mostra um caso em que as cargas estão com 0,80 pu de potência.

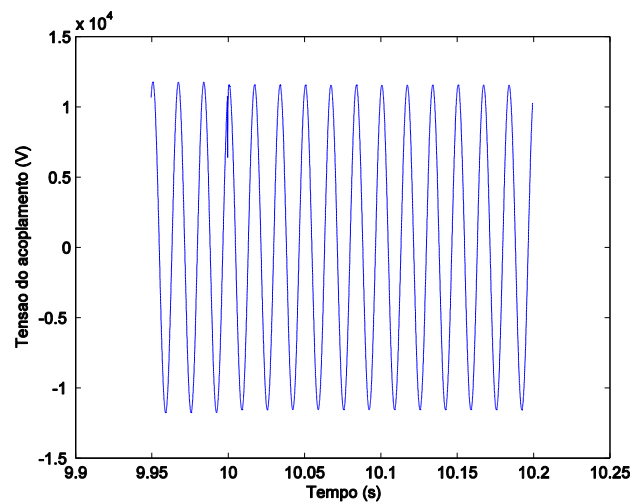


Figura 30: Comportamento da Tensão no ponto de Acoplamento.

### 5.1.9) Saída da carga mais próxima do gerador distribuído, variando-se a potência do gerador distribuído

Esta simulação segue os procedimentos da seção 6.1.7, contudo, a Carga B6 será retirada do sistema. A Figura 31 mostra o caso em que a potência de referência do controlador foi fixada em 0,14 pu. Observa-se elevação da tensão no momento do chaveamento.

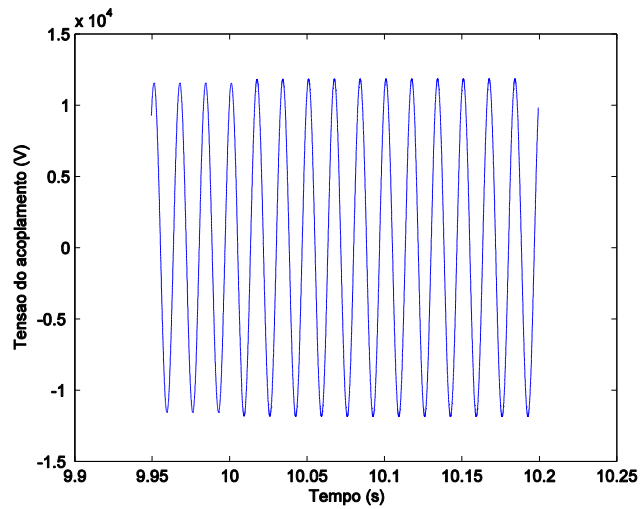


Figura 31: Comportamento da Tensão no ponto de Acoplamento.

### 5.1.10) Saída da carga mais próxima do gerador distribuído, variando-se a potência das cargas

Esta simulação segue os procedimentos da seção 6.1.8, contudo, a Carga B6 será retirada do sistema. A Figura 32 mostra o caso em que a potência das cargas, exceto a chaveada, foram fixadas em 0,14 pu, observa-se elevação da tensão no momento do chaveamento.

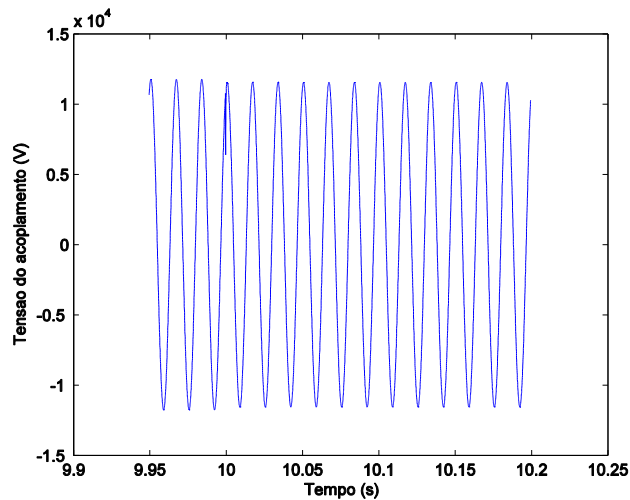


Figura 32: Comportamento da Tensão no ponto de Acoplamento.

### 5.2) Amostragem dos dados

A janela de dados utilizada foi estabelecida devido à generalização do que foi observado em [16]. Conforme esse trabalho, a janela de dados de um ciclo apresentou resultados bem

superiores se comparados ao janelamento de meio ciclo e de dois ciclos. Ainda, janelamentos de dois e meio ciclo tendem a não convergir, o que não foi observado em janelamento de um ciclo.

O janelamento utilizado neste trabalho foi de um ciclo, sendo tomado quando o valor da senoide passa de negativo para positivo. Pode ser observado o resultado dessa amostragem na Figura 33.

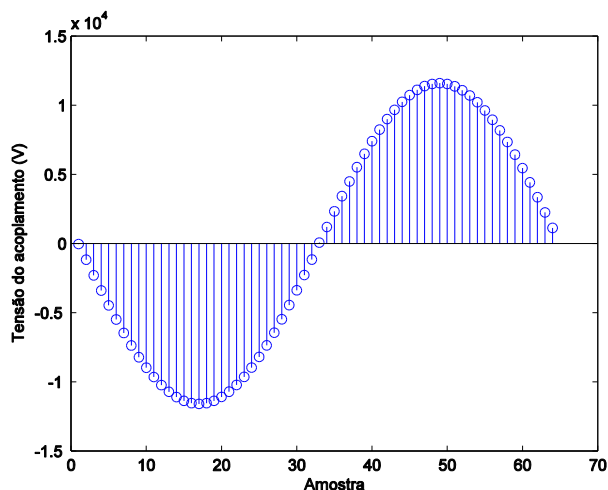


Figura 33: Amostragem de um ciclo de janelamento utilizado no trabalho.

Foram obtidas 64 amostras por ciclo de cada um dos primeiros 9 ciclos completos pós evento e dos 2 últimos ciclos completos pré-evento.

### 5.3) Treinamento da rede neural artificial

A escolha da arquitetura Perceptron Multicamadas deve-se à existência de trabalhos anteriores que demonstraram bons resultados na identificação de ilhamentos [16]. Devido às particularidades dos sistemas de distribuição analisados neste trabalho e em [16], foi analisado o número de neurônios na camada escondida mais apropriado para este trabalho. O Anexo B mostra o estudo realizado para definir o melhor número de neurônios para análise do resultado do trabalho. Conforme pode ser observado, a melhor configuração analisada possui doze neurônios na camada intermediária, pois apresentou o menor erro quadrático médio na etapa de teste e demonstrou grande poder de generalização. Todos os neurônios possuem como função de ativação a tangente hiperbólica, inclusive a camada de saída, por definição do *Neural Network Toolbox* para esse tipo de aplicação da rede neural artificial.

### 5.4) Classificação dos eventos

Conforme especificado nas simulações do *SimPowerSystems*, foram obtidos dados da operação em regime permanente, em chaveamentos de cargas e ilhamentos. Os dados de saída foram classificados em duas classes:

- Classe 0: todos eventos de operação em regime da rede e chaveamentos de cargas;
- Classe 1: todos eventos de ilhamento.

A partir dessa classificação de alguns casos que não foram utilizados no treinamento, foi possível obter a resposta da rede neural artificial para os casos separados para teste da rede.



## 6) Análise dos Resultados

A partir da metodologia descrita no capítulo anterior, foram realizadas as simulações e os resultados obtidos segues discutidos neste capítulo.

A curva do erro médio quadrático pelo número de épocas fornece a informação se as respostas foram decoradas ou aprendidas pela RNA. A Figura 34 ilustra o comportamento da rede neural treinada e testada neste trabalho.

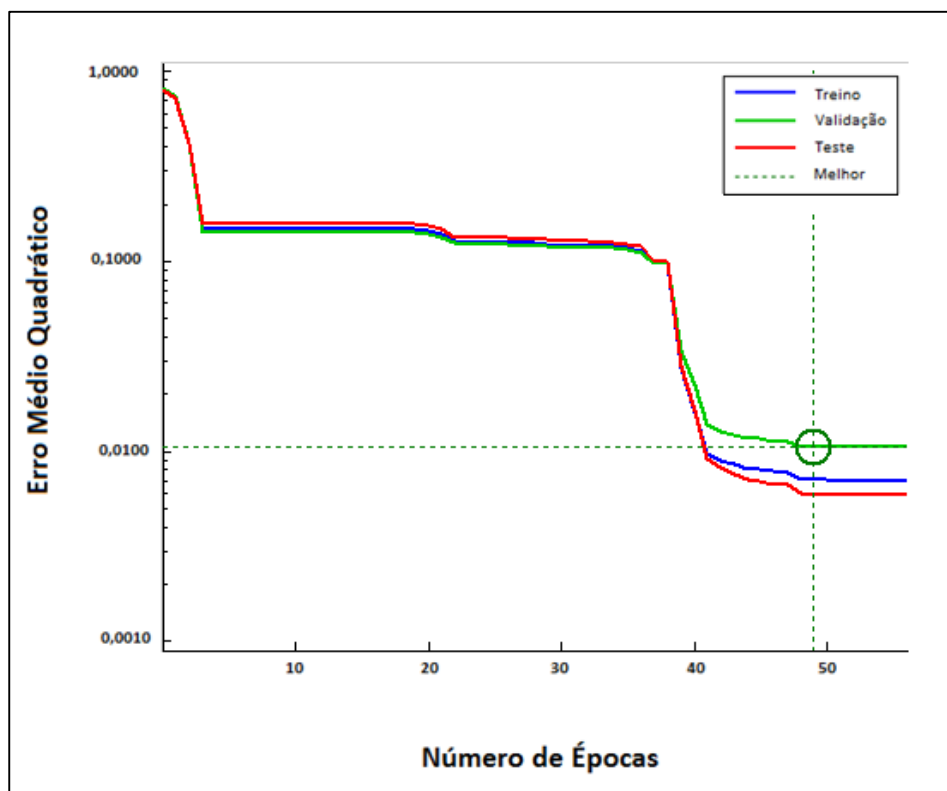


Figura 34: Gráfico do erro médio quadrático pelo número de épocas.

Como pode ser observado na Figura 34, o erro médio quadrático do ensaio de conjunto de testes mostrou-se menor em relação ao ensaio de treinamento. Assim, é garantido que não há sobredimensionamento de neurônios na camada intermediária, garantindo também a capacidade de generalização da RNA.

A partir dos casos simulados, foram obtidos 9352 vetores analisados. Do montante total, foram utilizados 70% dos vetores para treinamento (7545 vetores), 5% para validação (467 vetores) e 25% dos vetores para teste (2340 vetores). A Tabela 4 demonstra resultado do treinamento da rede, mostrando o tipo de evento e sua classificação da rede neural artificial. A Tabela 5 demonstra o resultado dos testes da rede neural, mostrando o tipo de evento e sua classificação. Observa-se que 99,24% dos vetores de treinamento foram classificados

corretamente, enquanto 99,36% dos vetores de teste foram classificados de forma equivocada. Isso demonstra que a rede possui bom poder de generalização e grande confiabilidade nos resultados obtidos.

**Tabela 4: Resultado do Treinamento da RNA.**

	Evento 1	Evento 0
Classificação da RNA como 1	962	44
Classificação da RNA como 0	6	5539

**Tabela 5: Resultado do Teste da RNA.**

	Evento 1	Evento 0
Classificação da RNA como 1	366	3
Classificação da RNA como 0	12	1959

Analisando as tabelas de resultado do teste de RNA (Tabela 5), observam-se 12 casos deilhamento classificados como não ilhamento. Para casos de não ilhamento classificados como ilhamento há apenas 3 casos. Além disso, também foi observado que não há casos em que o chaveamento da maior carga do sistema (e mais distante) são classificados como ilhamento.

A seguir, uma análise de alguns casos da etapa de teste da RNA.

b) Situação 1: Chaveamento de carga classificado como chaveamento de carga

O vetor analisado foi um vetor da Situação 1 do Anexo C. Este vetor corresponde a uma simulação de retirada da maior carga, variando-se a potência do gerador distribuído. Como resultado da RNA, a Tabela 6 representa os valores:

**Tabela 6: Valor de saída obtido e valor desejado.**

Valor da Saída	Valor Desejado
0,0015	0

Portanto, este caso foi classificado como classe 0.

c) Situação 2: Ilhamento classificado como ilhamento

O vetor analisado foi um caso do vetor Situação 2 do Anexo C. Este vetor corresponde a uma simulação de ilhamento com potência do gerador fixada em 0,9 pu. Como resultado da RNA, a Tabela 7 representa os valores:

**Tabela 7: Valor de saída obtido e valor desejado.**

Valor da Saída	Valor Desejado
0,9792	1

Portanto, este caso foi classificado como classe 1.

d) Situação 3: Chaveamento de carga classificado como ilhamento

Através da análise de todos os vetores, foi observado que apenas ocorreu este tipo de erro quando ocorre há entrada da carga próxima do gerador distribuído, sendo a potência do gerador próxima da demanda das cargas. Este erro foi encontrado até a sexta amostra de cada simulação. Um exemplo deste caso é retratado pelo Situação 3 do Anexo C. O resultado da RNA é apresentado na Tabela 8.

**Tabela 8: Valor de saída obtido e valor desejado.**

Valor da Saída	Valor Desejado
0,9999	0

Portanto, este caso foi classificado como ilhamento apesar de ser entrada de carga próxima ao gerador.

e) Situação 4: Ilhamento classificado como operação normal ou chaveamento de carga

Através da análise de todos os vetores, foi observado que apenas ocorreu este tipo de erro entre primeiro e segundo ciclo de cada simulação. A classificação foi equivocada apenas nos casos em que a potência do gerador distribuído era muito maior que a potência consumida pelas cargas durante entrada da maior carga no sistema. Um exemplo deste caso é retratado por um caso da Situação 4 do Anexo C. O resultado da RNA é apresentado na Tabela 9.

**Tabela 9: Valor de saída obtido e valor desejado.**

Valor da Saída	Valor Desejado
0,4558	1

Como pode ser observado, não houve a classificação como ilhamento para situações como essa.



## 7) Conclusão

Este trabalho buscou, a partir do sistema elétrico adotado, conhecer o comportamento do mesmo em algumas condições, como funcionamento em regime permanente, após alívio e tomada de cargas e ilhamento, para diferentes condições de geração e de carga. A partir disso, foi analisada uma RNA para reconhecer o ilhamento do sistema, fenômeno indesejado pela concessionária. As principais conclusões do trabalho são:

- A escolha do melhor número de neurônios da camada intermediária da RNA é de grande importância, pois um número elevado de neurônios confere maior tempo para obtenção da resposta. Por outro lado, um número insuficiente, pode levar a respostas com muitos erros. A escolha do número ideal de neurônios foi empírica.
- Para a maioria dos casos, a RNA implementada mostrou excelente resposta aos vetores testados, falhando em poucas situações. Isso mostra que o janelamento de um ciclo se mostrou satisfatório, porém, não se deve utilizar apenas um ciclo para determinar o evento. Como não foi observada classificação errada de três ciclos da mesma situação da simulação, a escolha de avaliação de quatro ou mais ciclos consecutivos garante maior confiabilidade na obtenção da resposta. Em 2340 casos testados, apenas 15 foram classificados errados. Esses casos foram exclusivos de algumas situações: potência do gerador próxima à potência demandada das cargas durante entrada de carga (3 casos); e ilhamento com a potência das cargas muito inferior a potência gerada (12 vetores).
- Para um pequeno desbalanço de potência não houve problemas de identificação de ilhamento do sistema, como ocorre com os métodos passivos. Isso proporciona a este método uma forma de auxiliar os relés de tensão, salto de vetor e de frequência na detecção do ilhamento.

Para trabalhos futuros, novas condições podem ser simuladas, como curtos-circuitos e a inclusão de mais geradores distribuídos. Além disso, o algoritmo pode ser embarcado em algum tipo de *hardware* e seu desempenho validado por meio de simuladores em tempo real, caracterizando um relé inteligente para detecção de ilhamento.



## Referências Bibliográficas

- [1] VIEIRA JÚNIOR, **Metodologias para Ajuste e Avaliação do Desempenho de Relés de Proteção Anti-Ilhamento de Geradores Síncronos Distribuídos**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), 2006.
- [2] ACKERMANN, T.; ANDERSSON, G.; SÖDER, L. Distributed generation: a definition. **Electric Power System Research**, v. 57, n. 3, p. 195-204, 2001.
- [3] JENKINS, N.; ALLAN, R.; CROSSLEY, P.; KIRSCHEN, D.; STRBAC, G. **Embedded Generation**, London: The Institute of Electrical Engineers (IEE), 2000.
- [4] HERNANDES, L. **Aplicação de Metodologia das Curvas de Desempenho na Avaliação de Relés de Frequência Comerciais**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica). Universidade de São Paulo (USP), 2009.
- [5] VIEIRA JR, J. C. M. Detecção de ilhamento de geradores distribuídos: uma revisão bibliográfica sobre o tema. **Revista Eletrônica de Energia**, v. 1, n. 1, 2011. Acesso em
- [6] RODRIGUES, F. **Programação da contratação de energia considerando geração distribuída no novo modelo do setor elétrico brasileiro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), 2006.
- [7] ANEEL **Banco de Informações de Geração**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em Setembro de 2013.
- [8] CAMACHO E. F.; SAMAD T.; GARCIA-SANZ, M.; HISKENS I. Control for renewable energy and smart grids. **The Impact of Control Technology, Control Systems Society**, p. 69-88, 2011.
- [9] ANEEL **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST. Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição**. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo3\\_Revisao\\_5.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo3_Revisao_5.pdf)>. Acesso em Setembro de 2013.
- [10] ANEEL **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST. Módulo 9 – Ressarcimento de Danos Elétricos**. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo9\\_Revisao\\_0.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo9_Revisao_0.pdf)>. Acesso em Setembro de 2013.
- [11] LONDERO, R. R.; AFFONSO, C. M., NUNES, M. V.; FREITAS, W. Planned islanding for Brazilian system reliability. In: **Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2010 IEEE PES**. IEEE, 2010. p. 1-6.
- [12] TransÉnergie Technologies Inc **SimPowerSystems User's Guide**, 2009. Disponível em: <[www.mathworks.com](http://www.mathworks.com)>
- [13] PITOMBO, S. O. **Proteção Adaptativa Anti-Ilhamento de Geradores Síncronos Distribuídos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade de São Paulo (USP), 2010.
- [14] KUNDUR, P. **Power System Stability and Control**, 1a ed., McGraw-Hill Inc, 1994.

- [15] INSTITUTO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E COMPUTAÇÃO. **Redes Neurais Artificiais**. Disponível em: <<http://www.icmc.usp.br/~andre/research/neural/index.htm>>. Acesso em Março de 2014.
- [16] MERLIN, V. L. **Metodologia para a Definição de um Algoritmo Baseado em Redes Neurais Artificiais para Detecção de Ilhamento de Sistemas de Geração Distribuída**. Dissertação (Mestrado em Energia). Universidade Federal do ABC (UFABC), 2013.
- [17] SILVA I. N., SPATTI D. H., FLAUZINO R. A. **Redes Neurais Artificiais para engenharia e ciências aplicadas**. 2ª ed., Artliber editora, 2010.
- [18] LABORATÓRIO NACIONAL DE COMPUTAÇÃO CIENTÍFICA. **Perceptron Multi-camadas**. Disponível em: <[http://www.lncc.br/~labinfo/tutorialRN/frm4\\_perceptronMultiCamadas.htm](http://www.lncc.br/~labinfo/tutorialRN/frm4_perceptronMultiCamadas.htm)>. Acesso em Abril de 2014.
- [19] MØLLER, FODSLETTE M. A scaled conjugate gradient algorithm for fast supervised learning. **Neural networks**, v. 6, n. 4, p. 525-533, 1993.
- [20] FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E COMPUTAÇÃO. **Algoritmos de otimização para treinamento supervisionado**. Disponível em: <[ftp://ftp.dca.fee.unicamp.br/pub/docs/vonzuben/theses/Inunes\\_mest/cap3.pdf](ftp://ftp.dca.fee.unicamp.br/pub/docs/vonzuben/theses/Inunes_mest/cap3.pdf)>. Acesso em Abril de 2014.
- [21] MATHWORKS. **Neural Network Toolbox**. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/products/neural-network>>. Acesso em Abril de 2014.

## Anexo A

### Dados do Sistema Elétrico de Potência

Neste anexo, serão detalhados os elementos do sistema elétrico de potência que foi estudado neste trabalho (Figura 10). A nomenclatura aqui utilizada respeita a nomenclatura utilizada pelo *SimPowerSystems*.

Os dados nominais do gerador que representa a subestação da concessionária são representados na Tabela 10.

**Tabela 10: Dados equivalentes a subestação da concessionária.**

Tensão Nominal (kV)	138
Potência de Curto-Circuito (MVA)	499,9
Resistência ( $\Omega$ )	0,1763
Indutância ( $\Omega$ )	1

Os dados nominais dos transformadores do sistema são demonstrados na Tabela 11 e Tabela 12. Essas tabelas serão divididas em duas: transformadores conectados a subestações de energia (concessionária e gerador distribuído) e transformadores conectados a cargas.

**Tabela 11: Dados dos transformadores conectados a subestação de energia.**

	Transformador Subestação 1	Transformador Subestação 2
Potência Nominal (MVA)	25	8
Resistência de Magnetização (pu)	500	500
Indutância de Magnetização (pu)	500	500
Conexão do primário	Delta	Estrela-aterrado
Tensão nominal do primário (kV)	138	11,5
Resistência do primário (pu)	0	0
Indutância do primário (pu)	0,07375	0,03
Conexão do secundário	Estrela-aterrado	Delta
Tensão nominal do secundário (kV)	12,5	11,9
Resistência do secundário (pu)	0	0
Indutância do secundário (pu)	0,07375	0,03

**Tabela 12: Dados dos transformadores conectados as cargas.**

	Transformador 1	Transformador 2
Potência Nominal (MVA)	0,125	0,25
Resistência de Magnetização (pu)	500	500
Indutância de Magnetização (pu)	500	500
Conexão do primário	Delta	Delta
Tensão nominal do primário (kV)	11,9	11,9
Resistência do primário (pu)	0	0
Indutância do primário (pu)	0,01625	0,01625
Conexão do secundário	Estrela-aterrado	Estrela-aterrado
Tensão nominal do secundário (kV)	0,22	0,22
Resistência do secundário (pu)	0	0
Indutância do secundário (pu)	0,01625	0,01625

Os dados das linhas do sistema são mostrados Tabela 13:

**Tabela 13: Dados das linhas do sistema elétrico.**

	Linha 1 Linha 2 Linha 5	Linha 3	Linha 4	Linha 6	Linha 7
Resistência ( $\Omega/\text{km}$ )	0,1876	0,1876	0,3751	0,1875	0,1875
Indutância ( $\Omega/\text{km}$ )	0,4034	0,4034	0,8068	0,4034	0,4034
Comprimento (km)	1	1,5	1,25	0,25	1

As cargas são todas representadas por potências. Há uma parcela de potência ativa e outra parcela de potência reativa indutiva. A Tabela 14 mostra esses dados:

**Tabela 14: Dados das linhas do sistema elétrico.**

	Carga B10	Carga B3	Carga B9	Carga B8	Carga B6
Potência Ativa Nominal (MW)	4,45	0,085	2,76	0,18	3,68
Potência Reativa Nominal Indutiva (MVar)	2,2798	0,0530	1,1750	0,0871	1,57

A Tabela 15 apresenta os dados do gerador distribuído utilizado no sistema elétrico estudado.

**Tabela 15: Dados dos transformadores conectados a subestação de energia.**

Tipo do gerador	polos salientes
Potência nominal (MVA)	12
Tensão nominal (V)	11900
Constante de inércia (s)	1,50
$X_d$ (pu)	2,393
$X'_d$ (pu)	0,305
$X''_d$ (pu)	0,216
$X_q$ (pu)	1,209
$X''_q$ (pu)	0,211
$T'_{do}$ (s)	7,19
$T''_{do}$ (s)	0,052
$T''_{qo}$ (s)	0,202
Resistência do estator (pu)	0,0039
Resistência de dispersão (pu)	0,05



## Anexo B

### Determinação da Rede Neural Artificial

Para determinar a configuração mais apropriada da rede neural, foram testadas diversas configurações para que fosse possível escolher a mais apropriada. A Tabela 16 apresenta todas as situações que foram testadas. Foi escolhida a rede com 12 neurônios na camada escondida, apesar da rede neural com 14 neurônios na camada intermediária apresentou melhor resultado de acordo com a tabela. Esse resultado não foi utilizado pois não foi possível obter novamente uma rede que não apresentasse *overfitting*.

**Tabela 16: Análise de configurações da Rede Neural Artificial.**

Número de neurônios na camada escondida	Número de épocas	Erro Quadrático Médio do Treinamento	Erro Quadrático Médio do Teste
1	40	0,00681	0,00809
2	49	0,00831	0,00721
3	40	0,00742	0,00830
4	44	0,00780	0,00656
5	43	0,00311	0,00327
6	59	0,00210	0,00860
7	45	0,00770	0,00889
8	55	0,00238	0,00213
9	37	0,00637	0,00922
10	47	0,00347	0,00434
11	35	0,00911	0,00806
12	99	0,00333	0,00290
13	51	0,00757	0,00791
14	64	0,00164	0,00210
15	106	0,00090	0,00264
20	42	0,00169	0,00309
30	27	0,00832	0,00708
40	48	0,00729	0,00856



## Anexo C

Para as situações avaliadas no capítulo 7, seguem os vetores na Tabela 17:

**Tabela 17: Vetores analisadas no capítulo 7.**

Situação 1: Chaveamento de carga classificado como chaveamento de carga	Situação 2: Ilhamento classificado como ilhamento	Situação 3: Chaveamento de carga classificado como ilhamento	Situação 4: Ilhamento classificado como operação normal ou chaveamento de carga
-81,9054	-9,3066	-33,0371	-168,365
-1206,6564	-960,483	-119,416	-1854,9
-2364,3312	-1922,98	-214,388	-3073,28
-3454,7974	-2877,97	-434,87	-3901,22
-4556,5934	-3748,42	-620,68	-4624,85
-5570,1242	-4646,44	-831,554	-5527,66
-6574,6662	-5473,35	-1053,34	-6134,36
-7471,5595	-6251,71	-1202,26	-6748,36
-8341,1996	-6975,48	-1411,61	-7189,94
-9086,2235	-7618,76	-1550,09	-7597,45
-9788,4845	-8128,52	-1764,19	-8007,47
-10352,228	-8666,55	-1979,67	-8370,66
-10861,047	-9103,47	-2125,05	-8717,61
-11221,047	-9448,93	-2338,68	-8973,34
-11517,777	-9693,63	-2557,88	-9223,06
-11659,38	-9842,78	-2694,68	-9448,39
-11733,501	-9895,21	-2914,93	-9683,84
-11650,422	-9858,9	-3052,65	-9907,14
-11499,947	-9727,14	-3264,14	-10091,5
-11194,515	-9519,11	-3470,98	-10660,3
-10826,065	-9183,61	-3608,12	-10780,4
-10309,13	-8774,37	-3530,63	-10674,5
-9737,6795	-8271,65	-3538,35	-10346,6
-9028,1978	-7724,97	-3788,74	-9843,01
-8276,5024	-7053,42	-5033,57	-9057,07
-7400,8097	-6130,66	-5802,7	-7995,7
-6498,5327	-5292,76	-6459,46	-7013,09
-5489,335	-4432,27	-6877,51	-5918,96
-4471,911	-3519,25	-8521,31	-4682,4
-3367,0312	-2521,56	-9060,65	-3445,17

Situação 1: Chaveamento de carga classificado como chaveamento de carga	Situação 2: Ilhamento classificado como ilhamento	Situação 3: Chaveamento de carga classificado como ilhamento	Situação 4: Ilhamento classificado como operação normal ou chaveamento de carga
-2274,3078	-1437,33	-9987,02	-2107,01
-1115,2357	-825,204	-10732,7	-1057,44
120,7656	56,0617	-11180,2	29,018
1245,3843	984,8934	-11367,5	1072,718
2402,5467	1943,237	-11398,6	2086,681
3492,1405	2830,227	-11383,4	3141,82
4592,6988	3760,662	-11320,2	4151,533
5604,6537	4594,885	-10518,6	5038,651
6607,2831	5393,099	-9732,9	6049,298
7501,9605	6196,243	-8984,53	6904,748
8369,0892	6876,718	-7061,34	7630,004
9111,3447	7486,087	-5577,3	8332,785
9810,5934	8109,931	-4100,06	8836,444
10371,124	8435,514	-3156,89	9330,602
10876,547	8905,345	-471,51	9803,051
11233,015	9261,965	673,7399	10175,61
11526,095	9534,042	2405,748	10422,21
11663,981	9782,756	4463,351	10622,7
11734,339	9859,721	4960,05	10644,29
11647,502	9853,727	6344,154	10563,97
11493,294	9750,82	7334,948	10373,27
11184,205	9578,658	8793,015	10111,29
10812,194	9302,149	9762,323	9659,995
10291,842	8935,556	10760,62	9278,228
9717,1377	8392,128	11401,07	8772,427
9004,6096	7956,435	10966,2	8116,473
8250,09	7309,808	10095,07	7376,966
7371,8365	6570,069	9089,351	6634,522
6467,2719	5538,478	8247,816	5775,716
5456,0958	4370,016	6754,17	4908,478
4437,0069	3484,127	5364,402	3980,894
3330,8058	2600,781	4583,548	2932,831
2237,1029	1557,077	3077,705	1877,933
1077,4163	710,343	1689,023	737,1267