UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO–USP
ESCOLA POLITÉCNICA

Ícaro Freitas do Amaral Ribeiro

**Avaliação da estabilidade de tensão em
sistemas de transmissão usando redes
neurais artificiais**

São Paulo
2020

Ícaro Freitas do Amaral Ribeiro

Versão Corrigida

**Avaliação da estabilidade de tensão em
sistemas de transmissão usando redes
neurais artificiais**

Dissertação de mestrado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: Prof. Dr. Silvio Giuseppe Di Santo

São Paulo
2020

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Ribeiro, Icaro Freitas do Amaral

Avaliação da estabilidade de tensão em sistemas de transmissão usando redes neurais artificiais / I. F. A. Ribeiro -- versão corr. -- São Paulo, 2020. 112 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1.Sistemas Elétricos de Potência 2.Estabilidade de Tensão 3.Redes Neurais Artificiais I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II.t.

*Dedico este trabalho à minha família, à minha companheira e aos meus amigos por
sempre estarem ao meu lado nos momentos que mais precisei.*

Agradecimentos

À Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

À minha família, Ricardo, Elizete e Isis pelo incentivo e apoio incondicional.

À minha companheira Hanalise, por todo apoio durante esses anos.

Ao Prof. Dr. Silvio Giuseppe Di Santo, pela orientação diuturna e competente ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Eduardo Coelho Marques da Costa, pelo incentivo que me deu para ingressar no PPGEE da EPUSP.

Aos demais professores do Programa de Pós Graduação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo que contribuem com dedicação e trabalho, para a formação de mestres e doutores.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desta pesquisa.

À todos os membros da banca.

Muito Obrigado!

Ícaro Freitas do Amaral Ribeiro

Resumo

Ribeiro, I. F. A. **Avaliação da estabilidade de tensão em sistemas de transmissão usando redes neurais artificiais**. 112 p. Dissertação de mestrado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2020.

O crescente aumento da demanda por energia elétrica tem influenciado de maneira relevante nas condições de operação do sistema elétrico de potência em todo mundo, levando-o a operar próximo a sua capacidade máxima. Por este motivo, tem-se tornado importante estimar a proximidade do ponto de colapso de tensão desses sistemas para que os mesmos operem dentro dos limites de tensão permitido. A instabilidade de tensão, caracterizada pela redução lenta e gradual das magnitudes das tensões das barras de carga, tem-se constituído no principal obstáculo à operação estável dos sistemas de potência, e a razão essencial da ocorrência desse fenômeno consiste na incapacidade dos sistemas em atender à crescente demanda reativa. Desta forma, busca-se com essa dissertação de mestrado elaborar uma metodologia que possibilite determinar um índice que indique o nível de estabilidade de tensão do sistema e aplicá-lo a uma rede neural artificial, objetivando utilizá-la em análises com diferentes níveis de carregamento do sistema. O índice é composto pelo produto da distância mínima até o ponto de colapso de tensão e o coeficiente que representa a região estável de operação da linha de transmissão. Os resultados obtidos mostraram a eficiência da rede neural artificial em estimar devidamente a margem de estabilidade de tensão de qualquer barramento do sistema, possibilitando uma ação preventiva para que este distúrbio não ocasione maiores problemas ao sistema elétrico.

Palavras-chave: Sistemas Elétricos de Potência, Estabilidade de Tensão, Redes Neurais Artificiais.

Abstract

Ribeiro, I. F. A. **Evaluation of the voltage stability of transmission systems using artificial neural networks.** 112 p. Master Thesis – Polytechnic School, University of São Paulo, 2020.

The growing increase in the demand for electrical energy has relevant influenced the operating conditions of the electric power system worldwide, leading it to operate close to its maximum capacity. For this reason, it has become important to estimate the proximity of the voltage collapse point of these systems so that they operate within the permitted voltage limits. Voltage instability, characterized by the slow and gradual reduction in the magnitudes of the load bars' voltages, has been the main obstacle to the stable operation of power systems, and the essential reason for the occurrence of this phenomenon is the inability of the systems to meet growing reactive demand. In this way, it is sought with this master's dissertation to develop a methodology that makes it possible to determine an index that indicates the level of voltage stability of the system and apply it to an artificial neural network, aiming to use it in analyzes with different levels of loading of the system. The index is composed of the product of the minimum distance to the point of voltage collapse and the coefficient that represents the stable region of operation of the transmission line. The results obtained showed the efficiency of the artificial neural network in properly estimating the voltage stability margin of any bus in the system, enabling a preventive action so that this disturbance does not cause major problems to the electrical system.

Keywords: Electric Power Systems, Voltage Stability, Artificial Neural Networks.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Classificação de Estabilidade de um Sistema de Potência.	28
Figura 2 – Comportamento dinâmico típico de uma carga agregada.	31
Figura 3 – Curva PV.	32
Figura 4 – Curva VQ para diversos valores de potência ativa.	34
Figura 5 – Margem de estabilidade de tensão.	35
Figura 6 – A superfície singular S no plano PQ.	42
Figura 7 – Esquemas de dois neurônios típicos interligados.	46
Figura 8 – Neurônio de McCulloch e Pitts.	47
Figura 9 – Rede <i>Feedforward</i> de camada única.	50
Figura 10 – Rede <i>Feedforward</i> de múltiplas camadas.	51
Figura 11 – Redes Recorrentes.	51
Figura 12 – Treinamento Não-Supervisionado.	53
Figura 13 – Notação para derivação do algoritmo <i>backpropagation</i>	56
Figura 14 – Esquema de uma linha de transmissão.	65
Figura 15 – Distância do ponto de operação até o ponto de colapso de tensão. . . .	67
Figura 16 – Carga distribuída entre os pontos máximos e mínimos.	68
Figura 17 – Arquitetura da rede neural.	70
Figura 18 – Desempenho do treinamento da Rede Neural Artificial (RNA).	77
Figura 19 – Regressão linear da rede neural.	78
Figura 20 – Sistema de testes IEEE 14 barras.	87
Figura 21 – Curvas de carga: barra 02	91
Figura 22 – Curvas de carga: barra 03	91
Figura 23 – Curvas de carga: barra 04	92
Figura 24 – Curvas de carga: barra 05	92
Figura 25 – Curvas de carga: barra 06	92
Figura 26 – Curvas de carga: barra 09	93
Figura 27 – Curvas de carga: barra 10	93
Figura 28 – Curvas de carga: barra 11	93

Figura 29 – Curvas de carga: barra 12 94

Figura 30 – Curvas de carga: barra 13 94

Figura 31 – Curvas de carga: barra 14 94

Lista de tabelas

Tabela 1 – Níveis de tensões entre fases aceitáveis a 60 Hz.	36
Tabela 2 – Níveis de carga na barra 02.	71
Tabela 3 – Níveis de carga na barra 03.	72
Tabela 4 – Níveis de carga na barra 04.	72
Tabela 5 – Níveis de carga na barra 05.	72
Tabela 6 – Níveis de carga na barra 06.	72
Tabela 7 – Níveis de carga na barra 09.	72
Tabela 8 – Níveis de carga na barra 10.	72
Tabela 9 – Níveis de carga na barra 11.	72
Tabela 10 – Níveis de carga na barra 12.	72
Tabela 11 – Níveis de carga na barra 13.	73
Tabela 12 – Níveis de carga na barra 14.	73
Tabela 13 – Índices do sistema de potência às 2h.	73
Tabela 14 – Índices do sistema de potência às 4h.	74
Tabela 15 – Índices do sistema de potência às 6h.	74
Tabela 16 – Índices do sistema de potência às 8h.	74
Tabela 17 – Índices do sistema de potência às 10h.	74
Tabela 18 – Índices do sistema de potência às 12h.	75
Tabela 19 – Índices do sistema de potência às 14h.	75
Tabela 20 – Índices do sistema de potência às 16h.	75
Tabela 21 – Índices do sistema de potência às 18h.	75
Tabela 22 – Índices do sistema de potência às 20h.	76
Tabela 23 – Índices do sistema de potência às 22h.	76
Tabela 24 – Índices do sistema de potência às 24h.	76
Tabela 25 – Níveis de carga nas barras do sistema de potência.	79
Tabela 26 – Diferença percentual entre os métodos.	79
Tabela 27 – Dados de entrada das linhas de transmissão do sistema IEEE 14 barras.	88
Tabela 28 – Dados de entrada dos transformadores do sistema IEEE 14 barras.	88

Tabela 29 – Dados de entrada das barras do sistema IEEE 14 barras.	89
Tabela 30 – Sistema em condições normais de operação às 2 horas.	96
Tabela 31 – Sistema em condições de limites mínimos de tensão às 2 horas.	96
Tabela 32 – Sistema em condições normais de operação às 4 horas.	96
Tabela 33 – Sistema em condições de limites mínimos de tensão às 4 horas.	97
Tabela 34 – Sistema em condições normais de operação às 6 horas.	97
Tabela 35 – Sistema em condições de limites mínimos de tensão às 6 horas.	97
Tabela 36 – Sistema em condições normais de operação às 8 horas.	98
Tabela 37 – Sistema em condições de limites mínimos de tensão às 8 horas.	98
Tabela 38 – Sistema em condições normais de operação às 10 horas.	98
Tabela 39 – Sistema em condições de limites mínimos de tensão às 10 horas.	99
Tabela 40 – Sistema em condições normais de operação às 12 horas.	99
Tabela 41 – Sistema em condições de limites mínimos de tensão às 12 horas.	99
Tabela 42 – Sistema em condições normais de operação às 14 horas.	100
Tabela 43 – Sistema em condições de limites mínimos de tensão às 14 horas.	100
Tabela 44 – Sistema em condições normais de operação às 16 horas.	100
Tabela 45 – Sistema em condições de limites mínimos de tensão às 16 horas.	101
Tabela 46 – Sistema em condições normais de operação às 18 horas.	101
Tabela 47 – Sistema em condições de limites mínimos de tensão às 18 horas.	101
Tabela 48 – Sistema em condições normais de operação às 20 horas.	102
Tabela 49 – Sistema em condições de limites mínimos de tensão às 20 horas.	102
Tabela 50 – Sistema em condições normais de operação às 22 horas.	102
Tabela 51 – Sistema em condições de limites mínimos de tensão às 22 horas.	103
Tabela 52 – Sistema em condições normais de operação às 24 horas.	103
Tabela 53 – Sistema em condições de limites mínimos de tensão às 24 horas.	103
Tabela 54 – Potência ativa das cargas às 2 horas.	105
Tabela 55 – Potência reativa das cargas às 2 horas.	105
Tabela 56 – Potência ativa das cargas às 4 horas.	106
Tabela 57 – Potência reativa das cargas às 4 horas.	106
Tabela 58 – Potência ativa das cargas às 6 horas.	106
Tabela 59 – Potência reativa das cargas às 6 horas.	106
Tabela 60 – Potência ativa das cargas às 8 horas.	106
Tabela 61 – Potência reativa das cargas às 8 horas.	107
Tabela 62 – Potência ativa das cargas às 10 horas.	107
Tabela 63 – Potência reativa das cargas às 10 horas.	107
Tabela 64 – Potência ativa das cargas às 12 horas.	107
Tabela 65 – Potência reativa das cargas às 12 horas.	107
Tabela 66 – Potência ativa das cargas às 14 horas.	108
Tabela 67 – Potência reativa das cargas às 14 horas.	108

Tabela 68 – Potência ativa das cargas às 16 horas.	108
Tabela 69 – Potência reativa das cargas às 16 horas.	108
Tabela 70 – Potência ativa das cargas às 18 horas.	108
Tabela 71 – Potência reativa das cargas às 18 horas.	109
Tabela 72 – Potência ativa das cargas às 20 horas.	109
Tabela 73 – Potência reativa das cargas às 20 horas.	109
Tabela 74 – Potência ativa das cargas às 22 horas.	109
Tabela 75 – Potência reativa das cargas às 22 horas.	109
Tabela 76 – Potência ativa das cargas às 24 horas.	110
Tabela 77 – Potência reativa das cargas às 24 horas.	110
Tabela 78 – Índices de estabilidade de tensão às 2 horas.	110
Tabela 79 – Índices de estabilidade de tensão às 4 horas.	110
Tabela 80 – Índices de estabilidade de tensão às 6 horas.	111
Tabela 81 – Índices de estabilidade de tensão às 8 horas.	111
Tabela 82 – Índices de estabilidade de tensão às 10 horas.	111
Tabela 83 – Índices de estabilidade de tensão às 12 horas.	111
Tabela 84 – Índices de estabilidade de tensão às 14 horas.	111
Tabela 85 – Índices de estabilidade de tensão às 16 horas.	112
Tabela 86 – Índices de estabilidade de tensão às 18 horas.	112
Tabela 87 – Índices de estabilidade de tensão às 20 horas.	112
Tabela 88 – Índices de estabilidade de tensão às 22 horas.	112
Tabela 89 – Índices de estabilidade de tensão às 24 horas.	112

Lista de siglas

ANAREDE Programa de Análises de Redes

CEPEL Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

MET Margem de Estabilidade de Tensão

MST Margem de Segurança de Tensão

NFTool Neural Network Fitting Tool

ONS Operador Nacional do Sistema Elétrico

PMC Redes *Perceptron* de Múltiplas Camadas

PMC Ponto de Máximo Carregamento

RNAs Redes Neurais Artificiais

RNA Rede Neural Artificial

SEP Sistemas Elétricos de Potência

Sumário

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	Estabilidade em Sistemas de Potência	23
1.2	Justificativa	24
1.3	Objetivos	25
1.4	Estrutura da Dissertação	25
2	ESTABILIDADE EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO . . .	27
2.1	Definição, Classificação e Mecanismos	27
2.2	Estabilidade de Tensão	28
2.2.1	Estabilidade de Tensão a Grandes Perturbações	29
2.2.2	Estabilidade de Tensão a Pequenas Perturbações	29
2.2.3	Estabilidade de Tensão de Curto Prazo	29
2.2.4	Estabilidade de Tensão de Longo Prazo	29
2.3	Métodos de Análise	29
2.3.1	Análise Dinâmica	30
2.3.2	Análise Estática	30
2.4	Colapso de Tensão	31
2.5	Curvas PV	32
2.6	Curvas VQ	33
2.7	Margem de Estabilidade de Tensão	34
2.8	Análise Modal para Estabilidade de Tensão	36
2.8.1	Modo Crítico	36
2.8.2	Fatores de Participação	38
2.9	Identificação de Linhas de Transmissão Fracas	39
2.9.1	Determinação da Menor Distância para Instabilidade de Tensão	40
2.9.2	Teoria da Curva PQ	40
2.9.3	Descrição Geral do Procedimento	42

3	REDES NEURAIS ARTIFICIAIS	45
3.1	Conceitos Iniciais	45
3.2	Neurônio Biológico e Artificial	46
3.3	Funções de Ativação	48
3.4	Arquiteturas de Redes Neurais Artificiais	49
3.4.1	Redes <i>Feedforward</i> de Camada Única	50
3.4.2	Redes <i>Feedforward</i> de Múltiplas Camadas	50
3.4.3	Redes Recorrentes	51
3.5	Tipos de Treinamento	52
3.5.1	Treinamento Supervisionado	52
3.5.2	Treinamento Não-Supervisionado	52
3.6	Redes <i>Perceptron</i>	53
3.6.1	Redes <i>Perceptrons</i> Multicamadas	53
3.6.2	Processos de Treinamento de Redes <i>Perceptrons</i> Multicamadas	54
3.7	Algoritmo Levenberg-Marquardt	59
4	METODOLOGIA	63
4.1	Descrição do Sistema de Testes IEEE 14 Barras	63
4.2	Descrição dos <i>Softwares</i> Utilizados	63
4.2.1	Anarede	64
4.2.2	Matlab	64
4.3	Cálculo do Índice de Estabilidade de Tensão em Linhas de Transmissão	64
4.3.1	A Curva PQ da Linha de Transmissão	65
4.3.2	Análise de Linhas Fracas Através do Método da Curva PQ	66
4.3.3	Região Estável de Transmissão	67
4.3.4	Índice de Colapso de Tensão	68
4.4	Treinamento da Rede Neural Artificial	69
4.4.1	Arquitetura da Rede Neural Artificial	69
5	RESULTADOS	71
5.1	Obtenção do Índice de Estabilidade de Tensão para Rede de Testes IEEE 14 Barras	71
5.1.1	Curvas de Carga	71
5.1.2	Cálculo dos Índices	73
5.2	Resultados do Treinamento da RNA	76
5.2.1	Processo de Treinamento	77
5.2.2	Teste da Rede Neural Artificial	79

6	CONCLUSÃO	81
6.1	Trabalhos Futuros	81
	REFERÊNCIAS	83

APÊNDICES 85

APÊNDICE A	– DADOS DE ENTRADA DO SISTEMA	87
A.1	Dados de Entrada das Linhas do Sistema de Potência	88
A.2	Dados de Entrada dos Transformadores do Sistema de Potência	88
A.3	Dados de Entrada das Barras do Sistema de Potência	89
APÊNDICE B	– CURVAS DE CARGA DO SISTEMA	91
APÊNDICE C	– DADOS RELACIONADOS AO ÍNDICE DE ESTABILIDADE DE TENSÃO	95
APÊNDICE D	– DADOS USADOS NO TREINAMENTO DA RNA	105
D.1	Dados de Entrada da RNA	105
D.2	Dados de Saída da RNA	110

Introdução

Os Sistemas Elétricos de Potência (SEP) são sistemas complexos que englobam equipamentos de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Esses sistemas devem ser capazes de fornecer energia elétrica de forma econômica, ininterrupta e confiável as carga. Entretanto, a operação do sistema tem se tornado uma tarefa cada vez mais difícil devido à diversos fatores, dentre os quais destacam-se: baixos investimentos nas linhas de transmissão, restrições (ambientais, técnicas e econômicas) cada vez mais rígidas, além do crescimento não previsto da demanda de energia elétrica. Assim, os fatores citados contribuem para que o SEP opere próximo a seus limites de estabilidade de tensão.

A instabilidade de tensão, caracterizada pela redução lenta e gradual das magnitudes das tensões das barras de carga, tem-se constituído no principal obstáculo à operação estável dos sistemas de potência, e a razão essencial da ocorrência desse fenômeno consiste na incapacidade dos sistemas em atender à crescente demanda reativa (NATURESA et al., 2001).

Assim, tornou-se importante detectar o fenômeno de instabilidade de tensão antes que ocorra, com o objetivo de prevenir desligamentos totais ou parciais do SEP. Diante deste fato, surgiu a necessidade de utilizar um índice que represente a capacidade do sistema de transmissão operar em condições estáveis de tensão, tanto em ambientes *online*, como nos *offline*, ajudando os operadores a determinarem uma condição operativa que minimize o risco de ocorrência de instabilidade de tensão (FERREIRA, 2008).

1.1 Estabilidade em Sistemas de Potência

A estabilidade em sistemas de potência é de grande importância, pois através da sua análise é possível garantir o suprimento de energia, e ainda evitar, ou pelo menos reduzir, a interrupção do fornecimento de energia aos consumidores. A classificação de estabilidade de sistemas de potência pode ser classificada de três formas: estabilidade de ângulo de rotor, estabilidade de frequência e estabilidade de tensão. Cada categoria possui subclassificações que serão abordadas com mais detalhes no próximo capítulo.

A partir do momento que é detectada a possibilidade de ocorrência de instabilidade, ações devem ser empregadas para que seja garantido um ponto de operação seguro, como o redespacho de potência ativa do sistema.

A análise de estabilidade transitória é associada com a segurança de sistemas de potência, isto é, a capacidade de operar em um estado de equilíbrio em condições de operação normais ou perturbadas. A segurança desses sistemas engloba vários aspectos que podem ser classificados em estáticos e dinâmicos.

As avaliações dinâmicas sobre a estabilidade de sistemas elétricos de potência são classificadas em três categorias: tensão, angular e frequência. Entretanto, existe ainda uma subclassificação que é dada pelo tamanho do distúrbio, que pode ser uma perturbação grande ou pequena. A perturbação pequena é ocasionada continuamente de acordo com as variações de cargas, onde o sistema possui a capacidade de se auto-ajustar para manter sua operação normalmente. Já a perturbação grande abrange grandes mudanças estruturais do sistema, enfatizando a sua característica não-linear.

O aspecto dinâmico pode ser modelado por um conjunto de equações diferenciais não lineares, ou seja, trata-se de uma análise complexa, principalmente quando sistemas de grande porte são abordados. Um jeito mais simples baseia-se na análise do comportamento das tensões nodais, considerando-se o aumento progressivo do carregamento do sistema, isto é, a análise qualitativa do ponto de operação. Desta forma, essa análise pode ser tratada como um problema linear (ISODA, 2009).

A análise estática para estudos de estabilidade de tensão é uma técnica que ajuda a mostrar o quanto o sistema está sobrecarregado e próximo da zona de instabilidade. Vale ressaltar que embora se utilizem ferramentas estáticas, o fenômeno não é estático, mas de natureza dinâmica lenta. Essas dinâmicas lentas representam determinados equipamentos como, a variação dos taps dos transformadores, cargas termoestáticas e atuações de limitadores de correntes de geradores. (SALAZAR, 2018).

Desta forma, as ferramentas de análise estática para estudos da estabilidade de tensão são ideais para fenômenos de longa duração por serem mais simples e utilizarem pouco esforço computacional em relação as ferramentas dinâmicas (SALAZAR, 2018).

1.2 Justificativa

Um dos principais problemas na operação de sistemas elétricos de potência está associado com a dificuldade em realizar de forma rápida e eficiente a avaliação de segurança. Tradicionalmente, o planejamento e expansão de sistemas elétricos de potência baseavam-se em monitorar a instabilidade eletromecânica do rotor e dos limites térmicos dos equipamentos, porém, com o carregamento das linhas cada vez mais próximo do limite, surgiu a necessidade de indicadores precisos e confiáveis da proximidade de colapsos e que possam ser utilizados durante as operações do sistema. Esse índice precisa ser confiável o

suficiente para não rejeitar desnecessariamente carga ou tomar ações impróprias.

A análise de estabilidade transitória, utilizando redes neurais, tem sido utilizada de forma geral através de redes *feedforward*, com o treinamento baseado em algoritmo de retropropagação (*backpropagation*). Neste contexto, é interessante a integração das técnicas de inteligência computacional, mais especificamente redes neurais artificiais, às ferramentas de análise já existentes, com objetivo de fornecer um conjunto de regras e diretrizes operativas de controle preventivo às equipes de operação, de forma que o comportamento do sistema pós redespacho seja melhorado.

1.3 Objetivos

Objetivo Geral

Avaliar, por meio de simulações computacionais, a estabilidade de tensão em sistemas de transmissão utilizando redes neurais artificiais *perceptron* de múltiplas camadas.

Objetivos Específicos

- Descrever os conceitos de estabilidade de tensão em sistemas de transmissão;
- Descrever os conceitos de redes neurais artificiais;
- Desenvolver uma metodologia para analisar o comportamento da estabilidade de tensão em um sistema elétrico de potência;
- Aplicar a metodologia proposta em um sistema teste para avaliar o seu potencial e aplicação em sistemas elétricos de potência reais.

1.4 Estrutura da Dissertação

No capítulo 2 são apresentados conceitos a respeito da estabilidade em sistemas elétricos de potência, enfatizando-se as classificações de estabilidade e os métodos de análises, além de descrever os principais índices de avaliação de estabilidade de tensão em sistemas de potência.

No capítulo 3 são apresentados conceitos que envolvem as redes neurais artificiais, enfatizando-se as principais arquiteturas de redes neurais artificiais e tipos de treinamento, além de descrever como é feito o processo de treinamento de redes *perceptron* multicamadas.

No capítulo 4 é apresentada a metodologia utilizada para a obtenção do índice de estabilidade de tensão, além de descrever o procedimento de treinamento da rede neural artificial.

No capítulo 5 são apresentados os resultados do estudo de desempenho da rede neural artificial para estimação do índice que representa o comportamento da tensão do sistema elétrico de potência em estudo.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões sobre o que foi desenvolvido no trabalho, além de ideias para o aprofundamento de estudos nessa área.

Estabilidade em Sistemas de Transmissão

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica a respeito da estabilidade em sistemas elétricos de potência como um todo, enfatizando-se as classificações de estabilidade e os métodos de análises.

2.1 Definição, Classificação e Mecanismos

A complexidade dos sistemas elétricos de potência tornou essencial a classificação dos problemas de instabilidade. A classificação em categorias facilita a análise e a identificação dos principais fatores que contribuem para que ocorra a instabilidade. A instabilidade pode se manifestar de diversas formas, dependendo da topologia da rede e dos pontos de operação. Supondo que um sistema de potência é totalmente dependente das máquinas síncronas para a geração de potência elétrica, uma das condições essenciais para a operação satisfatória do mesmo é que todas as máquinas permaneçam em sincronismo. Entretanto, caso um sistema de potência sofra um declínio progressivo e incontrolável das magnitudes de tensões de certas barras da rede ao contrário da perda de sincronismo, a instabilidade é intitulada como colapso de tensão, o qual é dependente do comportamento dinâmico das cargas do sistema (NASSIF et al., 2004).

A dinâmica dos sistemas elétricos de potência podem ser divididos em três categorias: estabilidade angular, estabilidade de tensão e estabilidade de frequência. O primeiro refere-se a manutenção do sincronismo entre as máquinas; o segundo com os fenômenos não lineares que podem ocorrer na evolução do processo dinâmico, e o terceiro refere-se a capacidade de um sistema elétrico de potência de manter a frequência em valores aceitáveis após este ser submetido a um desequilíbrio de geração e carga. Esta classificação pode ser observada na Figura 1, onde a natureza e o tipo de impacto são considerados (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994).

Figura 1 – Classificação de Estabilidade de um Sistema de Potência.

Fonte:(PACCINI et al., 2009).

2.2 Estabilidade de Tensão

A instabilidade de tensão é um problema complexo que está relacionado a incapacidade de um sistema de potência manter as tensões de regime permanente em níveis aceitáveis de operação após ocorrerem variações na carga ou no ponto de operação. Quando um sistema se mostra instável, as variações no ponto de operação provocam quedas de tensão incontroláveis que podem levar o sistema ao colapso, provocando assim, blecautes parciais ou totais (SESSA, 2017). Então, para aumentar o nível de segurança, é de suma importância o monitoramento em tempo real da margem de segurança do sistema em relação a instabilidade de tensão.

A análise de problemas de instabilidade de tensão ou colapso de tensão tem se baseado tanto em métodos estáticos (fluxo de potência), como em abordagens dinâmicas, que levam em consideração a resposta no tempo dos diversos componentes e dispositivos abrangidos. Todavia, devido a dinâmica do sistema que influencia a estabilidade da tensão ser geralmente lenta, vários aspectos do problema podem ser analisados utilizando métodos estáticos que avaliam a viabilidade do ponto de equilíbrio representado por uma condição de operação especificada do sistema (SESSA, 2017).

2.2.1 Estabilidade de Tensão a Grandes Perturbações

O estudo da estabilidade de tensão a uma grande perturbação geralmente exige a análise do comportamento dinâmico do sistema por um período razoável para que seja possível recolher os dados das interações e ações de dispositivos como motores e limitadores de corrente de campo de geradores. Isso demanda uma análise não-linear do sistema que pode variar de alguns segundos a minutos (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994).

2.2.2 Estabilidade de Tensão a Pequenas Perturbações

Esta forma de estabilidade é influenciada pelas características da carga, controles contínuos e controles discretos em um dado instante de tempo. Essa definição é adequada para determinar como a tensão irá responder a uma pequena mudança no sistema, como por exemplo, a alteração de carga. Para pequenos distúrbios, as equações do sistema podem ser linearizadas e permitem que sejam identificados importantes fatores que influenciam na estabilidade de tensão do sistema. Para o estudo deste tipo de estabilidade é normalmente utilizado técnicas de análise estática (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994).

2.2.3 Estabilidade de Tensão de Curto Prazo

A estabilidade de tensão de curto prazo abrange as dinâmicas rápidas de algumas cargas, como por exemplo, cargas eletronicamente controladas, motores de indução e conversores. Normalmente este tipo de análise dura alguns segundos e requer solução de equações diferenciais representativas do sistema, onde a dinâmica das cargas é essencial (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994).

2.2.4 Estabilidade de Tensão de Longo Prazo

A estabilidade de tensão de longo prazo abrange as dinâmicas lentas de determinados equipamentos como, a variação dos taps dos transformadores, cargas termoestáticas e atuações de limitadores de correntes de geradores. Este tipo de análise se estende de poucos a vários minutos e são necessárias simulações de longo prazo para que seja avaliado o desempenho dinâmico do sistema. Em diversos casos, as análises estáticas podem ser utilizadas para estimar as margens de estabilidade, identificar fatores de influência e avaliar diferentes condições do sistema (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994).

2.3 Métodos de Análise

A estabilidade de tensão é estudada sob o ponto de vista estático e dinâmico, onde a escolha da técnica a ser utilizada depende da análise a ser efetuada. Independentemente

da escolha, o problema de estabilidade de tensão de um sistema de potência exige as seguintes características:

- o *ESTADO* - Diagnóstico do ponto de operação do sistema, ou seja, determina inicialmente se o ponto de operação é estável ou instável sob o ponto de vista de tensão;
- o *MECANISMO* - Determinação da área/barra crítica do sistema, pesquisando-se quais os fatores que podem contribuir para a instabilidade e quais medidas podem precaver ou controlar as causas da instabilidade;
- o *PROXIMIDADE* - Determinação da margem de carga ou de estabilidade entre o ponto de operação conhecido e o ponto de colapso de tensão. Isto implica o conhecimento de um método que identifique este ponto de colapso e quais ações com influência nessa margem.

2.3.1 Análise Dinâmica

A análise dinâmica utiliza técnicas não-lineares de simulação no domínio do tempo ou frequência, possibilitando uma reprodução real da dinâmica da instabilidade de tensão. É de suma importância para estudos que envolvem coordenação de controles e proteções, além de análises de situações específicas de colapso de tensão.

As vantagens da técnica de análise dinâmica reside na possibilidade de captura e cronologia dos eventos e na representação fiel da dinâmica da instabilidade de tensão. Entretanto, as desvantagens deste tipo de técnica reside na necessidade de obtenção de uma quantidade considerável de dados através de longos períodos de simulações e não se ter informações diretas a respeito da margem de estabilidade e áreas críticas do sistema (FRANCISCO, 2005).

2.3.2 Análise Estática

Métodos estáticos de análise de estabilidade de tensão são fundamentalmente baseados nas equações do fluxo de potência. Pelo fato de envolverem somente equações algébricas, estes métodos são computacionalmente mais rápidos e eficientes em relação aos métodos dinâmicos, sendo essas características essenciais para a maioria dos estudos que são necessários a determinação dos limites de estabilidade de tensão para casos pré e pós-contingência (GAO; MORISON; KUNDUR, 1992).

A análise estática pode propiciar uma rápida verificação das condições críticas do sistema relacionadas a singularidade da matriz Jacobiana do fluxo de potência (BOMPARD et al., 1993).

Dentre as abordagens estáticas para análise da estabilidade de tensão, é possível destacar os seguintes métodos:

- Métodos de curvas PV e QV;
- Análise modal estática.

Estes métodos possuem o objetivo de identificar as margens de estabilidade, assim como os mecanismos de colapso de tensão.

2.4 Colapso de Tensão

O colapso de tensão é um processo regido pelo comportamento dinâmico das cargas do sistema e pode ser observado através da Figura 2, onde é possível identificar o típico comportamento dinâmico de uma carga agregada do sistema, ou seja, o comportamento equivalente de todos os componentes individuais da carga (motores, cargas termistáticas, etc.) conectadas a uma dada barra do sistema em decorrência de uma variação em degrau na tensão desta barra (XU; MANSOUR, 1994).

Figura 2 – Comportamento dinâmico típico de uma carga agregada.

Fonte:(NASSIF et al., 2004).

É possível constatar na Figura 2 que após a ocorrência da perturbação, a carga demonstra uma tendência de retornar ao valor de demanda pré-perturbação, mostrando uma recuperação de forma exponencial. Observa-se que a carga mantém o nível de potência pré-perturbação com uma tensão menor, mas para que isto ocorra, a corrente deve aumentar. Pelo fato de ocorrer este aumento gradativo da corrente na linha de transmissão durante o curso de recuperação da carga, são exigidos reativos adicionais para suprir as perdas associadas a este aumento. Caso essa condição não possa ser atendida devido a um suporte inadequado de reativos do sistema, a ocorrência do colapso de tensão é inevitável se não forem tomadas medidas corretivas, como por exemplo, chaveamento de capacitores, implantação de compensadores estáticos de reativos, entre outros (NASSIF et al., 2004).

2.5 Curvas PV

Existem diversas formas de análise estática de estabilidade de tensão, mas a mais utilizada é o método das curvas PV, que relaciona a potência ativa transferida e a tensão de uma barra de carga, conforme a Figura 3. Essa curva mostra uma variação quadrática da tensão da barra de carga conforme a demanda (P) aumenta e é obtida através da realização de sucessivos fluxos de potência (NASSIF et al., 2004).

É possível observar que nesta figura, a intersecção da curva PV (característica do sistema com a característica da carga (potência constante) resulta em dois pontos de equilíbrio A e B . A estabilidade deste pontos pode ser avaliada considerando-se que a curva PV aumenta para a direita com uma injeção adicional de reativos.

Desta forma, os novos pontos de equilíbrio A' e B' apresentam, respectivamente, uma maior e menor magnitude de tensão em relação aos pontos A e B . Isso caracteriza os pontos A e B como sendo pontos de equilíbrio estável e instável, respectivamente.

Figura 3 – Curva PV.

Fonte:(NASSIF et al., 2004).

Após a aquisição da curva PV para uma certa barra crítica do sistema, o ponto máximo de carregamento ou ponto de colapso de tensão, também conhecido como "curva do nariz" da curva PV, pode ser identificado. A distância entre esse ponto e o ponto de operação do caso básico (distância entre P_1 e P_{max} na Figura 3) revela a margem de estabilidade de tensão do sistema.

Concluindo sobre a análise da curva PV, é possível evidenciar algumas importantes características, tais como:

- Quanto mais próximo do limite de carregamento, maior é a variação da tensão para uma mesma variação na carga;

- O ponto de máxima transferência de potência ocorre quando a impedância da carga e a impedância de Thévenin apresentam módulos iguais, o que é chamado de "casamento" de impedâncias;
- Para todos os pontos, exceto no ponto de máxima transferência, existem duas soluções de tensão para uma mesma potência de transferência. Os pontos na região superior da curva apresentam valores de correntes menores que os valores dos pontos da região inferior. A operação permanente na região inferior da curva é em geral inaceitável;
- Para sistemas radiais, a tensão na barra crítica é monitorada em relação às mudanças na potência ativa da carga;
- Para sistemas malhados, é possível representar o sistema em uma única curva PV, onde P é a potência ativa da área e V é a tensão na barra mais crítica ou representativa.
- O método é eficiente para sistemas de barramento infinito e cenários de carga isolados.

2.6 Curvas VQ

Uma característica muito útil para certos aspectos de análise da estabilidade de tensão é a relação VQ, onde é possível obter a sensibilidade e a variação da tensão de barra em decorrência de injeções ou absorções de potência reativa. A estabilidade de tensão depende, de fato, de como as variações de P e Q na área de carga afetam as tensões nas barras de carga (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994).

A obtenção das curvas VQ de uma determinada barra é efetuada considerando que esta barra é uma fonte variável e infinita de potência reativa. Desta forma, com sucessivos fluxos de potência, altera-se o valor da tensão desta barra, obtendo-se os valores de potência reativa necessários para manter as tensões especificadas. As curvas VQ podem ser traçadas para qualquer ponto de operação do sistema, onde são obtidas em geral, para o ponto inicial de operação e para o ponto de máximo carregamento do sistema, determinado através das curvas PV (BALU; MARATUKULAM, 1994).

Com as curvas VQ é possível determinar o nível crítico de tensão e a margem de estabilidade. O nível crítico de tensão, que é o valor análogo ao mínimo da curva, é o ponto a partir do qual é observado um comportamento contrário ao esperado, ou seja, uma diminuição no nível de tensão acarreta um aumento na geração de potência reativa. Este ponto corresponde à derivada $\partial Q / \partial V = 0$, que representa o limite de estabilidade de tensão e define o valor de potência reativa mínima necessária para uma operação estável (FRANCISCO, 2005).

A margem de potência reativa pode ser mensurada a partir da distância entre o eixo horizontal e o ponto de mínimo. Caso o mínimo da curva se encontre acima do eixo horizontal, o sistema está deficiente de potência reativa, sendo indicado a instalação de equipamentos adicionais de suporte de potência reativa. Já no caso de o ponto crítico se encontrar abaixo do eixo horizontal, o sistema possui alguma margem de potência reativa. A curva VQ, caso seja traçada para o ponto de máximo carregamento a partir da curva PV, apresenta margem de potência reativa zero para as barras críticas, isto é, o ponto de mínimo é tangente ao eixo horizontal.

Na Figura 4 pode ser observado um exemplo que mostra um conjunto de curvas VQ, cada uma delas associada a uma potência ativa da carga.

Figura 4 – Curva VQ para diversos valores de potência ativa.

Fonte: (FRANCISCO, 2005).

É importante ressaltar que as curvas VQ não indicam a capacidade de carregamento do sistema e, por este motivo, a desvantagem da utilização deste tipo de método é que não se sabe a princípio quais são as barras que devem ser analisadas.

2.7 Margem de Estabilidade de Tensão

Um índice extremamente útil resultante das curvas PV é a Margem de Estabilidade de Tensão (MET), ou Ponto de Máximo Carregamento (PMC). Esse índice indica a que distância o sistema se encontra do colapso de tensão. A Figura 5 ilustra muito bem este conceito.

Dado um ponto de operação (V_0 e P_0) em uma típica curva PV, observa-se que a diferença entre este ponto e o PMC representa a que distância o sistema está de uma ocorrência de colapso de tensão, ou seja, qual a MET que o sistema ainda possui antes que o mesmo perca estabilidade de tensão.

Figura 5 – Margem de estabilidade de tensão.

Fonte: (PRADO et al., 2017).

Este índice é bastante utilizado pelo fato de ser possível observar as condições de segurança do sistema em relação a tensão utilizando somente um modelo estático do sistema. A utilização desse índice também é justificada por considerar as não linearidades do sistema e seus limites.

Em situações de distúrbios na rede elétrica, aumento de carga ou qualquer outra contingência que seja capaz de alterar os níveis de reativos disponíveis, a largura da MET propende a diminuir. Desta forma, o comportamento da margem de tensão durante um distúrbios permite analisar a gravidade dos mesmos (PRADO et al., 2017).

Deste modo, podemos listar a seguir algumas vantagens e desvantagens da margem de estabilidade de tensão como índice de colapso de tensão:

VANTAGENS

- Fácil aceitação e entedimento;
- É facilmente calculada, pois é baseado em modelos estáticos, não incluindo a dinâmica dos componentes da rede.

DESVANTAGENS

- Requisita a suposição de crescimento de carga e geração em uma dada direção, o que algumas vezes não representa uma situação realista.;
- Pelo fato de ser baseados em métodos estáticos, não é possível obter informações sobre a cronologia dos mecanismos que causam a instabilidade do sistema elétrico de potência.

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) apresenta as diretrizes e critérios para estudos de segurança de tensão em seus procedimentos de redes e define a Margem de Segurança de Tensão (MST) como a distância mínima para um ponto de operação do sistema onde existe o risco de instabilidade de tensão. Os níveis de tensão para condições normais e em contingência estabelecidos pelo ONS são apresentados na tabela a seguir.

Tabela 1 – Níveis de tensões entre fases aceitáveis a 60 Hz.

Tensão Nominal de Operação (kV)	Condição Operativa Normal		Condição Operativa de Emergência	
	(kV)	(p.u)	(kV)	(p.u)
<230	-	0,95 a 1,05	-	0,90 a 1,05
230	218 a 242	0,95 a 1,05	207 a 242	0,90 a 1,05
345	328 a 362	0,95 a 1,05	311 a 362	0,90 a 1,05
440	418 a 460	0,95 a 1,046	396 a 460	0,90 a 1,046
500	500 a 550	1,00 a 1,10	475 a 550	0,95 a 1,10
525	500 a 550	0,95 a 1,05	475 a 550	0,90 a 1,05
765	690 a 800	0,90 a 1,046	690 a 800	0,90 a 1,046

Fonte: (ONS, 2011).

2.8 Análise Modal para Estabilidade de Tensão

Este método de análise avalia os autovalores e autovetores da matriz Jacobiana calculada no fluxo de potência pelo método de Newton-Raphson, a qual proporciona informação muito útil no sentido de quão perto um sistema se encontra do ponto máximo de carregamento e quais barras são as que mais contribuem nessa situação. O menor autovalor e seus autovetores associados, conhecidos como modo crítico, determinam a proximidade de um sistema e a contribuição de elementos do sistema a instabilidade de tensão.

A capacidade do método modal de revelar a proximidade da instabilidade de tensão e a identificação do ponto crítico o torna uma ótima ferramenta de planejamento e operação do sistema elétrico para apontar soluções práticas eficazes para superar o problema. Outro aspecto importante em relação a análise modal são os fatores de participação. Estes fatores, que são obtidos a partir de autovetores, podem identificar o local crítico do sistema para implementar as medidas corretivas eficazes (AIK; ANDERSSON, 1998).

Desta forma, é importante o entendimento de mais dois conceitos que estão presentes no método da análise modal para estabilidade de tensão, que é modo o crítico e os fatores de participação, os quais são detalhados nos tópicos a seguir.

2.8.1 Modo Crítico

O método de análise modal estática consiste na aplicação de resultados utilizados através de análises modais dinâmicas em uma Matriz Jacobiana reduzida, que por sua

vez é obtida a partir da linearização de modelo estático de um sistema elétrico de potência em torno de um ponto de operação, conforme é observado na Equação 1.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\Theta} & J_{PV} \\ J_{Q\Theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \Theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (1)$$

Onde,

ΔP : Potência ativa incremental dos barramentos do sistema;

ΔQ : Potência reativa incremental dos barramentos do sistema;

$\Delta \Theta$: Ângulo da tensão incremental dos barramentos do sistema;

ΔV : Módulo da tensão incremental dos barramentos do sistema;

$J_{P\Theta}$: Derivada parcial da potência ativa em relação ao ângulo da tensão nos barramentos;

J_{PV} : Derivada parcial da potência ativa em relação ao módulo da tensão nos barramentos;

$J_{Q\Theta}$: Derivada parcial da potência reativa em relação ao ângulo da tensão nos barramentos;

J_{QV} : Derivada parcial da potência reativa em relação ao módulo da tensão nos barramentos.

A estabilidade de tensão do sistema é afetada pela potência ativa e reativa, porém quando somente a relação entre a potência reativa e o módulo da tensão do barramento é elemento de interesse, ΔP pode ser assumido como zero. Substituindo isso na Equação 1 e após algumas manipulações matriciais, obtêm-se:

$$\Delta Q = J_R \cdot \frac{\Delta V}{V} \rightarrow \frac{\Delta V}{V} = J_R^{-1} \cdot \Delta Q \quad (2)$$

Onde,

J_R : Matriz Jacobiana-Reduzida, dado pela Equação 3.

$$J_R = \left[J_{QV} - J_{Q\Theta} \cdot J_{P\Theta}^{-1} \cdot J_{PV} \right] \quad (3)$$

A equação acima evidencia uma forte relação entre a injeção de potência reativa e o módulo da tensão. Agora, decompondo J_R em seus autovalores, tem-se que:

$$J_R = \zeta \cdot \Lambda \cdot \eta \quad (4)$$

Onde,

ζ : Matriz com as colunas iguais aos autovalores à direita da matriz Jacobiana-Reduzida;

Λ : Matriz diagonal com os autovalores da matriz Jacobiana-Reduzida;

η : Matriz com as linhas iguais aos autovalores à esquerda da matriz Jacobiana-Reduzida.

Caso a decomposição modal de J_R apresentada na Equação 4 for aplicada na Equação 3, podemos reescrever da seguinte maneira:

$$\Delta Q_i = \lambda_i \cdot \frac{\Delta V_i}{V_i} \quad (5)$$

Onde,

ΔQ_i : Potência reativa incremental do i -ésimo modo, sendo $i=1,2,\dots,N$;

ΔV_i : Módulo da tensão incremental do i -ésimo modo, sendo $i=1,2,\dots,N$;

λ_i : Autovalor da matriz Jacobiana-Reduzida do i -ésimo modo, sendo $i=1,2,\dots,N$;

i : Modos extraídos da decomposição modal da matriz Jacobiana-Reduzida.

O critério de estabilidade de tensão estática aponta que o sistema é estável se todos os autovalores de J_R são positivos. É possível observar na Equação 5 que caso o autovalor seja positivo, significa que a variação incremental no módulo da tensão está "em fase" com a variação incremental na potência reativa, ou seja, o módulo da tensão no barramento aumenta quando há um incremento de potência reativa e vice-versa, o que corresponde a situações estáveis (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994).

Contudo, quando o autovalor é negativo, a variação incremental no módulo da tensão está em anti fase com a variação incremental na potência reativa, assim, reduzindo a tensão no barramento quando é aplicado um incremento positivo de potência reativa, o que corresponde a situações instáveis.

Nos limites entre os pontos de operação estável e instável, o autovalor torna-se zero, o que significa fisicamente que qualquer variação infinitesimal na potência reativa ocasiona uma variação infinita na tensão modal, provocando uma instabilidade de tensão no barramento.

O menor autovalor da análise modal, quer seja próximo ou igual a zero, ou até mesmo negativo, chama-se de "modo crítico" e indica o quão perto da instabilidade de tensão está o ponto de operação do sistema.

2.8.2 Fatores de Participação

No método de análise modal, cada barra do sistema possui uma participação sobre um determinado modo. Barramentos que apresentam grande influência no cálculo de um autovalor, possuem altos fatores de participação. Estes fatores são definidos de acordo com a Equação 6.

$$P_{ki} = \zeta_{ki} \cdot \eta_{ik} \quad (6)$$

Onde,

P_{ki} : Fator de participação da barra k na variação de tensão do i -ésimo modo;

ζ_{ki} : K-ésimo elemento da coluna i da matriz cujas colunas são autovalores à direita de J_R ;

η_{ik} : K-ésimo elemento da linha i da matriz cujas linhas são autovetores à esquerda de J_R .

Fisicamente, ζ_{ki} é uma medida da atividade da barra k na variação de tensão do i -ésimo modo, enquanto η_{ik} representa o peso da contribuição dessa atividade. Portanto, o produto destas duas grandezas é uma medida da participação do barramento k na variação de tensão do i -ésimo modo (AIK; ANDERSSON, 1998). É importante ressaltar que os fatores de participação das barras em análise, associados a um determinado modo, somam um.

Os fatores de participação de cada barramento calculados a partir dos autovalores associados ao modo crítico fornecem informações sobre a localização crítica da instabilidade de tensão do sistema. O barramento com o maior fator de participação é o barramento crítico, o que significa que ele tem o maior envolvimento na instabilidade de tensão. Assim sendo, é também a localização do sistema mais eficaz para implementar medidas corretivas.

O cálculo de todos os autovalores de um sistema com várias centenas de barras não é prático, e resulta em esforço computacional desnecessário. Normalmente é necessário somente o cálculo de 5 a 10 mínimos autovalores para identificar as barras mais críticas do sistema (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994).

2.9 Identificação de Linhas de Transmissão Fracas

A estabilidade de tensão está relacionada à capacidade de um sistema elétrico de potência em manter tensões aceitáveis em todos os barramentos do sistema após ser submetido a uma perturbação. O principal fator que causa instabilidade de tensão é a incapacidade do sistema de atender a demanda de energia reativa. Uma perturbação que ocasione uma interrupção inesperada em uma ramificação do sistema pode gerar um declínio progressivo e incontrolável na tensão (SOBIERAJSKI et al., 2002).

A realização da análise modal em pontos operacionais especificados fornece informações sobre as áreas que são mais propensas a instabilidade. No momento do colapso, o autovalor mais a esquerda identifica a direção mais eficaz para orientar o sistema e maximizar a instabilidade da tensão. Além disso, medições de reservas de reativos, perdas e tensões de barramento fornecem informações valiosas sobre o mecanismo de instabilidade no sistema elétrico de potência (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994).

A operação perto dos limites de estabilidade de tensão é praticamente impraticável e é necessário que o sistema tenha disponível uma margem de energia reativa. Em geral

a curva PV é comumente utilizada para determinação da margem máxima de potência ativa nos barramentos de carga para que desta forma, evita-se o colapso de tensão.

2.9.1 Determinação da Menor Distância para Instabilidade de Tensão

O limite de estabilidade de tensão é geralmente determinado a partir das clássicas curvas PV e QV. Podemos plotar as curvas PV por um fator de potência constante e as curvas QV por uma potência real constante. Entretanto, existem outros métodos para determinar o limite de estabilidade de tensão em um sistema elétrico de potência, como por exemplo, soluções de múltiplos fluxos de potência, critério de singularidade da matriz jacobiana e assim por diante. Porém esses métodos não levam em consideração os parâmetros da linha de transmissão, como a resistência ou susceptibilidade (HAQUE, 2002).

Assim, surgiu a ideia de determinar o limite da estabilidade de tensão através de uma curva PQ visando facilitar a identificação dos problemas ocasionados pela desconsideração dos parâmetros da linha de transmissão. Este conceito estabelece que na região inferior a curva PQ, o sistema pode operar normalmente, mas na região fora desta curva, a operação é impossível. Caso as potências de transferência em todas as linhas estiverem na região normal e todos os geradores forneçam energia em um limite aceitável, pode-se dizer que o sistema está estável. Com o método de curvas PQ é possível estabelecer um coeficiente que indique a distância que o sistema está do colapso de tensão da linha de transmissão (PAOSATEANPUN et al., 2006).

A distância até a instabilidade da tensão é normalmente determinada pelo aumento da carga do sistema de maneira predefinida, representando o cenário de tensão mais provável com base em dados históricos e previstos. A seguir é apresentado uma breve descrição do método para determinar a margem mínima de carregamento do sistema.

2.9.2 Teoria da Curva PQ

Para encontrarmos o conjunto de incrementos de carga cuja soma vetorial seja mínima e que, quando imposta à condição inicial de operação, faça com que o jacobiano do fluxo de potência torne-se singular, é necessário organizar as equações do fluxo de potência na seguinte forma:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}, \rho) = \begin{bmatrix} \mathbf{V} \\ \Theta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{P} \\ \mathbf{Q} \end{bmatrix} = 0 \quad (7)$$

Onde,

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{V} \\ \Theta \end{bmatrix}, \rho = \begin{bmatrix} \mathbf{P} \\ \mathbf{Q} \end{bmatrix} \quad (8)$$

O vetor $\mathbf{x}$ representa o estado do sistema e ρ representa o vetor de parâmetro cujos elementos são a carga ativa e reativa do gerador. Tanto $\mathbf{x}$ como ρ possuem dimensões de $N = 2N_{PQ} + N_{PV}$, sendo N_{PQ} o número de barramentos PQ e N_{PV} o número de barramentos PV. A dimensão da função não-linear $\mathbf{f}$ também é N.

Seja J_x e J_ρ as matrizes jacobianas da função vetorial $\mathbf{f}$ em relação a $\mathbf{x}$ e ρ , cada vetor de parâmetro ρ_i e vetor de estado do sistema x_i pode ser obtido resolvendo a equação 7 através de qualquer técnica de solução de fluxo de potência. Cada vetor de parâmetro ρ_i representa uma condição específica do sistema em termos de cargas ativas e reativas e geração ativa. O sistema alcança o seu ponto crítico de estabilidade se o vetor do parâmetro ρ_{cr} e o vetor de estado do sistema correspondam a $\mathbf{x}$, onde tal matriz jacobiana J_x é singular. Considerando que S seja a denotação da hipersuperfície no espaço paramétrico N-dimensional, sugere-se que $J_x(x_{cr}, \rho_{cr})$ seja singular se ρ_{cr} for um ponto em S (KUNDUR; BALU; LAUBY, 1994).

Dado um ponto inicial de operação do sistema (x_0, ρ_0) , deseja-se encontrar o valor de parâmetro ρ em S, de tal forma que a distância entre ρ_0 e ρ_{cr} , onde $k = |\rho_{cr} - \rho_0|$ seja o mínimo local para a distância entre ρ_0 e S.

Supondo que S seja uma hipersuperfície próxima de ρ_{cr} , um vetor para esta hipersuperfície em (x_0, ρ_0) é dado por:

$$\eta_{cr} = w_{cr} J_\rho \quad (9)$$

Onde w_{cr} é o vetor $J_{cr}(x_{cr}, \rho_{cr})$ correspondente ao autovalor zero e η_{cr} é normalizado de forma que $|\eta_{cr}| = 1$.

A partir do ponto inicial de operação do sistema (x_0, ρ_0) , o sistema é sobrecarregado pelo aumento crescente de ρ em uma direção específica. Cada vez que ρ aumenta, a equação 7 é resolvida para obtenção do vetor de estado $\mathbf{x}$ do sistema. Assim, aumentando ρ continuamente na mesma direção, se alcançará o ponto crítico da estabilidade de tensão, onde a matriz jacobiana do fluxo de potência se torna singular, ou seja:

$$\rho_{cr} = \rho_0 + k\eta \quad (10)$$

Onde k é distância entre o ponto operacional inicial do sistema (x_0, ρ_0) e o ponto crítico de estabilidade de tensão (x_{cr}, ρ_{cr}) .

Para um dado ponto operacional inicial do sistema (x_0, ρ_0) , ρ pode ser aumentado em diferentes direções. Obviamente que o valor de k depende da direção na qual ρ é aumentado. Então o principal objetivo é encontrar a direção do vetor de parâmetro ρ tal que k seja o mínimo local.

2.9.3 Descrição Geral do Procedimento

A figura 6 mostra a superfície singular S em um espaço de parâmetro com componentes ativos e reativos da carga como coordenadas. Na figura, o ponto (P_0, Q_0) representa a condição operacional inicial. A superfície S representa a combinação de todas as combinações de P e Q que resultam em um autovalor zero do jacobiano. Todos os pontos abaixo de S representam condições estáveis de tensão e todos acima de S representam condições instáveis.

Figura 6 – A superfície singular S no plano PQ .

Fonte: (SOBIERAJSKI et al., 2002).

Para qualquer sistema, o procedimento geral para encontrar a distância mínima de um nível de carga inicial (P_0, Q_0) a S é descrito nos passos a seguir:

- **Passo 1:** Aumentar a carga de (P_0, Q_0) em alguma direção até que o autovalor do jacobiano seja praticamente zero. O nível (P_1, Q_1) correspondente a este ponto é o limite de estabilidade de tensão. Neste ponto se encontra ou está extremamente próximo de S ;
- **Passo 2:** Para as condições em (P_1, Q_1) é executado a análise modal e determinado o autovalor a esquerda da matriz jacobiana completa. O autovetor a esquerda contém elementos que fornecem os incrementos de carga ativa e reativa para cada barramento. O autovetor aponta a direção mais curta para a singularidade, que é, portanto, normal para S ;
- **Passo 3:** Volta-se ao nível de carga base (P_0, Q_0) e carrega-se o sistema novamente, mas desta vez na direção fornecida pelo autovetor a esquerda encontrado no passo 2. Quando S é alcançado, um novo vetor a esquerda é calculado;

- o **Passo 4:** Novamente, retorna-se ao caso base (P_0, Q_0) e carrega-se o sistema, mas desta vez na direção do autovetor encontrado no passo 3. Esse processo é repetido até que o autovetor calculado não tenha alteração significativa, ou seja, o processo terá convergido.

Quando convergido, a solução fornece a distância mínima do vetor (P, Q) para S de (P_0, Q_0) . Este processo pode ser aplicado a sistemas práticos de grande porte, no entanto, S é uma hipersuperfície em um espaço de parâmetro da dimensão $2N$, onde N é o número total de barramentos de carga. A forma dessa hipersuperfície é desconhecida e, portanto, pode-se esperar que esse processo encontre apenas um mínimo local. Pelo fato de as não linearidades encontradas no carregamento do sistema de (P_0, Q_0) a A , o mínimo local encontrado depende da direção inicial que é escolhido para carregar.

Redes Neurais Artificiais

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica a respeito dos conceitos que envolvem as redes neurais artificiais, enfatizando-se as principais arquiteturas de redes neurais artificiais e tipos de treinamento, além de descrever como é feito o processo de treinamento de redes *perceptron* multicamadas.

3.1 Conceitos Iniciais

Redes Neurais Artificiais (RNA's) são modelos computacionais inspirados nas redes neurais biológicas. Elas foram desenvolvidas pelo desejo de se construir máquinas capazes de exibir comportamento inteligente, ou seja, uma inteligência artificial.

A inteligência artificial é indicada como uma área da ciência da computação em que se visa a reprodução por meios computacionais das características normalmente atribuídas a inteligência humana, como por exemplo: compreensão da linguagem, aprendizagem, raciocínio, etc.

As características mais relevantes das Redes Neurais Artificiais (RNAs) são:

- **Adaptação por Experiência:** As adaptações dos parâmetros internos da rede são executadas a partir da apresentação sucessiva de exemplos relacionados ao comportamento do processo;
- **Capacidade de Aprendizado:** A rede consegue extrair o relacionamento existente entre diversas variáveis através de métodos de treinamento;
- **Habilidade de Generalização:** Após o treinamento da rede, esta é capaz de generalizar o conhecimento adquirido, desta forma, possibilitando a avaliação de soluções que ainda eram desconhecidas;
- **Organização de Dados:** A rede possui a capacidade de realizar a sua organização interna, possibilitando o agrupamento de padrões que apresentam particularidades em comum;

- o **Tolerância de Falhas:** Pelo fato de possuir elevado nível de interconexões entre os neurônios artificiais, a rede é capaz de tolerar falhas mesmo após sua estrutura interna ser corrompida;
- o **Armazenamento Distribuído:** Mesmo que eventualmente alguns neurônios tornem-se inoperantes, a rede se mantém robusta pelo fato de que o conhecimento a respeito de determinado processo é distribuído entre as diversas sinapses de seus neurônios artificiais;
- o **Facilidade de Prototipagem:** A maioria das arquiteturas neurais pode ser prototipada em hardware ou em software, visto que, após o treinamento, os resultados normalmente são obtidos por operações matemáticas.

3.2 Neurônio Biológico e Artificial

A unidade básica de processamento de uma rede neural artificial é o neurônio. Sua modelagem é inspirada no neurônio biológico, cuja representação pode ser vista na Figura 7. Este neurônio pode ser descrito como um conjunto de fibras nervosas, chamadas **dendritos**, que estão conectadas ao corpo celular, ou soma, onde o núcleo celular está localizado. Uma extensão do corpo celular, chamada de **axônio**, cujas extensões formam arcos em várias ramificações. No final destes estão os transmissores das junções sinápticas, ou simplesmente **sinapses**, que vão para outros neurônios. O axônio de um neurônio típico faz milhares de conexões com sinapses de outros neurônios (LIMA et al., 1996).

Figura 7 – Esquemas de dois neurônios típicos interligados.

Fonte:(LIMA et al., 1996).

A transmissão do sinal de uma célula para outro é feita através de processos químicos no núcleo onde transmissores de substâncias específicas são acumuladas de um lado da junção. O efeito é o aumento ou diminuição do potencial elétrico dentro do corpo celular

da célula receptora. Caso o potencial alcance um limite, um pulso de intensidade e duração fixa é enviado através do axônio, assim, pode-se dizer que a célula foi disparada. Após este disparo, a célula tem um certo tempo de espera, chamado de período refratário, e logo após este tempo, a célula pode ser disparada novamente.

Os neurônios artificiais são modelos mais simplificados em relação aos neurônios biológicos. Os neurônios artificiais usados nos modelos de redes neurais artificiais são não-lineares e fornecem saídas tipicamente contínuas, além disso, realizam funções simples, como coletar os sinais existentes em suas entradas, agregá-los de acordo com a sua função operacional e gerar uma resposta levando em consideração a sua função de ativação (SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2010).

O modelo de neurônio mais simples e que envolve as principais características de uma rede neural biológica foi proposto por McCulloch e Pitts (1943). Este modelo pode ser observado na Figura 8, e apesar de ser simples, trouxe uma grande colaboração para as discussões sobre a construção dos primeiros computadores digitais, possibilitando a criação dos primeiros modelos matemáticos de dispositivos artificiais que buscavam semelhanças com as biológicas.

Figura 8 – Neurônio de McCulloch e Pitts.

Fonte:(SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2010).

Nessa representação, os diversos sinais de entrada provenientes do meio externo são espelhados pelo conjunto $\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$, que são análogos aos impulsos elétricos externos captados pelos dendritos no neurônio biológico.

As ponderações realizadas pelas junções sinápticas do modelo biológico são representadas no neurônio artificial pelo conjunto de pesos sinápticos $\{w_1, w_2, w_3, \dots, w_n\}$. De maneira análoga, a relevância de cada uma das entradas $\{x_i\}$ do neurônio é executada por meio de suas multiplicações pelos respectivos pesos sinápticos $\{w_i\}$. Desta forma, é possível verificar que a saída do corpo celular artificial, indicado por u , é a soma ponderada de suas entradas (SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2010).

Verifica-se então que o neurônio artificial funciona a partir de sete elementos básicos, que são descritos detalhadamente a seguir:

- **Sinais de Entrada** $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$: São sinais ou medidas provenientes do meio externo e que representam os valores apresentados pelas variáveis de uma aplicação específica;
- **Pesos Sinápticos** $\{w_1, w_2, \dots, w_n\}$: São valores que servirão para ponderar cada uma das variáveis de entrada da rede, possibilitando mensurar as suas relevâncias em relação à funcionalidade do neurônio em questão;
- **Combinador Linear** $\{\Sigma\}$: Sua função é associar todos os sinais de entrada que foram ponderados pelos referentes pesos sinápticos a fim de fornecer um valor de potencial de ativação;
- **Limiar de Ativação** $\{\Theta\}$: É uma variável que indica qual é o nível adequado para que o resultado produzido pelo combinador linear possa criar um valor de disparo em direção à saída do neurônio;
- **Potencial de Ativação** $\{u\}$: É o resultado encontrado pela diferença do valor produzido entre o combinador linear e o limiar de ativação. Caso tal valor seja positivo, então o neurônio fornece um potencial excitatório, do contrário, o potencial será inibitório;
- **Função de Ativação** $\{g\}$: Seu objetivo é limitar a saída do neurônio entre um intervalo de valores razoáveis a serem apresentados pela sua própria imagem funcional;
- **Sinal de Saída** $\{y\}$: Representa o valor final produzido pelo neurônio em relação a um determinado conjunto de sinais de entrada.

O funcionamento deste neurônio artificial pode ser descrito matematicamente pelas equações 11 e 12, descritas a seguir:

$$u = \sum_{i=1}^n w_i x_i - \Theta \quad (11)$$

$$y = g(u) \quad (12)$$

As funções de ativação podem ser divididas em dois grupos, ou seja, funções parcialmente diferenciáveis e funções totalmente diferenciáveis, considerando-se para tanto todo o seu domínio de definição.

3.3 Funções de Ativação

A função de ativação $g(u)$ possui a função de processar o potencial de ativação u para produzir a saída final do neurônio y . Os três principais tipos básicos de funções de ativação que são utilizadas em RNAs são descritos a seguir:

- **Função Degrau:** O resultado gerado pela aplicação da função degrau apresentará valores unitários positivos quando o potencial de ativação do neurônio for maior ou igual a zero, do contrário, o resultado apresentará valores nulos, como observado na Equação 13.

$$g(u) = \begin{cases} 0 & \rightarrow u < 0 \\ 1, & \rightarrow u \geq 0 \end{cases} \quad (13)$$

- **Função Rampa Simétrica:** Os valores retornados são iguais aos próprios valores dos potenciais de ativação quando estes estão definidos no intervalo $[-a, a]$, restringindo-se aos valores limites em caso contrário. Matematicamente podemos descrever de acordo com a Equação 14:

$$g(u) = \begin{cases} 1, & \text{se } u \geq 1/2 \\ u, & \text{se } -1/2 < u < 1/2 \\ -a, & \text{se } u \leq -1/2 \end{cases} \quad (14)$$

- **Função Sigmóide:** O resultado da saída gerada pela aplicação da função sigmóide sempre apresentará valores reais entre zero e um. Matematicamente podemos descrever de acordo com a Equação 15:

$$g(u) = \frac{1}{1 + e^{-\beta \cdot u}} \quad (15)$$

As funções de ativação descritas anteriormente apresentam resultados no intervalo $[0 \ 1]$, entretanto, dependendo da aplicação, é desejado que a saída da RNA também apresente valores negativos entre $[-1 \ 1]$. Nesta situação, a função de ativação utilizada deverá ser ímpar. Estritamente para a função sigmóide, sua correspondente ímpar é a função tangente hiperbólica (MORETO, 2005).

3.4 Arquiteturas de Redes Neurais Artificiais

Em geral, somente um neurônio com muitas entradas não é suficiente para a realização de uma tarefa específica, desta forma, é necessário mais neurônios operando em paralelo. A configuração em que os neurônios de uma RNA são estruturados está relacionado com o algoritmo de aprendizagem a ser utilizado em seu treinamento. As principais classes fundamentais de arquiteturas de acordo com as formas de interligação entre elas e a constituição de suas camadas, são:

- Redes *Feedforward* de Camada Única;
- Redes *Feedforward* de Múltiplas Camadas;

- o Redes Recorrentes.

Nos tópicos a seguir, cada classe de arquitetura de RNA são descritas com maiores detalhes.

3.4.1 Redes *Feedforward* de Camada Única

Nesta forma de rede neural, os neurônios são estruturados em uma única camada, onde se tem apenas uma camada de entrada e uma única camada de neurônios, que é a própria camada de saída. Este tipo de arquitetura pode ser observado na Figura 9.

Figura 9 – Rede *Feedforward* de camada única.

Fonte:(MORETO, 2005).

Entre os principais tipos de redes que possuem a arquitetura *feedforward* de camada simples está o *Perceptron*, cujos detalhes serão apresentados em tópicos posteriores.

3.4.2 Redes *Feedforward* de Múltiplas Camadas

Este tipo de arquitetura se diferencia da anterior pelo fato de possuir uma ou mais camadas intermediárias ou escondidas. Quando uma ou mais camadas intermediárias são adicionadas ao sistema, o poder computacional de processamento não-linear e armazenagem da rede é aumentado. O conjunto de saídas dos neurônios de cada uma das camadas é utilizada como entrada para a camada seguinte, como podemos observar na Figura 10.

Geralmente este tipo de arquitetura de rede é treinada utilizando algoritmos de retropropagação de erro (*error backpropagation*), apesar de existirem outros algoritmos de treinamento.

Figura 10 – Rede *Feedforward* de múltiplas camadas.

Fonte:(SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2010).

3.4.3 Redes Recorrentes

As redes recorrentes diferenciam-se das redes *feedforward* pela existência de pelo menos um laço (loop) de recorrência (*feedback*). Esta característica de realimentação qualifica tais redes para o processamento dinâmico de informações, ou seja, elas podem ser utilizadas em sistemas variantes em relação ao tempo, como por exemplo, previsão de séries temporais, otimização e identificação de sistemas, controle de processos, etc (SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2010). A Figura 11 apresenta uma rede *Perceptron* com realimentação, onde tem-se um dos sinais da camada de saída retroalimentado à camada intermediária.

Figura 11 – Redes Recorrentes.

Fonte:(SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2010).

3.5 Tipos de Treinamento

O aprendizado de uma RNA é o resultado de apresentações repetidas de um conjunto de amostras (pares entrada-saída) de treinamento à rede. Cada apresentação de todo um conjunto de treinamento durante o processo de aprendizagem é denominado "época". O processo de aprendizagem é repetido época após época até que um determinado critério de parada seja alcançado (MAMANI et al., 2004). Nos tópicos a seguir, são descritos as duas metodologias de aprendizagem mais comuns.

3.5.1 Treinamento Supervisionado

O treinamento supervisionado baseia-se em possuir, considerando cada amostra dos sinais de entrada, as respectivas saídas desejadas, isto é, cada amostra de treinamento é composta pelos sinais de entradas e suas correspondentes saídas. Deste modo, existe a necessidade de se conceder uma tabela de dados (atributos/valores) representativa do processo, e que também observe o seu comportamento, porque é a partir destas informações que as estruturas neurais irão formular as hipóteses sobre o que será aprendido.

A aplicação do treinamento supervisionado depende apenas da disponibilidade da tabela de atributos/valores, onde tudo se comporta como se houvesse um supervisor ensinando para a rede qual é a resposta certa para cada amostra apresentada em suas entradas.

Os pesos sinápticos e limiares são ajustados por meio de ações comparativas, executadas pelo próprio algoritmo de aprendizagem, que supervisiona a defasagem entre as respostas produzidas pela rede em relação as desejadas, sendo esta diferença utilizada no procedimento de ajuste. A rede é considerada treinada quando tal diferença estiver dentro de valores que foram inseridos no treinamento como aceitáveis (SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2010).

3.5.2 Treinamento Não-Supervisionado

No treinamento não supervisionado da rede são utilizados apenas os valores de entrada, como pode ser observado no diagrama de blocos da Figura 12. Neste tipo de treinamento, a rede usa os neurônios como classificadores e as entradas como elementos a serem classificados, utilizando para isso um processo de competição e cooperação entre os neurônios da rede (MORETO, 2005).

Exemplificando, podemos dizer que no aprendizado não-supervisionado o sinal é aplicado à entrada da RNA e somente o neurônio que possuir o maior valor de campo local induzido se tornará ativo e os demais continuarão inativos. Os pesos sinápticos deste neurônio são definidos de acordo com uma regra de aprendizagem, onde ao fim do processo, terá um valor próximo do sinal de entrada. Deste modo, os sinais de entrada que

Figura 12 – Treinamento Não-Supervisionado.

Fonte:(MORETO, 2005).

possuírem características parecidas serão identificados pela ativação do mesmo neurônio. Cada conjunto de neurônios é responsável por uma única classe de padrões de entrada que deve ser esquematizada após a finalização do treinamento (MORETO, 2005).

3.6 Redes *Perceptron*

O *perceptron* é a forma mais simples de uma rede neural artificial. Ela é usada na classificação de padrões ditos linearmente separáveis. O *perceptron* consiste basicamente de um único neurônio com pesos sinápticos ajustáveis. O algoritmo usado para ajustar os parâmetros livres desta rede neural surgiu em um procedimento de aprendizagem desenvolvido por Rosenblatt (1958) para o seu modelo cerebral do *perceptron*. De fato, Rosenblatt provou que se os padrões (vetores) usados para treinar o *perceptron* são retirados de duas classes linearmente separáveis, logo o algoritmo converge e posiciona a superfície de decisão na forma de um hiperplano entre as duas classes. A prova de convergência do algoritmo é conhecida como o *teorema de convergência do perceptron*.

É importante ressaltar que a rede *perceptron* faz parte da arquitetura *feedforward* de camada única, visto que o fluxo de informações em sua estrutura encontra-se sempre no sentido da camada de entrada em direção à camada neural de saída, inexistindo-se realimentação de valores produzidos pelo seu único neurônio.

3.6.1 Redes *Perceptrons* Multicamadas

As PMC são reconhecidas pela existência de ao menos uma camada intermediária de neurônios, localizada entre a camada de entrada e a respectiva camada neural de saída. Este tipo de rede é caracterizada pelas elevadas possibilidades de aplicações em diversos tipos de problemas relacionados a diversas áreas da ciência. Dentre as principais aplicações, destacam-se:

- Aproximação universal de funções;
- Reconhecimento de padrões;
- Identificação e controle de processos;
- Previsão de séries temporais;

- o Otimização de sistemas.

As PMC fazem parte da arquitetura *feedforward* de múltiplas camadas e seu treinamento é feito de forma supervisionada. O princípio de funcionamento é basicamente da seguinte forma: o conhecimento relacionado ao comportamento entrada/saída do sistema será distribuído por todos os neurônios constituintes do PMC. Os sinais são mostrados à rede em sua camada de entrada. As camadas intermediárias retiram a maioria das informações referentes ao seu comportamento e as codificam por meio dos pesos sinápticos e limiares de seus neurônios, formando assim uma representação própria do ambiente em que está inserido o sistema a ser tratado. Finalmente, os neurônios da camada de saída recebem os estímulos provenientes dos neurônios da última camada intermediária, estabelecendo um padrão de resposta que será a saída disponibilizada pela rede (SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2010).

3.6.2 Processos de Treinamento de Redes *Perceptrons* Multicamadas

O treinamento supervisionado de uma rede neural artificial de múltiplas camadas representa o ajuste dos pesos sinápticos dos neurônios da rede de maneira que o sinal de erro resultante da comparação com a saída desejada apresente o menor valor possível. Desta forma, o problema do treinamento pode ser formulado da seguinte forma:

$$e_j(n) = d_j(n) - y_j(n) \quad (16)$$

$$\xi(n) = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^n e_j^2(n) \quad (17)$$

$$w^* = \min(\xi(n)) \quad (18)$$

Onde,

j é o índice do neurônio de saída da rede;

C é o conjunto de todos os neurônios de saída da RNA;

$e_j(n)$ é o sinal de erro na saída do neurônio j , na iteração n ;

$d_j(n)$ é a resposta desejada para o neurônio j , na iteração n ;

$y_j(n)$ é o sinal calculado pela rede presente na saída do neurônio j , na iteração n ;

$\xi(n)$ é a soma instantânea dos erros quadráticos, ou *energia* do erro na iteração n ;

w^* é o vetor de pesos sinápticos da rede que minimiza o sinal de erro na saída.

Portanto, o treinamento de uma PMC compõe-se em um problema de otimização, onde a cada iteração, se busca minimizar uma função custo, que nesta situação é a soma

instantânea dos erros quadráticos, em função dos parâmetros livres, encontrando um valor w^* que minimize $\xi(n)$.

Algoritmo de *Backpropagation*

O algoritmo de *backpropagation* é uma generalização do algoritmo do mínimo médio, que se baseia na técnica do gradiente descendente, de forma iterativa, para que se possa minimizar uma função de custo igual a diferença média quadrática entre a saída desejada e a saída real da RNA.

No caso de uma RNA de múltiplas camadas, os neurônios ocultos não são acessíveis na saída da rede, portanto não existe uma maneira direta de determinação do grau de influência que um determinado neurônio oculto exerce na saída. Baseado nisto, não é possível saber a forma de ajustar os pesos sinápticos de modo a reduzir o valor da função custo. Para resolver este problema, foi criado o algoritmo de retropropagação, também conhecido como *backpropagation*, que nada mais é do que propagar os sinais de erro para trás. Este algoritmo é constituído de dois passos: a propagação adiante e a propagação para trás (MORETO, 2005).

Propagação Adiante

A primeira etapa a ser feita é denominada "propagação adiante", na qual os sinais $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ de uma amostra do conjunto de treinamento são inseridos nas entradas da rede e são propagados camada a camada até a produção das respectivas saídas. Logo, a aplicação desta etapa visa somente a obtenção das respostas da rede, levando em consideração somente os atuais valores de pesos sinápticos e limiares de seus neurônios, os quais se manterão inalterados durante a execução desta etapa. Vale ressaltar que a saída terá uma diferença com o valor desejado da amostra (SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2010).

Baseando-se na topologia de PMC ilustrada na Figura 10, é apresentado um conjunto de variáveis que norteiam a derivação do algoritmo, como pode ser observado na Figura 13.

Onde,

$W_{ji}^{(L)}$ são matrizes de pesos cujos elementos indicam o valor do peso sináptico conectando o j-ésimo neurônio da camada (L) ao i-ésimo neurônio da camada (L-1).

$I_j^{(L)}$ são os vetores cujos elementos indicam a entrada ponderada em relação ao j-ésimo neurônio da camada L, sendo definido por:

$$I_j^{(L)} = \sum_{i=0}^L W_{ji}^{(L)} . x_i \quad (19)$$

Figura 13 – Notação para derivação do algoritmo *backpropagation*.

Fonte: (SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2010).

$Y_j^{(L)}$ são vetores cujos elementos indicam a saída do j -ésimo neurônio em relação à camada L , sendo definido por:

$$Y_j^{(L)} = g(I_j^{(L)}) \quad (20)$$

O próximo passo consiste em definir a função representativa do erro de aproximação, cuja tarefa é medir o desvio entre as respostas produzidas pelos neurônios de saída da rede em relação aos respectivos valores desejados. É assumido como a função erro quadrático aquela a ser utilizada para a medição do desempenho local associado aos resultados produzidos pelos neurônios de saída frente a referida amostra, ou seja:

$$E(k) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^L (d_j(k) - Y_j^{(L)}(k))^2 \quad (21)$$

Onde $Y_j^{(L)}$ é o valor produzido pelo j -ésimo neurônio de saída da rede considerando-se a k -ésima amostra de treinamento, enquanto $d_j(k)$ é o seu respectivo valor desejado.

A medição da evolução do desempenho global do algoritmo *backpropagation* pode ser efetuada através da avaliação do erro quadrático médio, que pode ser definido pela Equação 22

$$E_M = \frac{1}{\rho} \sum_{k=1}^{\rho} E(k) \quad (22)$$

Após a obtenção da saída do neurônio e calculado o erro quadrático médio na última camada, segue-se para a segunda etapa do algoritmo *backpropagation*, que é o chamado "propagação para trás", também conhecida como "propagação reversa".

Propagação Reversa

Considerando o PMC representado na Figura 13 e que a função de ativação para todos neurônios seja a tangente hiperbólica, temos que para se fazer o ajuste dos pesos sinápticos da camada de saída a fim de minimizar o erro entre a saída produzida pela rede em relação a respectiva saída desejada, é necessário minimizar a Equação 21 empregando a definição de gradiente e explorando a regra de diferenciação em cadeia, logo tem-se:

$$\nabla E^{(3)} = \frac{\partial E}{\partial W_{ji}^{(3)}} = \frac{\partial E}{\partial Y_j^{(3)}} \cdot \frac{\partial Y_j^{(3)}}{\partial I_j^{(3)}} \cdot \frac{\partial I_j^{(3)}}{\partial W_{ji}^{(3)}} \quad (23)$$

$$\frac{\partial E}{\partial W_{ji}^{(3)}} = -(d_j - Y_j^{(3)}) \cdot g'(I_j^{(3)}) \cdot Y_i^{(2)} \quad (24)$$

$$\delta_j^{(3)} = (d_j - Y_j^{(3)}) \cdot g'(I_j^{(3)}) \quad (25)$$

Procedendo, temos que o ajuste da matriz de pesos $W_{ji}^{(3)}$ deve ser efetuado em direção oposta ao gradiente a fim de minimizar o erro, ou seja:

$$\Delta W_{ji}^{(3)} = -\eta \cdot \frac{\partial E}{\partial W_{ji}^{(3)}} = \eta \cdot \delta_j^{(3)} \cdot Y_i^{(2)} \quad (26)$$

Onde,

η é a taxa de aprendizagem do algoritmo backpropagation;

$\delta_j^{(3)}$ é o gradiente local em relação ao neurônio j da camada 3 (saída).

De forma complementar, a Equação 26 pode ser transformada no seguinte procedimento iterativo:

$$W_{ji}^{(3)}(t+1) = W_{ji}^{(3)}(t) + \eta \cdot \delta_j^{(3)} \cdot Y_i^{(2)} \quad (27)$$

Onde t é o número de iterações.

Agora é necessário fazer o ajuste dos pesos sinápticos das camadas intermediárias, porém nesta camadas intermediárias não se tem acesso de forma direta aos valores desejados para as suas saídas. Desta forma, os ajustes dos pesos são feitos por intermédio de estimativas dos erros de saída gerados pelos neurônios da camada seguinte. Logo, os ajustes dos pesos da segunda camada é feito da seguinte forma:

$$\nabla E^{(2)} = \frac{\partial E}{\partial W_{ji}^{(2)}} = \frac{\partial E}{\partial Y_j^{(2)}} \cdot \frac{\partial Y_j^{(2)}}{\partial I_j^{(2)}} \cdot \frac{\partial I_j^{(2)}}{\partial W_{ji}^{(2)}} \quad (28)$$

Então,

$$\frac{\partial E}{\partial Y_j^{(2)}} = - \sum_{k=1}^{n_3} \delta_k^{(3)} \cdot W_{kj}^{(3)} \quad (29)$$

$$\frac{\partial E}{\partial W_j^{(2)}} = - \left(\sum_{k=1}^{n_3} \delta_k^{(3)} \cdot W_{kj}^{(3)} \right) \cdot g'(I_j^{(2)}) \cdot Y_i^1 \quad (30)$$

Procedendo, temos que o ajuste da matriz de pesos $W_{ji}^{(2)}$ deve ser efetuado em direção oposta ao gradiente a fim de minimizar o erro, ou seja:

$$\Delta W_{ji}^{(2)} = -\eta \cdot \frac{\partial E}{\partial W_{ji}^{(2)}} = \eta \cdot \delta_j^{(2)} \cdot Y_i^{(1)} \quad (31)$$

De forma complementar, a Equação 31 pode ser transformada no seguinte procedimento iterativo:

$$W_{ji}^{(2)}(t+1) = W_{ji}^{(2)}(t) + \eta \cdot \delta_j^{(2)} \cdot Y_i^{(1)} \quad (32)$$

Onde,

$$\delta_j^{(2)} = - \left(\sum_{k=1}^{n_3} \delta_k^{(3)} \cdot W_{kj}^{(3)} \right) \cdot g'(I_j^{(2)}) \quad (33)$$

Por fim, o ajuste dos pesos sinápticos da primeira camada escondida consiste basicamente no mesmo procedimento efetuado na segunda camada, logo:

$$W_{ji}^{(1)}(t+1) = W_{ji}^{(1)}(t) + \eta \cdot \delta_j^{(1)} \cdot x_i \quad (34)$$

Onde,

$$\delta_j^{(1)} = - \left(\sum_{k=1}^{n_2} \delta_k^{(2)} \cdot W_{kj}^{(2)} \right) \cdot g'(I_j^{(1)}) \quad (35)$$

Este ciclo (época) se repete até que se alcance o critério de parada, que é calculado em função do erro quadrático médio, apresentado na Equação 22, levando-se em consideração todas as amostras de treinamento disponíveis. O algoritmo converge quando o erro quadrático médio entre duas épocas sucessivas for suficientemente pequeno, isto é:

$$|E_M^{atual} - E_M^{anterior}| \leq \varepsilon \quad (36)$$

Onde,

ε é a precisão requerida para o processo de convergência.

Para cada época sucessiva, o erro quadrático médio global é menor, pois os pesos sinápticos vão se ajustando até alcançar um erro quadrático mínimo.

3.7 Algoritmo Levenberg-Marquardt

O algoritmo mais usado em redes *Perceptron* de multicamadas é o Levenberg-Marquardt, também chamado de método dos mínimos quadrados para modelos não lineares. Esse método é uma otimização do *backpropagation* e pode ser até 100 vezes mais rápido.

Considerando a seguinte função linear

$$F(\mathbf{Y}) = \mathbf{X} \quad (37)$$

Onde $\mathbf{X} \in R^M$ e $\mathbf{Y} \in R^N$ são vetores e $M \geq N$. Frequentemente é necessário estimar o vetor $\vec{Y}$ que melhor ajusta-se ao vetor $\vec{X}$ medido. Esse problema pode ser reformulado como, dado o vetor $\vec{X}$, encontrar o $\vec{Y}$ que minimiza $\|\varepsilon\|$, sujeito a $\vec{X} = F(\vec{Y}) + \|\varepsilon\|$.

Dada uma estimativa inicial $\vec{Y}$, o método de Newton a refina assumindo que $F(\vec{Y} + \delta) = F(\vec{Y}) + J\Delta$, onde J é a matriz jacobiana, ou seja, $J = \partial F / \partial \mathbf{Y}$ e Δ indica um pequeno incremento de $\vec{Y}$. Desta forma, minimizar $\|\varepsilon\|$ significa a minimizar a equação 38.

$$\|\varepsilon - J\Delta\| \quad (38)$$

O que seria o mesmo que resolver a seguinte equação:

$$J^T J \Delta = J^T \varepsilon \quad (39)$$

A solução pode ser aprimorada é dada pela equação 40 e pode ser melhorada iterativamente.

$$\vec{Y}_r = \vec{Y} + \Delta \quad (40)$$

Levenberg (LEVENBERG, 1944) sugeriu uma alteração no algoritmo de Newton para acelerar sua convergência, isto é, podemos substituir a equação 39 por:

$$(J^T J + I\lambda)\Delta = J^T \varepsilon \quad (41)$$

Em geral, utiliza-se inicialmente o igual a 10^{-4} . Entretanto, a cada iteração que ocorre, o valor de λ é modificado. Caso a solução da 39 conduza a uma redução do resíduo, é dividido por 10. Caso contrário, este é multiplicado por 10.

O método de Levenberd possui instabilidades numérica quando o cresce. Por este motivo, alguns anos depois, Marquardt (MARQUARDT, 1963) sugeriu uma sutil alteração no algoritmo de Levenberg, isto é, cada componente do gradiente é ponderada de acordo com a sua curvatura. Logo, ocorre uma disposição de convergência na direção na qual o gradiente seja menor. Isso representa na prática que tal modificação pode ser implementada substituindo a equação 42 por:

$$(J^T J + \text{diag}(J^T J)\lambda)\Delta = J^T \varepsilon \quad (42)$$

Por este motivo, este algoritmo é conhecido atualmente como Levenberg-Marquardt.

A complexidade do algoritmo Levenberg-Marquardt de acordo com número de variáveis. Entretanto, algumas características de diversos problemas encontrados no meio computacional podem ser usadas para diminuir significativamente a complexidade do método, como explicado a seguir.

Considerando que Y na equação 37 possa ser dividido, isto é:

$$Y = [c^T, d^T]^T \quad (43)$$

a matriz jacobiana $\mathbf{J}$ da equação 38 pode ser dividida em dois blocos, ou seja:

$$J = [C|D], \quad C = [\partial X / \partial c], \quad D = [\partial X / \partial d] \quad (44)$$

Desta forma, a equação 39 torna-se:

$$\begin{bmatrix} {}^T C & C^T D \\ D^T C & D^T D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta_c \\ \delta_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C^T \varepsilon \\ D^T \varepsilon \end{bmatrix} \quad (45)$$

Onde, $\Delta = [\delta_c^T, \delta_d^T]^T$

Com algumas manipulações algébricas, a equação apresentada anteriormente pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} U - GV^{-1} & 0 \\ G^T & V \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta_c \\ \delta_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C\varepsilon - GV^{-1}\varepsilon D \\ \varepsilon D \end{bmatrix} \quad (46)$$

Onde,

$$U = C^T; \quad G = C^T D; \quad V = D^T D; \quad \varepsilon C = C^T; \quad \varepsilon D = D^T \varepsilon$$

A solução do problema pode ser dividido em duas partes. A primeira baseia-se em encontrar o δ_c resolvendo a equação 47

$$(U - GV^{-1}G^T)\delta_c = \varepsilon C - GV^{-1}\varepsilon D \quad (47)$$

Desta forma, o δ_d pode ser encontrado resolvendo a equação 48 descrita abaixo:

$$V\delta_d = \varepsilon D - G^T\delta_c \quad (48)$$

Então, levando em consideração que os vetores $\mathbf{d}$ mostrados na equação 43 e $\mathbf{X}$ também possam ser divididos em n partes menores, isto é, $\mathbf{d} = [\mathbf{d}_1^T, \mathbf{d}_2^T, \dots, \mathbf{d}_n^T]$ e $\mathbf{X} = [\mathbf{X}_1^T, \mathbf{X}_2^T, \dots, \mathbf{X}_n^T]$. Também vale destacar que cada observação $\mathbf{X}_i$ depende apenas dos vetores $\mathbf{c}$ exibido na equação 43. Logo, $\partial X_i / \partial d_k = 0$ para $i \neq k$, enquanto que ne-

nhuma dedução pode ser feita a respeito de $\partial X_i / \partial c$. Isso causa que a matriz jacobiana $\mathbf{J} = \partial X / \partial Y$ tenha uma estrutura esparsa, logo a equação 38 torna-se:

$$\left\| \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{C}_1 & \mathbf{D}_1 & & \\ & \mathbf{C}_2 & \mathbf{D}_2 & \\ & \vdots & & \ddots \\ & \mathbf{C}_n & & & \mathbf{D}_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta_c \\ \delta_{d1} \\ \vdots \\ \delta_{dn} \end{bmatrix} \right\| \quad (49)$$

Onde, $C_i = [\partial \mathbf{X}_i / \partial c]$ e $D_i = [\partial \mathbf{X}_i / \partial d_i]$ e $\varepsilon = \vec{Y} - F(\vec{c}, \vec{d}) = [\varepsilon^T_1, \varepsilon^T_2, \dots, \varepsilon^T_n]^T$. Uma observação de relevante importância é que a cada passo que o algoritmo Levenberg-Marguardt Dividido possui complexidade linear em N (número de incógnitas), em contrapartida o algoritmo não-dividido possui complexidade N. Visto que o problema gera uma matriz jacobiana com estrutura da equação 49, torna-se possível a codificação em linguagem computacional.

Metodologia

Neste capítulo é apresentado primeiramente a descrição do sistema de testes IEEE 14 barras e os *softwares* utilizados na pesquisa. Em seguida é apresentado a metodologia proposta para se obter o índice que representa a tendência do nível de tensão dos barramentos de um sistema de transmissão de energia elétrica. Por fim, adapta-se os dados utilizados na obtenção do índice a uma rede neural artificial com o objetivo de comprovar a eficiência desta metodologia em análises de estabilidade de tensão em tempo real.

4.1 Descrição do Sistema de Testes IEEE 14 Barras

O sistema de testes IEEE 14 barras é um sistema bastante utilizado para estudos que envolvem simulações de fluxo de potência. Ele reproduz um pedaço pequeno do sistema elétrico dos Estados Unidos no ano de 1962. O sistema é formado por 14 barras e 17 linhas. O diagrama unifilar e todos os dados relativos ao sistema podem ser encontrados no Apêndice A.

No sistema original, as tensões de operação das barras estão entre 1,01 e 1,09 pu. Estes valores se devem ao fato de que o sistema está com baixo carregamento. As barras 1 (referência) e 2 concentram a maior parte da geração de potência ativa. Para a compensação de reativos existem compensadores síncronos nas barras 3, 6 e 8. Ainda existe um transformador de três enrolamentos que é visto entre as barras 4-7 (primário), 7-9 (secundário) e 7-8 (terciário). O sistema possui 11 cargas que totalizam 259,00 MW e 73,50 Mvar de demanda.

4.2 Descrição dos *Softwares* Utilizados

A seguir são descritos os *softwares* utilizados nos estudos sobre estabilidade de tensão abordados nesta dissertação.

4.2.1 Anarede

Apesar da característica dinâmica do fenômeno de estabilidade de tensão, é possível fazer as análises através de métodos estáticos, uma vez que as simulações no domínio do tempo requerem uma modelagem mais complexa dos componentes do sistema e uma quantidade de dados muito maior. Desta forma, o *software* escolhido foi o Programa de Análises de Redes (ANAREDE), de propriedade do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL). Este *software* é formado por um conjunto de aplicações computacionais para estudos de sistemas elétricos em regime permanente, sendo normalmente utilizado pelas áreas de operação e de planejamento de sistemas elétricos de potência.

A principal aplicação computacional utilizada deste *software* será o "Programa de Fluxo de Potência". Esse programa permite que se faça o cálculo do estado operativo da rede elétrica para condições definidas de carga, geração, topologia e restrições operacionais.

4.2.2 Matlab

O Matlab, também conhecido como *Matrix Laboratory* é um *software* iterativo criado para a computação numérica e visualização de alto desempenho, que oferece uma biblioteca de funções pré-definidas bastante diversificada, como por exemplo, solução de problemas de otimização, processamentos de sinais, manipulações algébricas, redes neurais, entre outros. Seu ambiente de trabalho é de fácil utilização, porque os problemas e soluções são escritos em linguagem matemática e não na linguagem de programação tradicional, como muitos outros *softwares* utilizam.

Esse *software* será usado para a obtenção de algumas variáveis utilizadas nos cálculos para obtenção do índice de estabilidade de tensão. Além disso, será utilizado uma *ToolBox* para a criação da rede neural artificial.

***Toolbox* NFTool**

Uma das interfaces gráficas mais usadas para a criação de redes neurais artificiais no Matlab é o Neural Network Fitting Tool (NFTool). Essa interface gráfica permite o treinamento supervisionado de uma rede neural utilizando uma rede progressiva multicamada através do algoritmo de Levenberg-Maquardt.

4.3 Cálculo do Índice de Estabilidade de Tensão em Linhas de Transmissão

A seguir é descrito a metodologia proposta para se obter o índice que representa a tendência do nível de tensão dos barramentos de um sistema de transmissão.

4.3.1 A Curva PQ da Linha de Transmissão

Uma linha de transmissão ou um transformador de potência pode ser caracterizado por sua resistência (R), reatância (X_L) e susceptibilidade (B_C), como ilustrado na figura 14.

Figura 14 – Esquema de uma linha de transmissão.

Fonte: Adaptado de (PAOSATEANPUN et al., 2006).

Supondo que a magnitude da tensão $|V_S|$ no nó de envio e a potência ativa e reativa no nó de recebimento são conhecidos, é possível obter a carga do nó receptor à beira do colapso de tensão a partir da equação 50:

$$\begin{aligned} (c_3^2 - 4c_1c_4)Q_{cr}^2 + (2c_2c_3)Q_{cr}P_{cr} + (c_2^2 - 4c_1c_4)P_{cr}^2 - \\ (2c_3|V_S|^2)Q_{cr} - (2c_2|V_S|^2)P_{cr} + |V_S|^4 = 0 \end{aligned} \quad (50)$$

Onde,

$$\begin{aligned} c_1 &= (1 - X_L B_C)^2 + (R B_C)^2, & c_2 &= 2R, \\ c_3 &= 2[X_L - X_L^2 B_C - R^2 B_C], & c_4 &= R^2 + X_L^2 \end{aligned} \quad (51)$$

Considerando que $x = Q_{cr}$ e $y = P_{cr}$ e substituindo na 51, temos que:

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0 \quad (52)$$

Onde,

$$\begin{aligned} A &= c_3^2 - 4c_1c_4, & B &= 2c_2c_3, & C &= c_2^2 - 4c_1c_4, \\ D &= -2c_3|V_S|^2, & E &= -2c_2|V_S|^2, & F &= |V_S|^4 \end{aligned} \quad (53)$$

A equação 52 representa uma parábola, pois $B \neq 0$ e o discriminante é zero. Portanto, uma curva PQ de uma linha de transmissão de energia elétrica é uma parábola.

Os valores dos coeficientes c_1 , c_2 e c_4 nunca serão menores do que zero. Já o valor do coeficiente c_3 depende da susceptância (B_C) da linha de transmissão, que pode ser classificada em três casos:

- $B_C < 0$: Caso o transformador possua a susceptância menor do que zero, o coeficiente c_3 será maior que zero.
- $B_C = 0$: Caso a susceptância seja negligenciada, o coeficiente c_3 será maior que zero.
- $B_C > 0$: Caso a susceptância seja maior do que zero, geralmente $X_L > (X_L^2 + R^2)B_C$ produz um coeficiente c_3 maior que zero.

Logo, somente coeficientes c_3 maiores do que zero são considerados nos cálculos.

Realizando algumas substituições algébricas, podemos reescrever a equação 52 da seguinte forma:

$$Q_{cr} = -k(P_{cr})^2 + \frac{0.25}{k} \quad (54)$$

Onde,

$$k = \frac{\sqrt{c_1 c_4}}{|V_S|^2} \quad (55)$$

A equação 54 caracteriza a potência reativa no ponto de colapso da tensão mais próximo limite de estabilidade de tensão da linha de transmissão. O tamanho da curva PQ da linha depende dos parâmetros da linha e da magnitude da tensão no barramento de envio. Se os parâmetros da linha são constantes, o tamanho da curva PQ é proporcional à magnitude da tensão no barramento de envio.

4.3.2 Análise de Linhas Fracas Através do Método da Curva PQ

Conhecendo o fluxo de estado estacionário (P_0, Q_0) , podemos calcular a distância mínima deste ponto ao ponto de colapso da tensão (P_{cr}, Q_{cr}) . A linha normal a curva de limite PQ em seu ponto determinado (P_{cr}, Q_{cr}) é definida como a perpendicular à linha tangente traçada através do ponto de tangência (P_{cr}, Q_{cr}) , ilustrada na figura 15.

Portanto, o P_{cr} pode ser escrito da seguinte maneira :

$$(P_{cr})^3 + \left(\frac{Q_0}{k} + \frac{1}{4k^2}\right)P_{cr} - \frac{P_0}{2k^2} = 0 \quad (56)$$

Onde P_{cr} é a potência ativa no ponto de colapso da tensão mais próximo limite de estabilidade de tensão da linha de transmissão.

Figura 15 – Distância do ponto de operação até o ponto de colapso de tensão.

Fonte: Adaptado de (PAOSATEANPUN et al., 2006).

Agora, considerando que $y = P_{cr}$, podemos simplificar a equação 56 da seguinte forma:

$$y^3 + ay + b = 0 \quad (57)$$

Onde,

$$a = \frac{Q_0}{k} + \frac{1}{4k^2} \quad (58)$$

$$b = -\frac{P_0}{2k^2} \quad (59)$$

Então, utilizando o *software* Matlab pode-se encontrar a raiz real da equação 57 e assim obter a potência ativa no ponto de colapso de tensão.

Distância Mínima para o Ponto de Colapso de Tensão

Agora que conhecemos o P_{cr} e Q_{cr} do sistema, podemos encontrar a distância mínima até o ponto de colapso de tensão a partir de qualquer ponto de operação do sistema de transmissão através da equação 60:

$$d_{cv} = \sqrt{(P_{cr} - P_0)^2 + (Q_{cr} - Q_0)^2} \quad (60)$$

4.3.3 Região Estável de Transmissão

Considerando que o ponto aleatório (P_0, Q_0) esteja inserido entre os valores máximos e mínimos de potência ativa e reativa, como ilustrado na figura 16, é possível determinar a região estável de transmissão através de cálculos geométricos, como mostrado na equação 61.

Figura 16 – Carga distribuída entre os pontos máximos e mínimos.

Fonte: Adaptado de (PAOSATEANPUN et al., 2006).

$$\rho_{area} = \frac{S_{interno}}{S} \quad (61)$$

Onde, S é área retangular ABCD, representada pela equação 62.

$$S = (P_{max} - P_{min})(Q_{max} - Q_{min}) \quad (62)$$

e $S_{interno}$ representa a área abaixo da curva PQ, representada pela equação 64.

$$S_{interno} = \frac{-k}{3}[(P_{max})^3 - (P_{min})^3] + \left[\frac{0.25}{k} - Q_0\right][P_{max} - P_{min}] - \frac{1}{2}[(P_0 - P_{min})(Q_{max} - Q_0) + (P_{max} - P_0)(Q_{min} - Q_0)] \quad (63)$$

4.3.4 Índice de Colapso de Tensão

Diante do exposto nos tópicos anteriores, é proposto a criação de um índice que represente a tendência do nível de tensão dos barramentos de um sistema de transmissão de energia elétrica. Esse índice é composto pelo produto da distância mínima até o ponto de colapso de tensão e o coeficiente que representa a região estável de operação da linha de transmissão em questão, como observado na equação 64.

$$c_{cv} = d_{cv} \cdot \rho_{area} \quad (64)$$

Os índices com os menores valores representam os barramentos que estão mais fracos, ou seja, com menores níveis de tensão e mais inclinados a sofrer um colapso de tensão.

Desta forma, podemos descrever o algoritmo para a obtenção do índice de colapso de tensão da seguinte forma:

- **Passo 1:** Executar o fluxo de potência do sistema elétrico;
- **Passo 2:** Obter a curva PQ para a linha de transmissão ou transformador de potência;
- **Passo 3:** Calcular a distância mínima para o colapso de tensão do barramento;
- **Passo 4:** Calcular o coeficiente que representa a região estável de operação do barramento;
- **Passo 5:** Calcular o índice de colapso de tensão do barramento.

4.4 Treinamento da Rede Neural Artificial

Para a aplicação da metodologia apresentada anteriormente em conjunto com uma rede neural artificial, os seguintes dados serão utilizados:

Dados de Entrada

- Potência ativa de todos barramentos do sistema;
- Potência reativa de todos barramentos do sistema;
- Hora do dia.

Dados de Saída

- Índices de colapso de tensão dos barramentos do sistema.

4.4.1 Arquitetura da Rede Neural Artificial

Após a obtenção dos de todos dados de entrada e saída da rede neural artificial, será utilizado a *Toolbox* NFTool. Esta representará a arquitetura de uma rede neural *Feedforward* Multicamadas com duas camadas escondidas, como ilustrado na figura 17. Serão utilizados vetores com 23 dados de entrada e 11 dados de saída para cada um dos 60 cenários de carregamento do sistema.

A primeira camada escondida possuirá 10 neurônios e a segunda 11. A camada de saída possuirá 11 neurônios que corresponderão aos índices de estabilidade de tensão das 11 barras que possuem cargas. Além disso, deverão possuir erros mínimos para ser comprovado a eficiencia desta metodologia em análises de estabilidade de tensão em tempo real.

A função de ativação a ser utilizada nas camadas ocultas será a tangente hiperbólica e para a camada de saída será a linear. O algoritmo de treinamento escolhido será o Levenberg-Marquardt, pois apesar de exigir mais memória, consome menos tempo de processamento. Para evitar cair em um mínimo local, a rede foi treinada 8 vezes e os pesos escolhidos foram os que apresentaram o menor erro quadrado médio.

Figura 17 – Arquitetura da rede neural.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Resultados

Neste capítulo apresentam-se os resultados do estudo do desempenho de uma rede neural artificial para estimação de um índice que represente o comportamento do nível de tensão de um sistema elétrico de potência. Para tanto, utilizou-se o *software* ANAREDE para simular o sistema IEEE 14 barras com o objetivo de obter os fluxos de potência do sistema em diferentes níveis de carregamento e com isso, aplicar a metodologia proposta nesta dissertação.

5.1 Obtenção do Índice de Estabilidade de Tensão para Rede de Testes IEEE 14 Barras

O primeiro passo necessário para aplicação da metodologia proposta é criar curvas de cargas que representem o comportamento do carregamento do sistema ao longo do dia. Desta forma, foram criadas 12 curvas de carga que representam os níveis de carregamento do sistema IEEE 14 barras considerando o intervalo de duas horas entre uma curva e outra, como observado no tópico a seguir.

5.1.1 Curvas de Carga

Nas tabelas a seguir são mostrados os níveis de carregamento do sistema de acordo com o horário do dia. Para melhor visualização, estes mesmos dados podem ser consultados no Apêndice B em forma de gráficos.

Tabela 2 – Níveis de carga na barra 02.

	2h	4h	6h	8h	10h	12h	14h	16h	18h	20h	22h	24h
P	7,2	7,3	7,5	21,5	22,0	23,4	23,0	23,2	20,0	14,1	9,5	7,5
Q	5,2	5,3	5,5	12,7	13,0	14,2	13,4	13,2	12,6	10,0	6,6	5,5

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 3 – Níveis de carga na barra 03.

	2h	4h	6h	8h	10h	12h	14h	16h	18h	20h	22h	24h
P	24,3	24,8	25,6	92,5	103,5	85,3	105,3	105,5	92,3	55,3	35,6	25,5
Q	5,1	5,3	6,0	18,6	20,3	22,0	21,8	21,8	20,8	13,7	8,8	5,3

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4 – Níveis de carga na barra 04.

	2h	4h	6h	8h	10h	12h	14h	16h	18h	20h	22h	24h
P	24,6	24,8	25,6	45,4	58,6	66,5	65,4	65,5	60,0	40,3	30,4	24,6
Q	-1,5	-1,7	-1,8	-3,5	-4,6	-5,8	-5,7	-5,75	-4,8	-3,0	-2,1	-1,5

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 5 – Níveis de carga na barra 05.

	2h	4h	6h	8h	10h	12h	14h	16h	18h	20h	22h	24h
P	5,7	5,9	6,7	7,1	7,2	8,2	7,6	7,5	12,8	13,1	10,5	6,4
Q	0,75	0,9	1,3	1,8	1,85	2,4	2,0	2,0	3,4	3,7	2,8	1,2

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 6 – Níveis de carga na barra 06.

	2h	4h	6h	8h	10h	12h	14h	16h	18h	20h	22h	24h
P	8,1	8,4	9,5	10,8	10,7	12,9	11,2	11,1	14,3	18,3	15,2	9,1
Q	6,0	6,2	6,8	7,2	7,1	9,3	7,8	7,7	8,9	10,1	9,1	6,6

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 7 – Níveis de carga na barra 09.

	2h	4h	6h	8h	10h	12h	14h	16h	18h	20h	22h	24h
P	11,3	11,6	12,0	28,9	38,7	42,0	41,8	41,9	36,1	25,3	15,4	11,3
Q	8,3	8,5	8,8	15,8	19,8	21,1	20,8	20,9	18,7	14,1	11,5	8,6

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 8 – Níveis de carga na barra 10.

	2h	4h	6h	8h	10h	12h	14h	16h	18h	20h	22h	24h
P	6,1	6,4	7,6	9,3	9,1	10,3	9,5	9,6	11,5	15,5	12,6	7,2
Q	3,7	3,9	5,0	5,5	5,4	6,9	5,9	5,8	7,5	9,1	8,0	4,1

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 9 – Níveis de carga na barra 11.

	2h	4h	6h	8h	10h	12h	14h	16h	18h	20h	22h	24h
P	2,1	2,4	3,1	3,0	3,1	4,0	3,9	3,8	5,0	6,3	4,5	2,8
Q	0,9	1,1	1,5	1,6	1,6	2,0	1,9	1,9	2,5	3,2	2,2	1,5

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 10 – Níveis de carga na barra 12.

	2h	4h	6h	8h	10h	12h	14h	16h	18h	20h	22h	24h
P	4,8	5,0	5,7	6,3	6,2	7,3	6,8	6,7	8,0	10,5	7,5	5,4
Q	0,9	1,1	1,3	1,6	1,65	2,1	1,9	1,85	2,0	3,1	2,2	1,2

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 11 – Níveis de carga na barra 13.

	2h	4h	6h	8h	10h	12h	14h	16h	18h	20h	22h	24h
P	9,7	10,0	12,8	13,1	11,4	13,2	11,3	11,4	18,5	21,6	17,0	11,1
Q	3,4	3,8	5,1	5,7	4,4	5,8	4,3	4,4	8,1	9,5	7,5	4,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 12 – Níveis de carga na barra 14.

	2h	4h	6h	8h	10h	12h	14h	16h	18h	20h	22h	24h
P	10,1	10,3	11,5	15,4	15,2	16,7	15,5	15,6	18,0	19,2	15,0	11,4
Q	2,8	3,0	3,8	5,3	5,2	6,2	5,5	5,6	6,5	7,1	4,9	3,7

Fonte: Elaborado pelo autor.

Produzidas as curvas de cargas do sistema, o próximo passo foi obter os índices de estabilidade de tensão do sistema.

5.1.2 Cálculo dos Índices

Após o levantamento das curvas de cargas, executou-se o cálculo do fluxo de potência, e assim, aplicou-se a metodologia proposta para a obtenção dos índices de estabilidade de tensão do sistema em situação normal de operação. Também foi realizado o cálculo dos índices de estabilidade de tensão que caracteriza o limite mínimo de tensão permitido para cada um dos barramentos durante as simulações, que neste caso foi 0,8 (p.u). Para isso, foi executado o fluxo de potência continuado afim de sobrecarregar uma barra específica do sistema até que esta alcançasse o critério de parada, que neste caso foi a tensão mínima permitida. Deste forma, foi possível encontrar o valor do índice de estabilidade de tensão que indica quando o nível de tensão desta barra está em 0,8 (p.u). Logo, foi necessário executar 11 fluxos de potência continuado para cada cenário de carregamento do dia, totalizando 132 simulações. Os resultados obtidos podem ser observados nas tabelas a seguir.

Tabela 13 – Índices do sistema de potência às 2h.

OPERAÇÃO EM SITUAÇÃO NORMAL											
Barra	2	3	4	5	6	9	10	11	12	13	14
Tensão (p.u)	1,045	1,032	1,034	1,033	1,071	1,079	1,073	1,070	1,062	1,061	1,060
IET	0,950	0,983	0,313	4,055	0,868	1,773	2,170	0,924	0,678	1,318	0,481
LIMITE MÍNIMO DE TENSÃO											
Barra	2	3	4	5	6	9	10	11	12	13	14
Tensão (p.u)	0,804	0,804	0,803	0,800	0,803	0,802	0,801	0,803	0,802	0,801	0,802
IET	0,579	0,397	0,188	2,349	0,473	0,970	1,182	0,472	0,308	0,684	0,221

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 14 – Índices do sistema de potência às 4h.

OPERAÇÃO EM SITUAÇÃO NORMAL											
Barra	2	3	4	5	6	9	10	11	12	13	14
Tensão (p.u)	1,045	1,031	1,034	1,032	1,070	1,078	1,072	1,069	1,060	1,059	1,058
IET	0,947	0,981	0,311	4,046	0,864	1,773	2,618	0,922	0,677	1,317	0,517
LIMITE MÍNIMO DE TENSÃO											
Barra	2	3	4	5	6	9	10	11	12	13	14
Tensão (p.u)	0,805	0,802	0,802	0,802	0,802	0,803	0,802	0,801	0,800	0,802	0,802
IET	0,577	0,396	0,186	2,369	0,470	0,976	1,187	0,473	0,313	0,696	0,256

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 15 – Índices do sistema de potência às 6h.

OPERAÇÃO EM SITUAÇÃO NORMAL											
Barra	2	3	4	5	6	9	10	11	12	13	14
Tensão (p.u)	1,045	1,029	1,031	1,030	1,070	1,075	1,068	1,066	1,058	1,056	1,053
IET	0,939	0,977	0,305	4,028	0,856	1,772	2,156	0,912	0,680	1,324	0,479
LIMITE MÍNIMO DE TENSÃO											
Barra	2	3	4	5	6	9	10	11	12	13	14
Tensão (p.u)	0,802	0,804	0,801	0,805	0,803	0,804	0,801	0,802	0,802	0,804	0,804
IET	0,562	0,413	0,179	2,404	0,465	0,988	1,199	0,478	0,328	0,719	0,237

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 16 – Índices do sistema de potência às 8h.

OPERAÇÃO EM SITUAÇÃO NORMAL											
Barra	2	3	4	5	6	9	10	11	12	13	14
Tensão (p.u)	1,038	1,010	1,016	1,017	1,070	1,056	1,051	1,057	1,055	1,050	1,035
IET	0,794	0,918	0,276	3,879	0,830	1,758	2,074	0,874	0,681	1,328	0,480
LIMITE MÍNIMO DE TENSÃO											
Barra	2	3	4	5	6	9	10	11	12	13	14
Tensão (p.u)	0,801	0,804	0,803	0,803	0,800	0,801	0,802	0,804	0,802	0,804	0,801
IET	0,400	0,486	0,150	2,385	0,443	1,006	1,197	0,483	0,364	0,765	0,277

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 17 – Índices do sistema de potência às 10h.

OPERAÇÃO EM SITUAÇÃO NORMAL											
Barra	2	3	4	5	6	9	10	11	12	13	14
Tensão (p.u)	1,035	1,010	1,010	1,013	1,070	1,048	1,044	1,054	1,055	1,051	1,031
IET	0,781	0,899	0,263	3,830	0,821	1,798	2,055	0,864	0,693	1,331	0,482
LIMITE MÍNIMO DE TENSÃO											
Barra	2	3	4	5	6	9	10	11	12	13	14
Tensão (p.u)	0,800	0,806	0,802	0,803	0,805	0,805	0,804	0,804	0,801	0,805	0,806
IET	0,367	0,456	0,145	2,372	0,444	1,040	1,206	0,480	0,354	0,756	0,271

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 18 – Índices do sistema de potência às 12h.

OPERAÇÃO EM SITUAÇÃO NORMAL											
Barra	2	3	4	5	6	9	10	11	12	13	14
Tensão (p.u)	0,998	1,000	1,003	1,070	1,038	1,052	1,046	1,020	1,052	1,046	1,020
IET	0,670	0,882	0,252	4,323	0,750	1,777	2,043	0,789	0,684	1,283	0,483
LIMITE MÍNIMO DE TENSÃO											
Barra	2	3	4	5	6	9	10	11	12	13	14
Tensão (p.u)	0,801	0,802	0,801	0,801	0,801	0,805	0,802	0,801	0,803	0,804	0,801
IET	0,326	0,466	0,136	2,419	0,423	1,054	1,208	0,466	0,371	0,746	0,283

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 19 – Índices do sistema de potência às 14h.

OPERAÇÃO EM SITUAÇÃO NORMAL											
Barra	2	3	4	5	6	9	10	11	12	13	14
Tensão (p.u)	1,031	1,002	1,004	1,007	1,070	1,043	1,039	1,051	1,054	1,050	1,026
IET	0,744	0,885	0,257	3,768	0,811	1,746	2,016	0,848	0,681	1,329	0,483
LIMITE MÍNIMO DE TENSÃO											
Barra	2	3	4	5	6	9	10	11	12	13	14
Tensão (p.u)	0,802	0,804	0,803	0,803	0,800	0,801	0,802	0,800	0,802	0,804	0,801
IET	0,337	0,475	0,139	2,345	0,424	1,034	1,186	0,463	0,365	0,767	0,288

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 20 – Índices do sistema de potência às 16h.

OPERAÇÃO EM SITUAÇÃO NORMAL											
Barra	2	3	4	5	6	9	10	11	12	13	14
Tensão (p.u)	1,031	1,002	1,004	1,007	1,070	1,042	1,039	1,051	1,054	1,050	1,026
IET	0,744	0,885	0,203	3,767	0,811	1,743	2,016	0,848	0,681	1,329	0,483
LIMITE MÍNIMO DE TENSÃO											
Barra	2	3	4	5	6	9	10	11	12	13	14
Tensão (p.u)	0,803	0,801	0,802	0,800	0,804	0,805	0,805	0,800	0,803	0,802	0,803
IET	0,339	0,459	0,099	2,338	0,435	1,050	1,212	0,471	0,364	0,759	0,277

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 21 – Índices do sistema de potência às 18h.

OPERAÇÃO EM SITUAÇÃO NORMAL											
Barra	2	3	4	5	6	9	10	11	12	13	14
Tensão (p.u)	1,026	0,999	0,990	0,994	1,046	1,024	1,018	1,027	1,026	1,019	0,999
IET	0,754	0,853	0,238	3,667	0,772	1,696	1,955	0,814	0,654	1,280	0,456
LIMITE MÍNIMO DE TENSÃO											
Barra	2	3	4	5	6	9	10	11	12	13	14
Tensão (p.u)	0,803	0,801	0,803	0,802	0,802	0,802	0,802	0,803	0,802	0,804	0,801
IET	0,359	0,449	0,131	2,349	0,432	1,055	1,224	0,482	0,375	0,796	0,281

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 22 – Índices do sistema de potência às 20h.

OPERAÇÃO EM SITUAÇÃO NORMAL											
Barra	2	3	4	5	6	9	10	11	12	13	14
Tensão (p.u)	1,038	1,010	1,007	1,007	1,052	1,043	1,033	1,036	1,028	1,023	1,010
IET	0,839	0,917	0,248	3,832	0,790	1,750	2,041	0,843	0,665	1,297	0,459
LIMITE MÍNIMO DE TENSÃO											
Barra	2	3	4	5	6	9	10	11	12	13	14
Tensão (p.u)	0,802	0,806	0,801	0,801	0,800	0,801	0,802	0,804	0,801	0,806	0,801
IET	0,442	0,467	0,129	2,409	0,435	1,042	1,237	0,424	0,380	0,802	0,274

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 23 – Índices do sistema de potência às 22h.

OPERAÇÃO EM SITUAÇÃO NORMAL											
Barra	2	3	4	5	6	9	10	11	12	13	14
Tensão (p.u)	1,045	1,019	1,023	1,023	1,070	1,064	1,056	1,059	1,052	1,048	1,040
IET	0,892	0,964	0,284	3,961	0,831	1,766	2,119	0,882	0,683	1,333	0,479
LIMITE MÍNIMO DE TENSÃO											
Barra	2	3	4	5	6	9	10	11	12	13	14
Tensão (p.u)	0,803	0,800	0,802	0,800	0,801	0,804	0,804	0,803	0,803	0,805	0,802
IET	0,507	0,440	0,160	2,395	0,443	1,018	1,225	0,476	0,357	0,764	0,254

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 24 – Índices do sistema de potência às 24h.

OPERAÇÃO EM SITUAÇÃO NORMAL											
Barra	2	3	4	5	6	9	10	11	12	13	14
Tensão (p.u)	1,045	1,030	1,033	1,031	1,070	1,077	1,070	1,068	1,059	1,058	1,055
IET	0,944	0,979	0,309	4,039	0,881	1,773	2,162	0,920	0,678	1,320	0,480
LIMITE MÍNIMO DE TENSÃO											
Barra	2	3	4	5	6	9	10	11	12	13	14
Tensão (p.u)	0,801	0,802	0,803	0,801	0,802	0,801	0,803	0,804	0,801	0,803	0,802
IET	0,566	0,398	0,184	2,376	0,467	0,974	1,187	0,487	0,318	0,701	0,232

Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando os dados calculados pode-se verificar que as barras de número 4 e 14 são as mais fracas no sistema em estudo. Caso os valores do índice de estabilidade de tensão destas barras convirjam progressivamente para o limite mínimo, isso poderá resultar em um colapso de tensão do sistema. Desta forma, o método proposto pode servir como uma forma de alerta aos operadores do sistema, permitindo assim que eles tenham tempo hábil para corrigir esse problema antes que ele ocorra.

5.2 Resultados do Treinamento da RNA

Como mencionado no capítulo 4, utilizou-se uma rede neural artificial de alimentação múltipla, com aprendizado de propagação de erro. O processo de treinamento é descrito com maiores detalhes a seguir.

5.2.1 Processo de Treinamento

O processo de treinamento foi realizado usando o algoritmo de propagação de erro adaptativo para treinar a rede desenvolvida com um conjunto de entradas e saídas desejadas. Assim, foram introduzidos 120 cenários aleatórios de carregamento do sistema e calculados os índices de estabilidade de tensão para cada um dos cenários. Esses cenários foram divididos por doze, o que representa 10 cenários diferentes para cada intervalo de duas horas ao longo do dia. Com esse banco de dados a rede foi treinada utilizando o Toolbox *NFtool* do Matlab diversas vezes até que a mesma alcançasse um erro quadrático médio mínimo, como podemos observar nas curvas de desempenho do treinamento, validação e teste ilustradas na Figura 18. O resultado é razoável, porque o erro do conjunto de testes e o erro do conjunto de validação têm características semelhantes.

Figura 18 – Desempenho do treinamento da RNA.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Podemos ainda confirmar o desempenho da rede neural desenvolvida usando o cálculo do erro absoluto para cada padrão de teste e usando a regressão de linear, como ilustrado na Figura 19. Para identificar melhor a precisão do treinamento, a rede desenvolvida deve indicar o coeficiente de correlação R mais próximo do valor 1.

Figura 19 – Regressão linear da rede neural.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, conclui-se a apresentação da RNA desenvolvida para o monitoramento de estabilidade de tensão em sistemas de potência. A partir do processo de testes, foi confirmado que o método proposto é capaz de prever o índice de estabilidade de tensão para os barramentos de carga na rede do sistema de potência.

O método proposto foi testado utilizando o sistema de teste IEEE 14 barras e indicou uma boa conformidade entre a saída desejada e a saída da rede neural. O índice de estabilidade de tensão utilizado como saída da RNA foi calculado através do método de curvas PQ das linhas de transmissão, onde a desestabilidade de tensão está associada a redução progressiva do valor do índice. O barramento com o índice de menor valor será o barramento mais vulnerável do sistema e, portanto, esse método ajuda a identificar as áreas fracas do sistema que precisam de suporte de energia reativa.

5.2.2 Teste da Rede Neural Artificial

Para que seja comprovada a eficiência da rede neural artificial desenvolvida neste trabalho, foram inseridos dados de entrada desconhecidos pela RNA e executado uma estimativa dos valores das saídas utilizando a rede neural treinada. Desta forma, foi avaliado a diferença percentual dos resultados obtidos através do procedimento de cálculo apresentado no Capítulo 4 e da rede neural desenvolvida. Os dados de entrada utilizados no teste são mostrados na tabela 25 e os resultados obtidos por ambos os métodos podem ser observados na tabela 26.

Tabela 25 – Níveis de carga nas barras do sistema de potência.

P2	P3	P4	P5	P6	P9	P10	P11	P12	P13	P14
13.0	30.0	24.0	26.0	27.0	21.0	30.0	29.0	8.0	24.0	15.0
Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q9	Q10	Q11	Q12	Q13	Q14
8.0	21.0	13.0	14.0	18.0	9.0	15.0	12.0	4.0	12.0	7.0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 26 – Diferença percentual entre os métodos.

ÍNDICE DE ESTABILIDADE	CALCULADO	RNA	DIFERENÇA PERCENTUAL
IET_2	0.899	0.821	8.7%
IET_3	0.886	0.896	1.1%
IET_4	0.257	0.279	8.9%
IET_5	3.430	3.256	5.1%
IET_6	0.661	0.636	3.8%
IET_9	1.356	1.291	4.8%
IET_{10}	1.579	1.520	3.7%
IET_{11}	0.650	0.630	3.1%
IET_{12}	0.504	0.477	5.4%
IET_{13}	0.972	0.960	1.2%
IET_{14}	0.355	0.354	0.4%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se observar que os resultados encontrados pela RNA foram satisfatórios, visto que a maior variação percentual entre os resultados obtidos foi de 8,9% e a menor foi de 0,4%.

Conclusão

Neste trabalho foi desenvolvido uma metodologia para a obtenção de um índice de estabilidade de tensão em sistemas elétricos de potência combinado ao uso de redes neurais artificiais. Desta forma, foi proposto uma ampla revisão bibliográfica para entender o fenômeno da instabilidade de tensão em sistemas elétricos de potência, para que em seguida fosse elaborada uma metodologia que combinasse o índice supracitado e redes neurais artificiais, e assim aplicá-lo, em tempo real, em análises de sistemas elétricos de potência.

O principal conceito utilizado para a obtenção do índice de estabilidade de tensão foi o da curva PQ. Este conceito estabelece que na região inferior da curva PQ, o sistema pode operar normalmente, mas na região fora desta curva, a operação é impossível. Assim, foram executados vários fluxos de potência em diferentes estados de operação do sistema afim de obter os dados necessários para o treinamento da rede neural artificial. Com a rede treinada, exclui-se a necessidade de novos fluxos de potência para obtenção dos índices em níveis de carregamentos desconhecidos.

Os resultados obtidos neste trabalho mostraram a eficiência da rede neural artificial em estimar devidamente, em tempo real, a margem de estabilidade de tensão do sistema elétrico, permitindo assim, que o operador do sistema tenha um indicativo da direção, em relação a estabilidade de tensão, que qualquer barramento do sistema está tomando, permitindo uma ação preventiva para que este distúrbio não ocasione maiores problemas ao sistema. Diante do exposto, pode-se afirmar que a metodologia proposta consitui de uma importante ferramenta para monitoração de sistemas elétricos de potência.

6.1 Trabalhos Futuros

Nesta subseção são apresentadas algumas sugestões que visam dar continuidade à pesquisa iniciada no presente trabalho de dissertação. As principais são:

- Avaliar a eficiência de análise em tempo real desta metodologia em sistemas teste

de maior porte;

- o Inserir mudanças topológicas e operacionais no sistema para obtenção de mais dados a serem utilizados no treinamento da rede neural artificial;
- o Adaptar e aplicar esta metodologia em sistemas de transmissão em corrente contínua.

Referências

- AIK, D. H.; ANDERSSON, G. Use of participation factors in modal voltage stability analysis of multi-infeed hvdc systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, IEEE, v. 13, n. 1, p. 203–211, 1998.
- BALU, C. W. T. N. J.; MARATUKULAM, D. **Power system voltage stability**. [S.l.]: McGraw-hill, 1994.
- BOMPARD, E. et al. A practical application of bifurcation theory to dynamic voltage stability. In: **CIGRÉ Study Committee 38 Colloquium on Power System Dynamic Performance**. [S.l.: s.n.], 1993.
- FERREIRA, L. C. d. A. Análise a longo-termo da estabilidade de tensão utilizando métodos estáticos e um sistema especialista fuzzy para representação de ações de controle. 2008.
- FRANCISCO, G. d. S. Avaliação de ferramentas de análise de estabilidade de tensão. **Itajubá, MG**, 2005.
- GAO, B.; MORISON, G.; KUNDUR, P. Voltage stability evaluation using modal analysis. **IEEE transactions on power systems**, IEEE, v. 7, n. 4, p. 1529–1542, 1992.
- HAQUE, M. Determination of steady-state voltage stability limit using pq curve. **IEEE Power Engineering Review**, IEEE, v. 22, n. 4, p. 71–72, 2002.
- ISODA, L. Y. Análise da estabilidade estática de tensão de sistemas elétricos de potência usando uma rede neural baseada na teoria da ressonância adaptativa. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2009.
- KUNDUR, P.; BALU, N. J.; LAUBY, M. G. **Power system stability and control**. [S.l.]: McGraw-hill New York, 1994. v. 7.
- LEVENBERG, K. A method for the solution of certain non-linear problems in least squares. **Quarterly of applied mathematics**, v. 2, n. 2, p. 164–168, 1944.
- LIMA, W. d. S. et al. Previsão de carga no período de demanda de ponta utilizando redes neurais artificiais. [sn], 1996.
- MAMANI, A. B. A. et al. Utilização de redes neurais no controle da velocidade de um veículo experimental. [sn], 2004.

- MARQUARDT, D. W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. **Journal of the society for Industrial and Applied Mathematics**, SIAM, v. 11, n. 2, p. 431–441, 1963.
- MORETO, M. Localização de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição de energia: Uma metodologia baseada em redes neurais artificiais. 2005.
- NASSIF, A. B. et al. Análise da estabilidade de ângulo e de tensão de sistemas elétricos de potência sujeitos a pequenas perturbações. [sn], 2004.
- NATURESA, J. S. et al. A influência de compensadores estáticos de reativos na estabilidade de tensão de sistemas de energia elétrica. [sn], 2001.
- ONS. Procedimentos de redes. submódulo 23.3 - diretrizes e critérios para estudos elétricos. 2011.
- PACCINI, R. d. O. et al. Estabilização de oscilações de potência de linhas de intercâmbio através de um elo de corrente contínua. [sn], 2009.
- PAOSATEANPUN, R. et al. The line pq curve for steady-state voltage stability analysis. In: IEEE. **2006 International Conference on Power System Technology**. [S.l.], 2006. p. 1–7.
- PRADO, C. C. d. et al. Metodologia para análise da influência de pequenas centrais de geração síncrona na margem de estabilidade de tensão. Universidade Federal de Santa Maria, 2017.
- SALAZAR, P. D. P. **Monitoramento em tempo real da estabilidade de tensão usando redes neurais artificiais**. Tese (Doutorado), 2018.
- SESSA, B. da C. **Análise da interação entre elos de corrente contínua em redes eletricamente próximas**. Tese (Doutorado) — PhD thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017.
- SILVA, I. d.; SPATTI, D. H.; FLAUZINO, R. A. Redes neurais artificiais para engenharia e ciências aplicadas. **São Paulo: Artliber**, 2010.
- SOBIERAJSKI, M. et al. Prompt identification of weak transmission lines regarding voltage collapse. IET, 2002.
- XU, W.; MANSOUR, Y. Voltage stability analysis using generic dynamic load models. **IEEE Transactions on Power Systems**, IEEE, v. 9, n. 1, p. 479–493, 1994.

Apêndices

Dados de Entrada do Sistema

O sistema proposto neste trabalho, conforme observado na figura 20 a seguir, teve como base o sistema de testes IEEE 14 barras, disponível na biblioteca do *software* ANAREDE.

Figura 20 – Sistema de testes IEEE 14 barras.

Fonte: IEEE.

A.1 Dados de Entrada das Linhas do Sistema de Potência

Os dados de entrada das linhas de transmissão do sistema de potência são mostrados na Tabela 27.

Tabela 27 – Dados de entrada das linhas de transmissão do sistema IEEE 14 barras.

Barra De	Barra Para	Resistência (%)	Reatância (%)	Susceptância (Mvar)
1	2	1,938	5,917	5,28
1	5	5,403	22,304	4,92
2	3	4,699	19,797	4,38
2	4	5,811	17,632	3,40
2	5	5,695	17,388	3,46
3	4	6,701	17,103	1,28
4	5	1,335	4,211	-
6	11	9,498	19,890	-
6	12	12,291	25,581	-
6	13	6,615	13,027	-
7	8	0,000	17,615	-
7	9	0,000	11,001	-
9	10	3,181	8,450	-
9	14	12,711	27,038	-
10	11	8,205	19,207	-
12	13	22,092	19,988	-
13	14	17,093	34,802	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

A.2 Dados de Entrada dos Transformadores do Sistema de Potência

O sistema de potência de testes IEEE 14 barras possui três transformadores e os dados de entrada são exibidos na Tabela 28.

Tabela 28 – Dados de entrada dos transformadores do sistema IEEE 14 barras.

Barra De	Barra Para	Reatância (%)	Tap
4	7	20.912	0.978
4	9	55.618	0.969
5	6	25.202	0.932

Fonte: Elaborado pelo autor.

A.3 Dados de Entrada das Barras do Sistema de Potência

O sistema de potência possui 14 barras e os dados de entrada são observadas na Tabela 29.

Tabela 29 – Dados de entrada das barras do sistema IEEE 14 barras.

Nº	Tipo	Tensão (p.u)	Ângulo	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (MVar)	Geração Reativa Mínima (MVar)	Geração Reativa Máxima (MVar)	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (MVar)
1	Ref.	1,060	0,0	253,0	-6,96	-9999,0	-9999,0	-	-
2	PV	1,045	-5,5	20,0	30,00	-30,0	30,0	21,7	12,7
3	PV	1,010	-13,0	0,0	30,62	0,0	40,0	94,2	19,0
4	PQ	1,015	-11,0	-	-	-	-	47,8	-3,9
5	PQ	1,017	-9,2	-	-	-	-	7,6	1,6
6	PV	1,070	-15,0	0,0	14,48	-6,0	24,0	11,2	7,5
7	PQ	1,060	-14,0	-	-	-	-	-	-
8	PV	1,090	-14,0	0,0	18,43	-6,0	24,0	-	-
9	PQ	1,055	-15,0	-	-	-	-	29,5	16,6
10	PQ	1,050	-16,0	-	-	-	-	9,0	5,8
11	PQ	1,056	-15,0	-	-	-	-	3,5	1,8
12	PQ	1,055	-16,0	-	-	-	-	6,1	1,6
13	PQ	1,050	-16,0	-	-	-	-	13,5	5,8
14	PQ	1,035	-17,0	-	-	-	-	14,9	5,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Curvas de Carga do Sistema

As curvas de carga utilizadas no cálculo do índice de estabilidade de tensão proposto nesta dissertação podem ser observadas nas figuras a seguir.

Figura 21 – Curvas de carga: barra 02

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 22 – Curvas de carga: barra 03

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 23 – Curvas de carga: barra 04

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 24 – Curvas de carga: barra 05

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 25 – Curvas de carga: barra 06

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 26 – Curvas de carga: barra 09

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 27 – Curvas de carga: barra 10

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 28 – Curvas de carga: barra 11

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 29 – Curvas de carga: barra 12

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 30 – Curvas de carga: barra 13

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 31 – Curvas de carga: barra 14

Fonte: Elaborado pelo autor.

Dados Relacionados ao Índice de Estabilidade de Tensão

Todos os dados obtidos através do procedimento de cálculo dos índices de estabilidades de tensão do sistema de potência em estudo nesta dissertação podem ser observadas nas tabelas abaixo. As variáveis são as seguintes:

- Tensão: Tensão do barramento;
- P_0 : Fluxo de potência ativa no estado estacionário;
- Q_0 : Fluxo de potência reativa no estado estacionário;
- P_{cr} : Ponto de colapso de tensão da potência ativa;
- Q_{cr} : Ponto de colapso de tensão da potência reativa;
- $S_{externo}$: Área externa a curva PQ;
- $S_{interno}$: Área abaixo da curva PQ;
- ρ : Região de estável de operação;
- d_{cv} : Distância mínima até o ponto de colapso de tensão.

Tabela 30 – Sistema em condições normais de operação às 2 horas.

Barra	Tensão (p.u)	Po (MW)	Qo (MVar)	Pcr (p.u)	Qcr (p.u)	S(ext.)	S(int.)	ρ (área)	d_{cv}
2	1,045	24,7	-0,7	0,484	1,456	4,101	2,630	0,641	1,482
3	1,032	0,2	-2,2	0,004	1,453	4,314	2,875	0,666	1,475
4	1,034	9,6	-2,0	0,192	0,461	0,439	0,279	0,637	0,491
5	1,033	23,6	-10,6	0,480	6,029	73,388	48,461	0,660	6,140
6	1,071	1,8	-0,6	0,036	1,301	3,385	2,249	0,664	1,307
9	1,079	-16,6	2,4	-0,328	2,636	14,231	9,642	0,678	2,617
10	1,073	-6,4	-5,2	-0,130	3,187	21,030	14,090	0,670	3,239
11	1,070	-0,3	-1,5	-0,006	1,370	3,822	2,549	0,667	1,385
12	1,062	-5,2	-1,1	-0,105	0,991	2,058	1,390	0,676	1,003
13	1,061	-10,9	-2,6	-0,220	1,920	7,778	5,260	0,676	1,949
14	1,060	1,7	0,7	-0,034	0,724	1,047	0,702	0,671	0,717

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 31 – Sistema em condições de limites mínimos de tensão às 2 horas.

Barra	Tensão (p.u)	Po (MW)	Qo (MVar)	Pcr (p.u)	Qcr (p.u)	S(ext.)	S(int.)	ρ (área)	d_{cv}
2	0,804	13,5	-31,5	0,390	0,842	2,301	1,124	0,488	1,185
3	0,804	-109,4	-5,6	-1,398	0,328	1,743	1,413	0,811	0,489
4	0,803	3,8	-5,7	0,092	0,283	0,206	0,113	0,546	0,344
5	0,800	-97,3	-35,6	-1,991	3,348	33,509	20,488	0,611	3,842
6	0,803	-22,4	-10,1	-0,465	0,657	1,455	0,865	0,594	0,796
9	0,802	-63,0	-42,8	-1,363	1,144	7,203	4,030	0,559	1,734
10	0,801	-75,5	-46,9	-1,606	1,414	10,284	5,881	0,572	2,066
11	0,803	-47,2	-18,7	-0,875	0,524	1,944	1,122	0,577	0,817
12	0,802	-57,8	-18,4	-0,892	0,215	1,135	0,687	0,606	0,508
13	0,801	-73,7	-29,7	-1,339	0,690	4,083	2,417	0,592	1,156
14	0,802	-38,6	-11,0	-0,607	0,192	0,574	0,338	0,590	0,375

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 32 – Sistema em condições normais de operação às 4 horas.

Barra	Tensão (p.u)	Po (MW)	Qo (MVar)	Pcr (p.u)	Qcr (p.u)	S(ext.)	S(int.)	ρ (área)	d_{cv}
2	1,045	25,3	-0,5	0,494	1,454	4,083	2,616	0,641	1,479
3	1,031	0,2	-2,2	0,004	1,450	4,297	2,864	0,666	1,472
4	1,034	9,9	-1,9	0,198	0,460	0,436	0,277	0,636	0,489
5	1,032	24,0	-10,6	0,488	6,017	73,080	48,248	0,660	6,128
6	1,070	2,0	-0,3	0,040	1,198	3,358	2,230	0,664	1,301
9	1,078	-17,2	-2,0	-0,340	2,630	14,226	9,644	0,678	2,615
10	1,072	-6,8	-5,3	-0,138	3,180	20,975	14,058	0,670	3,234
11	1,069	-0,4	-1,4	-0,008	1,138	3,805	2,539	0,667	1,382
12	1,060	-5,4	-1,3	-0,109	0,987	2,051	1,186	0,676	1,001
13	1,059	-11,3	-3,0	-0,229	1,912	7,752	5,246	0,677	1,946
14	1,058	-8,6	-3,6	-0,178	0,711	1,182	0,812	0,687	0,752

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 33 – Sistema em condições de limites mínimos de tensão às 4 horas.

Barra	Tensão (p.u)	Po (MW)	Qo (MVar)	Pcr (p.u)	Qcr (p.u)	S(ext.)	S(int.)	ρ (área)	d_{cv}
2	0,805	14,3	-31,1	0,407	0,840	2,288	1,117	0,488	1,181
3	0,802	-108,5	-5,8	-1,390	0,327	1,738	1,402	0,807	0,491
4	0,802	4,2	-5,4	0,100	0,281	0,201	0,110	0,547	0,339
5	0,802	-93,1	-37,5	-1,926	3,385	33,926	20,665	0,609	3,890
6	0,802	-21,9	-9,8	-0,455	0,659	1,438	0,853	0,593	0,793
9	0,803	-62,9	-42,6	-1,360	1,150	7,220	4,057	0,562	1,737
10	0,802	-74,7	-46,5	-1,592	1,425	10,290	5,900	0,573	2,070
11	0,801	-45,6	-19,4	-0,860	0,527	1,945	1,113	0,572	0,827
12	0,800	-55,6	-19,6	-0,881	0,220	1,161	0,690	0,594	0,528
13	0,802	-71,2	-30,7	-1,319	0,706	4,138	2,439	0,589	1,180
14	0,802	-37,5	-11,2	-0,599	0,198	0,579	0,388	0,669	0,383

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 34 – Sistema em condições normais de operação às 6 horas.

Barra	Tensão (p.u)	Po (MW)	Qo (MVar)	Pcr (p.u)	Qcr (p.u)	S(ext.)	S(int.)	ρ (área)	d_{cv}
2	1,045	27	0,2	0,523	1,449	4,024	2,571	0,639	1,469
3	1,029	1,0	-2,4	0,020	1,444	4,261	2,836	0,666	1,468
4	1,031	11,2	-1,7	0,220	0,452	0,420	0,266	0,632	0,482
5	1,030	24,9	-10,5	0,506	5,993	72,441	47,808	0,660	6,104
6	1,070	2,3	0,9	0,046	1,298	3,308	2,195	0,664	1,289
9	1,075	-19,4	1,1	-0,384	2,612	14,195	9,645	0,679	2,608
10	1,068	-8,4	-5,6	-0,171	3,156	20,748	13,925	0,671	3,213
11	1,066	-0,8	-0,6	-0,016	1,360	3,736	2,494	0,668	1,366
12	1,058	-6,4	-1,9	-0,130	0,982	2,063	1,398	0,678	1,003
13	1,056	-13,5	-4,7	-0,275	1,898	7,807	5,299	0,679	1,950
14	1,053	-1,5	0,0	-0,030	0,715	1,033	0,692	0,670	0,715

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 35 – Sistema em condições de limites mínimos de tensão às 6 horas.

Barra	Tensão (p.u)	Po (MW)	Qo (MVar)	Pcr (p.u)	Qcr (p.u)	S(ext.)	S(int.)	ρ (área)	d_{cv}
2	0,802	16,2	-29,7	0,446	0,824	2,193	1,065	0,486	1,156
3	0,804	-102,9	-7	-1,359	0,358	1,864	1,426	0,765	0,540
4	0,801	5,8	-4,3	0,129	0,274	0,184	0,101	0,551	0,325
5	0,805	-83,2	-40,1	-1,755	3,457	34,410	20,847	0,606	3,967
6	0,803	-20,8	-8,6	-0,430	0,668	1,408	0,833	0,592	0,786
9	0,804	-62,7	-41,8	-1,352	1,158	7,202	4,100	0,569	1,735
10	0,801	-70,2	-46,7	-1,524	1,450	10,207	5,867	0,575	2,086
11	0,802	-42,7	-19,7	-0,827	0,548	1,954	1,105	0,565	0,845
12	0,802	-52,3	-19,7	-0,856	0,244	1,182	0,702	0,594	0,552
13	0,804	-68,3	-30,7	-1,287	0,732	4,163	2,491	0,598	1,202
14	0,804	-33,9	-11,7	-0,571	0,221	0,596	0,344	0,577	0,410

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 36 – Sistema em condições normais de operação às 8 horas.

Barra	Tensão (p.u)	Po (MW)	Qo (MVar)	Pcr (p.u)	Qcr (p.u)	S(ext.)	S(int.)	ρ (área)	d_{cv}
2	1,038	71,3	0,4	1,216	1,224	3,092	1,860	0,602	1,320
3	1,010	-23,4	5,8	-0,439	1,357	3,915	2,733	0,698	1,315
4	1,016	15,9	-0,8	0,294	0,418	0,356	0,220	0,618	0,446
5	1,017	61,6	-14,6	1,249	5,787	67,224	43,709	0,650	5,966
6	1,070	7,2	3,4	0,140	1,295	3,147	2,070	0,658	1,263
9	1,056	-27,8	-4,5	-0,559	2,503	13,864	9,508	0,686	2,564
10	1,051	-5,2	-3,9	-0,105	3,058	19,228	12,873	0,670	3,097
11	1,057	4,1	1,6	0,081	1,336	3,458	2,288	0,662	1,321
12	1,055	-7,8	-2,4	-0,159	0,974	2,069	1,407	0,680	1,001
13	1,050	-17,5	-6,8	-0,360	1,869	7,832	5,346	0,683	1,946
14	1,035	-5,9	-1,7	-0,120	0,685	1,029	0,701	0,681	0,705

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 37 – Sistema em condições de limites mínimos de tensão às 8 horas.

Barra	Tensão (p.u)	Po (MW)	Qo (MVar)	Pcr (p.u)	Qcr (p.u)	S(ext.)	S(int.)	ρ (área)	d_{cv}
2	0,801	46,1	-12,3	0,845	0,675	1,331	0,601	0,452	0,886
3	0,804	-72,9	-1,5	-1,076	0,554	1,871	1,365	0,730	0,666
4	0,803	18,0	3,8	0,268	0,228	0,081	0,058	0,716	0,209
5	0,803	-18,9	-32	-0,413	3,637	30,942	18,619	0,602	3,964
6	0,800	-9,5	-1,3	-0,190	0,713	1,148	0,693	0,604	0,733
9	0,801	-65,8	-32	-1,331	1,154	6,608	4,101	0,621	1,621
10	0,802	-53,4	-30,7	-1,147	1,596	8,992	5,382	0,599	2,000
11	0,804	-25,1	-11,2	-0,519	0,687	1,650	0,946	0,573	0,842
12	0,802	-37,6	-15,5	-0,687	0,358	1,091	0,661	0,606	0,600
13	0,804	-52,7	-24,7	-1,051	0,856	3,837	2,404	0,627	1,222
14	0,801	-20,9	-8,4	-0,404	0,315	0,526	0,328	0,624	0,444

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 38 – Sistema em condições normais de operação às 10 horas.

Barra	Tensão (p.u)	Po (MW)	Qo (MVar)	Pcr (p.u)	Qcr (p.u)	S(ext.)	S(int.)	ρ (área)	d_{cv}
2	1,035	77,4	-1,9	1,306	1,176	3,012	1,800	0,597	1,308
3	1,010	-22,2	8,5	-0,410	1,361	3,787	2,638	0,697	1,290
4	1,010	17,8	-0,2	0,319	0,403	0,328	0,201	0,613	0,429
5	1,013	72,1	-15,4	1,458	5,716	65,606	42,475	0,647	5,916
6	1,070	9,7	4,1	0,188	1,292	3,088	2,021	0,654	1,254
9	1,048	-31,1	-7,1	0,187	2,492	13,741	9,460	0,688	2,611
10	1,044	-2,6	-3,1	-0,630	2,985	18,576	12,411	0,668	3,076
11	1,054	6,5	2,3	-0,053	1,329	3,358	2,212	0,659	1,311
12	1,055	-7,7	-2,2	0,128	0,976	2,062	1,402	0,680	1,019
13	1,051	-17,6	-6,2	-0,157	1,887	7,827	5,343	0,683	1,949
14	1,031	-7,6	-2,2	-0,155	0,677	1,036	0,710	0,686	0,703

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 39 – Sistema em condições de limites mínimos de tensão às 10 horas.

Barra	Tensão (p.u)	Po (MW)	Qo (MVar)	Pcr (p.u)	Qcr (p.u)	S(ext.)	S(int.)	ρ (área)	d_{cv}
2	0,800	68,0	-2,8	1,034	0,571	0,849	0,448	0,528	0,696
3	0,806	-81,8	-1,8	-1,161	0,506	1,866	1,357	0,728	0,626
4	0,802	14,6	1,3	0,240	0,239	0,108	0,064	0,590	0,245
5	0,803	4,7	-27,3	0,102	3,648	29,491	17,839	0,605	3,922
6	0,805	-7,5	-3,2	-0,155	0,727	1,206	0,702	0,582	0,763
9	0,805	-62,8	-30,3	-1,278	1,195	6,599	4,202	0,637	1,633
10	0,804	-44,0	-28,4	-0,963	1,660	8,787	5,262	0,599	2,013
11	0,804	-22,2	-12	-0,473	0,701	1,655	0,924	0,558	0,859
12	0,801	-41,2	-15,9	-0,727	0,331	1,098	0,666	0,607	0,583
13	0,805	-56,1	-23,4	-1,089	0,841	3,818	2,407	0,631	1,198
14	0,806	-28,3	-9,3	-0,499	0,270	0,561	0,360	0,642	0,423

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 40 – Sistema em condições normais de operação às 12 horas.

Barra	Tensão (p.u)	Po (MW)	Qo (MVar)	Pcr (p.u)	Qcr (p.u)	S(ext.)	S(int.)	ρ (área)	d_{cv}
2	0,998	85,9	-0,2	1,372	1,018	2,300	1,350	0,587	1,142
3	1,000	-23,8	8,4	-0,438	1,329	3,657	2,559	0,700	1,261
4	1,003	19,6	-0,1	0,343	0,387	0,306	0,186	0,607	0,415
5	1,070	49,9	-14,6	1,015	6,440	83,389	54,573	0,654	6,606
6	1,038	11,0	6,7	0,207	1,213	2,612	1,703	0,652	1,150
9	1,052	-34,4	-8,2	-0,697	2,467	14,103	9,742	0,691	2,573
10	1,046	-3,5	-2,6	-0,071	3,029	18,699	12,502	0,669	3,055
11	1,020	6,9	4,4	0,133	1,242	2,854	1,876	0,658	1,199
12	1,052	-9,0	-3,1	-0,184	0,966	2,078	1,419	0,683	1,002
13	1,046	-19,9	-1,0	-0,396	1,851	7,420	5,085	0,685	1,872
14	1,020	-8,3	-3,6	-0,172	0,660	1,028	0,708	0,688	0,701

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 41 – Sistema em condições de limites mínimos de tensão às 12 horas.

Barra	Tensão (p.u)	Po (MW)	Qo (MVar)	Pcr (p.u)	Qcr (p.u)	S(ext.)	S(int.)	ρ (área)	d_{cv}
2	0,801	78,1	4,3	1,090	0,540	0,617	0,343	0,557	0,585
3	0,802	-75	-0,6	-1,089	0,540	1,815	1,318	0,726	0,642
4	0,801	17,1	2,9	0,262	0,229	0,088	0,054	0,619	0,220
5	0,801	23,6	-23,9	0,503	3,614	28,073	17,585	0,626	3,862
6	0,801	-3,8	-1,2	-0,077	0,726	1,113	0,638	0,573	0,739
9	0,805	-61,1	-28,5	-1,242	1,211	6,487	4,210	0,649	1,623
10	0,802	-36,4	-26,1	-0,805	1,690	8,454	5,105	0,604	2,000
11	0,801	-18,4	-8,8	-0,388	0,719	1,526	0,854	0,560	0,832
12	0,803	-37	-15	-0,678	0,366	1,083	0,670	0,618	0,601
13	0,804	-50,9	-23,8	-1,020	0,871	3,789	2,315	0,611	1,221
14	0,801	-25,1	-9,3	-0,462	0,285	0,547	0,357	0,654	0,433

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 42 – Sistema em condições normais de operação às 14 horas.

Barra	Tensão (p.u)	Po (MW)	Qo (MVar)	Pcr (p.u)	Qcr (p.u)	S(ext.)	S(int.)	ρ (área)	d_{cv}
2	1,031	84,3	-0,8	1,382	1,127	2,783	1,647	0,592	1,256
3	1,002	-24,4	8,6	-0,448	1,333	3,685	2,581	0,700	1,263
4	1,004	18,7	-0,3	0,332	0,392	0,315	0,192	0,610	0,421
5	1,007	79,1	-15,4	1,594	5,628	63,579	41,036	0,645	5,838
6	1,070	11,1	5,2	0,212	1,290	3,028	1,976	0,653	1,242
9	1,043	-32,8	-8,1	-0,666	2,427	13,608	9,389	0,690	2,531
10	1,039	-2,5	-2,9	-0,051	2,989	18,205	12,162	0,668	3,018
11	1,051	7,1	3,1	0,138	1,319	3,280	2,158	0,658	1,289
12	1,054	-8,2	-2,5	-0,167	0,971	2,068	1,408	0,681	1,000
13	1,050	-18,3	-6,7	-0,376	1,868	7,840	5,357	0,683	1,944
14	1,026	-8,3	-2,8	-0,170	0,668	1,034	0,711	0,688	0,702

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 43 – Sistema em condições de limites mínimos de tensão às 14 horas.

Barra	Tensão (p.u)	Po (MW)	Qo (MVar)	Pcr (p.u)	Qcr (p.u)	S(ext.)	S(int.)	ρ (área)	d_{cv}
2	0,802	75,9	2,7	1,079	0,550	0,672	0,370	0,550	0,613
3	0,804	-72,9	-1,5	-1,076	0,554	1,871	1,335	0,714	0,666
4	0,803	18,0	3,8	0,268	0,228	0,081	0,054	0,665	0,209
5	0,803	-18,9	-32,0	-0,413	3,637	30,942	18,309	0,592	3,964
6	0,800	-9,5	-1,3	-0,190	0,713	1,148	0,665	0,579	0,733
9	0,801	-65,8	-32	-1,331	1,154	6,608	4,216	0,638	1,621
10	0,802	-53,4	-30,7	-1,147	1,596	8,992	5,332	0,593	2,000
11	0,800	-25,3	-11,3	-0,522	0,677	1,626	0,902	0,555	0,835
12	0,802	-37,6	-15,5	-0,687	0,358	1,091	0,664	0,608	0,600
13	0,804	-52,7	-24,7	-1,051	0,856	3,837	2,409	0,628	1,222
14	0,801	-20,9	-8,4	-0,404	0,315	0,526	0,341	0,648	0,444

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 44 – Sistema em condições normais de operação às 16 horas.

Barra	Tensão (p.u)	Po (MW)	Qo (MVar)	Pcr (p.u)	Qcr (p.u)	S(ext.)	S(int.)	ρ (área)	d_{cv}
2	1,031	84,3	-0,9	1,383	1,127	2,786	1,649	0,592	1,257
3	1,002	-24,4	8,6	-0,448	1,333	3,685	2,581	0,700	1,263
4	1,004	18,8	8,6	0,291	0,406	0,218	0,132	0,604	0,337
5	1,007	79,3	-15,4	1,598	5,628	63,566	41,025	0,645	5,837
6	1,070	11,1	5,2	0,212	1,290	3,028	1,976	0,653	1,242
9	1,042	-32,9	-8,1	-0,668	2,422	13,561	9,358	0,690	2,526
10	1,039	-2,4	-2,9	-0,049	2,989	18,202	12,159	0,668	3,018
11	1,051	7,2	3,1	0,140	1,318	3,279	2,156	0,658	1,289
12	1,054	-8,2	-2,5	-0,167	0,971	2,068	1,408	0,681	1,000
13	1,050	-18,4	-6,8	-0,378	1,868	7,848	5,363	0,683	1,945
14	1,026	-8,3	-2,8	-0,170	0,668	1,034	0,711	0,688	0,702

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 45 – Sistema em condições de limites mínimos de tensão às 16 horas.

Barra	Tensão (p.u)	Po (MW)	Qo (MVar)	Pcr (p.u)	Qcr (p.u)	S(ext.)	S(int.)	ρ (área)	d_{cv}
2	0,803	75,8	2,6	1,080	0,552	0,681	0,374	0,550	0,617
3	0,801	-78,1	-1,1	-1,119	0,517	1,810	1,323	0,731	0,627
4	0,802	16,0	2,4	0,252	0,234	0,096	0,041	0,430	0,229
5	0,800	18,3	-24,2	0,391	3,611	28,186	17,077	0,606	3,859
6	0,804	-4,5	-2,4	-0,093	0,730	1,161	0,669	0,576	0,756
9	0,805	-61,4	-29,1	-1,250	1,207	6,522	4,207	0,645	1,628
10	0,805	-39,0	-26,0	-0,855	1,692	8,600	5,192	0,604	2,007
11	0,800	-19,4	-10,4	-0,414	0,710	1,567	0,875	0,559	0,843
12	0,803	-38,1	-15,0	-0,690	0,359	1,085	0,664	0,612	0,595
13	0,802	-53,2	-22,0	-1,040	0,855	3,698	2,360	0,638	1,189
14	0,803	-26,4	-8,9	-0,475	0,280	0,546	0,356	0,652	0,425

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 46 – Sistema em condições normais de operação às 18 horas.

Barra	Tensão (p.u)	Po (MW)	Qo (MVar)	Pcr (p.u)	Qcr (p.u)	S(ext.)	S(int.)	ρ (área)	d_{cv}
2	1,026	78,3	-0,7	1,305	1,146	2,825	1,683	0,596	1,265
3	0,999	-16,7	11,5	-0,305	1,344	3,440	2,372	0,689	1,237
4	0,990	20,3	0,6	0,347	0,372	0,276	0,167	0,604	0,394
5	0,994	69,3	-11,6	1,393	5,505	60,303	39,041	0,647	5,664
6	1,046	9,0	5,8	0,171	1,235	2,756	1,805	0,655	1,180
9	1,024	-35,6	-9,1	-0,723	2,328	12,825	8,888	0,693	2,447
10	1,018	-7,7	-4,5	-0,156	2,867	17,078	11,462	0,671	2,913
11	1,027	3,9	3,1	0,076	1,261	3,022	1,999	0,662	1,231
12	1,026	-10,1	-3,3	-0,207	0,916	1,904	1,305	0,686	0,955
13	1,019	-22,6	-9,7	-0,469	1,746	7,233	4,981	0,689	1,859
14	0,999	-6,1	-2,7	-0,126	0,637	0,920	0,628	0,683	0,667

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 47 – Sistema em condições de limites mínimos de tensão às 18 horas.

Barra	Tensão (p.u)	Po (MW)	Qo (MVar)	Pcr (p.u)	Qcr (p.u)	S(ext.)	S(int.)	ρ (área)	d_{cv}
2	0,803	70,9	2,8	1,032	0,581	0,732	0,410	0,560	0,640
3	0,801	-68,8	1,2	-1,018	0,579	1,766	1,209	0,684	0,656
4	0,803	18,3	3,5	0,273	0,226	0,081	0,051	0,620	0,211
5	0,802	15,5	-19,3	0,327	3,633	28,029	17,190	0,613	3,830
6	0,802	-4,6	-0,6	-0,092	0,727	1,110	0,654	0,589	0,734
9	0,802	-60,1	-28,3	-1,224	1,205	6,386	4,175	0,654	1,614
10	0,802	-37,7	-25,3	-0,827	1,685	8,426	5,185	0,615	1,990
11	0,803	-18,2	-8,5	-0,383	0,724	1,530	0,884	0,578	0,834
12	0,802	-35,1	-12,8	-0,641	0,385	1,028	0,655	0,637	0,590
13	0,804	-48,6	-22,3	-0,978	0,890	3,714	2,431	0,655	1,217
14	0,801	-21,0	-7,7	-0,401	0,317	0,516	0,331	0,643	0,437

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 48 – Sistema em condições normais de operação às 20 horas.

Barra	Tensão (p.u)	Po (MW)	Qo (MVar)	Pcr (p.u)	Qcr (p.u)	S(ext.)	S(int.)	ρ (área)	d_{cv}
2	1,038	54,0	2,1	0,964	1,318	3,355	2,062	0,615	1,364
3	1,010	-2,5	2,2	-0,049	1,391	3,814	2,555	0,670	1,369
4	1,007	20,9	0,3	0,360	0,385	0,300	0,181	0,604	0,411
5	1,007	45,9	-13,9	0,934	5,701	65,474	42,820	0,654	5,859
6	1,052	6,1	5,5	0,117	1,253	2,872	1,891	0,659	1,199
9	1,043	-36,6	-8,1	-0,740	2,417	13,690	9,485	0,693	2,526
10	1,033	-15,7	-7	-0,321	2,946	18,546	12,531	0,676	3,020
11	1,036	-0,2	2,1	-0,004	1,285	3,223	2,149	0,667	1,264
12	1,028	-11,6	-4,3	-0,239	0,916	1,960	1,349	0,688	0,966
13	1,023	-23,8	-10,7	-0,496	1,756	7,417	5,116	0,690	1,881
14	1,010	-3,2	-2,3	-0,066	0,656	0,932	0,629	0,675	0,680

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 49 – Sistema em condições de limites mínimos de tensão às 20 horas.

Barra	Tensão (p.u)	Po (MW)	Qo (MVar)	Pcr (p.u)	Qcr (p.u)	S(ext.)	S(int.)	ρ (área)	d_{cv}
2	0,802	46,1	-12,3	0,845	0,678	1,338	0,666	0,497	0,888
3	0,806	-72,6	-1,5	-1,075	0,560	1,891	1,313	0,695	0,673
4	0,801	18,0	3,9	0,267	0,227	0,079	0,049	0,625	0,207
5	0,801	-19,2	-32,0	-0,420	3,619	30,668	18,724	0,611	3,945
6	0,800	-9,5	-1,3	-0,190	0,713	1,148	0,681	0,593	0,733
9	0,801	-65,8	-32	-1,331	1,154	6,608	4,250	0,643	1,621
10	0,802	-53,4	-30,7	-1,147	1,596	8,992	5,562	0,619	2,000
11	0,804	-59,2	-12,2	-0,963	0,474	1,766	1,066	0,603	0,702
12	0,801	-37,6	-15,5	-0,687	0,357	1,086	0,689	0,634	0,599
13	0,806	-52,6	-24,6	-1,050	0,864	3,864	2,525	0,653	1,227
14	0,801	-20,9	-8,4	-0,404	0,315	0,526	0,325	0,617	0,444

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 50 – Sistema em condições normais de operação às 22 horas.

Barra	Tensão (p.u)	Po (MW)	Qo (MVar)	Pcr (p.u)	Qcr (p.u)	S(ext.)	S(int.)	ρ (área)	d_{cv}
2	1,045	36,8	3,6	0,684	1,417	3,713	2,338	0,630	1,416
3	1,019	0,6	-3,1	0,012	1,416	4,136	2,754	0,666	1,447
4	1,023	15,3	-1,1	0,286	0,427	0,375	0,232	0,621	0,458
5	1,023	31,4	-10,4	0,637	5,905	70,069	46,114	0,658	6,018
6	1,070	3,7	4,3	0,072	1,298	3,159	2,091	0,662	1,255
9	1,064	-26,7	-2,0	-0,532	2,545	14,047	9,620	0,685	2,579
10	1,056	-13,4	-5,9	-0,273	3,082	20,029	13,499	0,674	3,144
11	1,059	-0,8	2,1	-0,016	1,342	3,530	2,357	0,668	1,321
12	1,052	-8,5	-3,1	-0,174	0,967	2,074	1,414	0,682	1,002
13	1,048	-17,9	-8,2	-0,371	1,861	7,865	5,372	0,683	1,952
14	1,040	-2,0	-1,6	-0,041	0,697	1,020	0,685	0,671	0,713

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 51 – Sistema em condições de limites mínimos de tensão às 22 horas.

Barra	Tensão (p.u)	Po (MW)	Qo (MVar)	Pcr (p.u)	Qcr (p.u)	S(ext.)	S(int.)	ρ (área)	d_{cv}
2	0,803	27,0	-23,4	0,627	0,771	1,880	0,894	0,475	1,067
3	0,800	-90,0	-5,4	-1,245	0,429	1,876	1,390	0,741	0,594
4	0,802	11,2	-0,7	0,204	0,253	0,135	0,078	0,578	0,276
5	0,800	-55,3	-40,2	-1,206	3,521	32,776	19,735	0,602	3,977
6	0,801	-16,8	-4,6	-0,339	0,688	1,275	0,750	0,588	0,754
9	0,804	-61,5	-39,1	-1,316	1,174	7,041	4,180	0,594	1,715
10	0,804	-64,4	-40,3	-1,391	1,520	9,834	5,838	0,594	2,063
11	0,803	-35,7	-15,5	-0,708	0,610	1,814	1,027	0,566	0,841
12	0,803	-44,4	-18,7	-0,779	0,301	1,172	0,706	0,603	0,592
13	0,805	-60,0	-29,1	-1,177	0,796	4,077	2,530	0,621	1,231
14	0,802	-28,4	-9,9	-0,503	0,262	0,561	0,338	0,602	0,422

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 52 – Sistema em condições normais de operação às 24 horas.

Barra	Tensão (p.u)	Po (MW)	Qo (MVar)	Pcr (p.u)	Qcr (p.u)	S(ext.)	S(int.)	ρ (área)	d_{cv}
2	1,045	26,2	-0,3	0,510	1,451	4,059	2,597	0,640	1,475
3	1,030	0,4	-2,2	0,008	1,447	4,278	2,850	0,666	1,469
4	1,033	10,6	-1,9	0,210	0,457	0,430	0,273	0,634	0,487
5	1,031	24,2	-10,7	0,492	6,006	72,803	48,061	0,660	6,118
6	1,070	2,2	0,2	0,439	1,261	3,336	2,215	0,664	1,327
9	1,077	-18,4	1,7	-0,364	2,623	14,227	9,657	0,679	2,613
10	1,070	-7,9	-5,4	-0,161	3,168	20,866	13,998	0,671	3,223
11	1,068	-0,7	-1,3	-0,014	1,365	3,791	2,531	0,668	1,378
12	1,059	-5,9	-1,5	-0,119	0,984	2,054	1,390	0,677	1,001
13	1,058	-12,3	-3,6	-0,250	1,907	7,777	5,270	0,678	1,947
14	1,055	-1,7	0,1	-0,034	0,717	1,040	0,697	0,671	0,716

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 53 – Sistema em condições de limites mínimos de tensão às 24 horas.

Barra	Tensão (p.u)	Po (MW)	Qo (MVar)	Pcr (p.u)	Qcr (p.u)	S(ext.)	S(int.)	ρ (área)	d_{cv}
2	0,801	15,3	-30,6	0,430	0,826	2,222	1,080	0,486	1,165
3	0,802	-107,4	-4,9	-1,377	0,337	1,719	1,393	0,810	0,491
4	0,803	5,1	-5,0	0,117	0,278	0,195	0,107	0,549	0,335
5	0,801	-87,4	-40,3	-1,835	3,399	33,955	20,569	0,606	3,922
6	0,802	-21,4	-9,2	-0,443	0,662	1,420	0,842	0,593	0,788
9	0,801	-63,1	-42,2	-1,360	1,141	7,143	4,035	0,565	1,725
10	0,803	-76,5	-44,4	-1,605	1,425	10,212	5,916	0,579	2,049
11	0,804	-41,7	-20,9	-0,823	0,555	2,002	1,128	0,563	0,865
12	0,801	-54,6	-19,3	-0,872	0,229	1,162	0,694	0,597	0,533
13	0,803	-71,4	-29,4	-1,313	0,713	4,098	2,451	0,598	1,171
14	0,802	-35,5	-12	-0,587	0,207	0,595	0,344	0,578	0,401

Fonte: Elaborado pelo autor.

Dados Usados no Treinamento da RNA

O treinamento da rede neural artificial utilizou o horário do dia, as potências ativa e reativa das cargas como dados de entrada e os índices de estabilidade de tensão dos barramentos como dados de saída. Todos os dados podem ser observados nas tabelas a seguir.

D.1 Dados de Entrada da RNA

Tabela 54 – Potência ativa das cargas às 2 horas.

P2	P3	P4	P5	P6	P9	P10	P11	P12	P13	P14
20,0	38,0	18,0	34,0	21,0	25,0	16,0	24,0	19,0	33,0	19,0
33,0	12,0	9,0	15,0	25,0	22,0	18,0	25,0	21,0	23,0	9,0
21,0	10,0	33,0	28,0	29,0	15,0	18,0	20,0	25,0	12,0	15,0
15,0	1,0	12,0	27,0	14,0	33,0	25,0	26,0	19,0	16,0	18,0
28,0	47,0	18,0	39,0	33,0	23,0	17,0	10,0	3,0	20,0	7,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 55 – Potência reativa das cargas às 2 horas.

Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q9	Q10	Q11	Q12	Q13	Q14
14,0	18,0	13,0	10,0	8,0	11,0	9,0	8,0	13,0	19,0	7,0
21,0	17,0	7,0	4,0	15,0	16,0	5,0	18,0	12,0	13,0	7,0
14,0	6,0	23,0	19,0	8,0	7,0	15,0	11,0	16,0	4,0	7,0
7,0	0,7	5,0	14,0	6,0	13,0	19,0	21,0	9,0	8,0	5,0
17,0	18,0	13,0	26,0	6,0	10,0	5,0	3,0	1,0	16,0	3,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 56 – Potência ativa das cargas às 4 horas.

P2	P3	P4	P5	P6	P9	P10	P11	P12	P13	P14
26,0	35,0	24,0	8,0	25,0	15,0	17,0	22,0	17,0	15,0	22,0
40,0	33,0	30,0	10,0	20,0	23,0	21,0	9,0	26,0	19,0	17,0
45,0	36,0	34,0	13,0	21,0	18,0	15,0	17,0	32,0	25,0	20,0
43,0	26,0	42,0	23,0	27,0	20,0	12,0	24,0	30,0	22,0	20,0
50,0	18,0	40,0	25,0	20,0	18,0	15,0	22,0	27,0	21,0	14,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 57 – Potência reativa das cargas às 4 horas.

Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q9	Q10	Q11	Q12	Q13	Q14
12,0	16,0	-4,0	3,0	10,0	7,0	11,0	9,0	6,0	8,0	9,0
23,0	20,0	-6,0	7,0	14,0	10,0	9,0	6,0	9,0	11,0	8,0
25,0	17,0	-2,0	8,0	15,0	12,0	7,0	8,0	7,0	10,0	12,0
30,0	26,0	42,0	23,0	27,0	20,0	12,0	24,0	30,0	22,0	20,0
35,0	12,0	13,0	17,0	10,0	4,0	9,0	15,0	13,0	14,0	5,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 58 – Potência ativa das cargas às 6 horas.

P2	P3	P4	P5	P6	P9	P10	P11	P12	P13	P14
35,0	106,0	65,0	12,0	14,0	25,0	7,0	9,0	11,0	15,0	19,0
35,0	84,0	40,0	21,0	13,0	30,0	9,0	15,0	15,0	17,0	18,0
55,0	92,0	48,0	31,0	21,0	32,0	12,0	14,0	20,0	24,0	19,0
50,0	88,0	43,0	29,0	22,0	24,0	14,0	13,0	16,0	22,0	15,0
66,0	110,0	49,0	31,0	24,0	27,0	18,0	16,0	20,0	15,0	9,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 59 – Potência reativa das cargas às 6 horas.

Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q9	Q10	Q11	Q12	Q13	Q14
14,0	30,0	-2,0	6,0	8,0	19,0	3,0	2,0	4,0	6,0	8,0
14,0	23,0	6,0	9,0	4,0	14,0	4,0	6,0	3,0	5,0	10,0
14,0	25,0	14,0	11,0	9,0	16,0	7,0	9,0	5,0	10,0	16,0
13,0	24,0	12,0	11,0	10,0	13,0	8,0	5,0	6,0	9,0	12,0
26,0	29,0	15,0	14,0	13,0	14,0	8,0	8,0	12,0	8,0	7,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 60 – Potência ativa das cargas às 8 horas.

P2	P3	P4	P5	P6	P9	P10	P11	P12	P13	P14
35,0	65,0	45,0	16,0	22,0	30,0	21,0	9,0	13,0	16,0	15,0
44,0	72,0	50,0	11,0	26,0	35,0	22,0	16,0	21,0	18,0	14,0
52,0	74,0	51,0	12,0	25,0	39,0	21,0	18,0	29,0	14,0	8,0
84,0	42,0	70,0	20,0	12,0	45,0	24,0	19,0	26,0	12,0	13,0
93,0	57,0	68,0	39,0	14,0	42,0	23,0	10,0	22,0	26,0	14,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 61 – Potência reativa das cargas às 8 horas.

Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q9	Q10	Q11	Q12	Q13	Q14
14,0	19,0	-8,0	7,0	12,0	16,0	9,0	4,0	14,0	10,0	9,0
17,0	19,0	2,0	6,0	14,0	20,0	8,0	7,0	12,0	11,0	5,0
24,0	20,0	11,0	8,0	7,0	14,0	7,0	8,0	10,0	8,0	6,0
29,0	18,0	14,0	5,0	9,0	16,0	6,0	7,0	11,0	7,0	9,0
16,0	23,0	21,0	7,0	8,0	21,0	9,0	8,0	10,0	8,0	10,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 62 – Potência ativa das cargas às 10 horas.

P2	P3	P4	P5	P6	P9	P10	P11	P12	P13	P14
29,0	135,0	55,0	10,0	16,0	42,0	15,0	6,0	20,0	16,0	20,0
34,0	125,0	60,0	13,0	20,0	48,0	17,0	13,0	24,0	18,0	22,0
18,0	80,0	35,0	7,0	14,0	57,0	13,0	16,0	22,0	12,0	19,0
39,0	75,0	43,0	9,0	18,0	68,0	10,0	21,0	14,0	23,0	12,0
49,0	81,0	46,0	11,0	20,0	74,0	14,0	22,0	13,0	18,0	25,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 63 – Potência reativa das cargas às 10 horas.

Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q9	Q10	Q11	Q12	Q13	Q14
10,0	19,0	-7,0	3,0	11,0	15,0	9,0	4,0	4,0	8,0	8,0
13,0	23,0	4,0	5,0	8,0	14,0	4,0	6,0	5,0	9,0	12,0
11,0	18,0	9,0	5,0	6,0	12,0	5,0	7,0	8,0	6,0	10,0
8,0	22,0	14,0	4,0	5,0	15,0	6,0	4,0	9,0	6,0	8,0
10,0	15,0	19,0	6,0	4,0	16,0	7,0	5,0	10,0	9,0	6,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 64 – Potência ativa das cargas às 12 horas.

P2	P3	P4	P5	P6	P9	P10	P11	P12	P13	P14
28,0	118,0	69,0	11,0	16,0	46,0	15,0	8,0	9,0	15,0	14,0
32,0	107,0	73,0	14,0	30,0	27,0	22,0	18,0	11,0	17,0	19,0
41,0	93,0	80,0	19,0	26,0	20,0	16,0	15,0	14,0	19,0	30,0
44,0	80,0	65,0	14,0	35,0	28,0	14,0	19,0	19,0	24,0	38,0
36,0	72,0	58,0	17,0	31,0	17,0	20,0	15,0	17,0	21,0	33,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 65 – Potência reativa das cargas às 12 horas.

Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q9	Q10	Q11	Q12	Q13	Q14
17,0	25,0	-10,0	4,0	8,0	18,0	8,0	4,0	3,0	7,0	4,0
19,0	28,0	-2,0	8,0	9,0	9,0	11,0	10,0	6,0	4,0	7,0
21,0	25,0	5,0	12,0	7,0	7,0	5,0	8,0	7,0	8,0	10,0
17,0	23,0	7,0	9,0	10,0	8,0	3,0	10,0	7,0	5,0	14,0
15,0	20,0	6,0	7,0	8,0	7,0	4,0	9,0	8,0	5,0	12,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 66 – Potência ativa das cargas às 14 horas.

P2	P3	P4	P5	P6	P9	P10	P11	P12	P13	P14
81,0	50,0	48,0	19,0	23,0	30,0	19,0	9,0	24,0	26,0	25,0
20,0	40,0	59,0	23,0	17,0	32,0	21,0	11,0	26,0	30,0	22,0
46,0	23,0	65,0	20,0	19,0	35,0	26,0	16,0	21,0	36,0	25,0
51,0	38,0	44,0	18,0	26,0	38,0	25,0	14,0	28,0	31,0	19,0
90,0	33,0	48,0	14,0	22,0	35,0	29,0	22,0	21,0	17,0	11,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 67 – Potência reativa das cargas às 14 horas.

Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q9	Q10	Q11	Q12	Q13	Q14
11,0	12,0	9,0	5,0	8,0	17,0	4,0	5,0	4,0	13,0	9,0
8,0	10,0	14,0	9,0	5,0	18,0	7,0	4,0	8,0	11,0	5,0
10,0	8,0	12,0	8,0	6,0	14,0	6,0	5,0	7,0	13,0	7,0
13,0	16,0	10,0	5,0	8,0	11,0	9,0	5,0	6,0	12,0	8,0
24,0	18,0	14,0	8,0	5,0	15,0	7,0	9,0	8,0	14,0	7,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 68 – Potência ativa das cargas às 16 horas.

P2	P3	P4	P5	P6	P9	P10	P11	P12	P13	P14
28,0	117,0	40,0	10,0	16,0	22,0	14,0	6,0	9,0	15,0	18,0
39,0	130,0	45,0	16,0	19,0	25,0	17,0	9,0	13,0	20,0	30,0
36,0	127,0	39,0	21,0	30,0	23,0	11,0	12,0	10,0	17,0	24,0
51,0	142,0	42,0	18,0	32,0	24,0	14,0	17,0	8,0	16,0	21,0
54,0	129,0	26,0	21,0	34,0	25,0	19,0	23,0	7,0	14,0	33,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 69 – Potência reativa das cargas às 16 horas.

Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q9	Q10	Q11	Q12	Q13	Q14
10,0	28,0	14,0	3,0	9,0	12,0	6,0	2,0	3,0	4,0	5,0
14,0	27,0	12,0	4,0	10,0	10,0	8,0	5,0	8,0	14,0	11,0
12,0	20,0	8,0	7,0	7,0	9,0	5,0	4,0	3,0	10,0	8,0
18,0	23,0	10,0	9,0	13,0	8,0	4,0	9,0	4,0	7,0	8,0
13,0	20,0	10,0	9,0	15,0	8,0	6,0	10,0	4,0	10,0	9,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 70 – Potência ativa das cargas às 18 horas.

P2	P3	P4	P5	P6	P9	P10	P11	P12	P13	P14
24,0	99,0	65,0	17,0	16,0	40,0	13,0	9,0	16,0	19,0	21,0
35,0	73,0	67,0	27,0	14,0	44,0	20,0	12,0	9,0	14,0	22,0
34,0	105,0	73,0	28,0	14,0	49,0	26,0	11,0	12,0	25,0	23,0
54,0	82,0	65,0	23,0	12,0	51,0	24,0	14,0	11,0	12,0	18,0
55,0	84,0	75,0	27,0	13,0	45,0	25,0	19,0	13,0	7,0	23,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 71 – Potência reativa das cargas às 18 horas.

Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q9	Q10	Q11	Q12	Q13	Q14
14,0	23,0	7,0	4,0	10,0	20,0	8,0	4,0	4,0	9,0	11,0
5,0	21,0	9,0	14,0	5,0	13,0	7,0	3,0	7,0	5,0	13,0
7,0	24,0	10,0	12,0	5,0	18,0	9,0	1,0	4,0	7,0	14,0
18,0	20,0	8,0	17,0	8,0	14,0	9,0	10,0	4,0	6,0	11,0
12,0	13,0	23,0	14,0	8,0	45,0	25,0	19,0	13,0	7,0	23,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 72 – Potência ativa das cargas às 20 horas.

P2	P3	P4	P5	P6	P9	P10	P11	P12	P13	P14
16,0	60,0	13,0	12,0	19,0	27,0	16,0	7,0	12,0	24,0	21,0
12,0	96,0	29,0	42,0	21,0	31,0	19,0	11,0	10,0	22,0	23,0
26,0	103,0	33,0	48,0	23,0	35,0	18,0	13,0	14,0	23,0	17,0
63,0	143,0	37,0	37,0	13,0	39,0	21,0	29,0	25,0	19,0	15,0
77,0	124,0	41,0	33,0	11,0	44,0	17,0	31,0	26,0	24,0	16,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 73 – Potência reativa das cargas às 20 horas.

Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q9	Q10	Q11	Q12	Q13	Q14
12,0	14,0	-5,0	4,0	10,0	15,0	9,0	4,0	4,0	10,0	9,0
7,0	14,0	-12,0	15,0	16,0	12,0	7,0	7,0	5,0	8,0	11,0
11,0	17,0	5,0	14,0	10,0	14,0	12,0	7,0	3,0	9,0	9,0
18,0	26,0	7,0	12,0	8,0	11,0	8,0	8,0	4,0	9,0	4,0
21,0	25,0	9,0	10,0	5,0	9,0	4,0	7,0	3,0	9,0	7,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 74 – Potência ativa das cargas às 22 horas.

P2	P3	P4	P5	P6	P9	P10	P11	P12	P13	P14
16,0	37,0	34,0	14,0	16,0	19,0	21,0	14,0	22,0	23,0	21,0
34,0	42,0	24,0	16,0	18,0	23,0	28,0	19,0	17,0	21,0	29,0
38,0	44,0	28,0	19,0	37,0	21,0	30,0	23,0	15,0	18,0	35,0
58,0	47,0	25,0	23,0	40,0	24,0	32,0	28,0	12,0	15,0	25,0
50,0	46,0	24,0	24,0	35,0	19,0	31,0	27,0	14,0	16,0	20,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 75 – Potência reativa das cargas às 22 horas.

Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q9	Q10	Q11	Q12	Q13	Q14
8,0	10,0	-4,0	3,0	7,0	11,0	8,0	8,0	6,0	4,0	7,0
12,0	17,0	4,0	8,0	10,0	14,0	4,0	13,0	9,0	7,0	8,0
14,0	23,0	5,0	9,0	11,0	10,0	6,0	14,0	8,0	9,0	12,0
23,0	22,0	7,0	12,0	10,0	9,0	8,0	14,0	7,0	6,0	10,0
25,0	18,0	8,0	16,0	7,0	8,0	11,0	9,0	9,0	8,0	10,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 76 – Potência ativa das cargas às 24 horas.

P2	P3	P4	P5	P6	P9	P10	P11	P12	P13	P14
19,0	28,0	30,0	12,0	18,0	14,0	16,0	18,0	9,0	11,0	10,0
32,0	48,0	39,0	29,0	38,0	17,0	26,0	21,0	10,0	9,0	14,0
34,0	59,0	41,0	36,0	41,0	14,0	22,0	28,0	14,0	12,0	22,0
38,0	64,0	44,0	34,0	56,0	16,0	24,0	25,0	12,0	16,0	18,0
68,0	41,0	38,0	25,0	39,0	17,0	23,0	20,0	14,0	13,0	12,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 77 – Potência reativa das cargas às 24 horas.

Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q9	Q10	Q11	Q12	Q13	Q14
7,0	8,0	-4,0	5,0	9,0	7,0	10,0	6,0	4,0	7,0	4,0
7,0	11,0	1,0	12,0	14,0	9,0	11,0	4,0	5,0	7,0	5,0
8,0	19,0	4,0	12,0	15,0	9,0	8,0	11,0	9,0	9,0	6,0
12,0	25,0	9,0	11,0	13,0	8,0	9,0	16,0	10,0	9,0	6,0
20,0	18,0	10,0	16,0	10,0	7,0	8,0	10,0	9,0	5,0	4,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

D.2 Dados de Saída da RNA

Tabela 78 – Índices de estabilidade de tensão às 2 horas.

IET_2	IET_3	IET_4	IET_5	IET_6	IET_9	IET_{10}	IET_{11}	IET_{12}	IET_{13}	IET_{14}
0,8899	0,8729	0,2540	3,3795	0,6415	1,3456	1,6042	0,6485	0,4522	0,8954	0,3363
0,9109	0,9237	0,9734	3,5681	0,6688	1,4337	1,6862	0,6763	0,4866	0,9867	0,3724
0,9111	0,9203	0,2636	3,5044	0,6969	1,4612	1,7258	0,7056	0,5066	1,0489	0,4577
0,9143	0,9283	0,2639	3,5339	0,6832	1,3795	1,6161	0,6659	0,5117	1,0245	0,3655
0,9267	0,9238	0,2900	3,7310	0,8222	1,6573	2,0136	0,8562	0,6419	1,2319	0,4544

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 79 – Índices de estabilidade de tensão às 4 horas.

IET_2	IET_3	IET_4	IET_5	IET_6	IET_9	IET_{10}	IET_{11}	IET_{12}	IET_{13}	IET_{14}
0,9282	0,9412	0,2901	3,8284	0,7962	1,6310	1,9491	0,8072	0,6013	1,1911	0,4662
0,9163	0,9323	0,2813	3,7326	0,7560	1,5693	1,8794	0,7930	0,5458	1,1098	0,4463
0,9063	0,9138	0,2667	3,5875	0,6951	1,4702	1,7547	0,7186	0,4845	1,0043	0,4138
0,8691	0,8701	0,2454	3,3243	0,5992	1,3217	1,5632	0,6121	0,4095	0,8674	0,3660
0,8906	0,9061	0,2585	3,4564	0,6649	1,4402	1,7040	0,6826	0,4726	0,9776	0,4077

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 80 – Índices de estabilidade de tensão às 6 horas.

IET_2	IET_3	IET_4	IET_5	IET_6	IET_9	IET_{10}	IET_{11}	IET_{12}	IET_{13}	IET_{14}
0,9015	0,8473	0,2773	3,7649	0,8170	1,6300	1,9897	0,8483	0,6359	1,2421	0,4343
0,9159	0,8918	0,2811	3,7851	0,8272	1,6476	2,0081	0,8481	0,6379	1,2552	0,4429
0,8140	0,7432	0,2184	3,1300	0,5936	1,2269	1,4735	0,6089	0,4416	0,8829	0,3096
0,8651	0,8149	0,2485	3,4468	0,6678	1,4409	1,7289	0,7218	0,5320	1,0519	0,3776
0,7970	0,6947	0,2133	3,0647	0,5868	1,2348	1,4612	0,6018	0,4367	0,8951	0,3241

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 81 – Índices de estabilidade de tensão às 8 horas.

IET_2	IET_3	IET_4	IET_5	IET_6	IET_9	IET_{10}	IET_{11}	IET_{12}	IET_{13}	IET_{14}
0,7763	0,9209	0,2505	3,6348	0,7202	1,5822	1,8196	0,7542	0,5732	1,1425	0,4180
0,7142	0,8385	0,2186	3,2966	0,6175	1,3755	1,5641	0,6363	0,4792	0,9823	0,3674
0,7061	0,8334	0,2216	3,2928	0,6499	1,4214	1,6337	0,6654	0,4949	1,0435	0,3944
0,6987	0,8480	0,2122	3,1933	0,6279	1,3439	1,5459	0,6377	0,4795	1,0001	0,3629
0,6372	0,7536	0,1811	2,8451	0,5196	1,1357	1,2903	0,5308	0,3988	0,8174	0,3039

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 82 – Índices de estabilidade de tensão às 10 horas.

IET_2	IET_3	IET_4	IET_5	IET_6	IET_9	IET_{10}	IET_{11}	IET_{12}	IET_{13}	IET_{14}
0,7040	0,7689	0,2246	3,4349	0,6982	1,5270	1,7507	0,7268	0,5563	1,1166	0,4088
0,6437	0,7009	0,1923	3,0512	0,5924	1,3049	1,4924	0,6100	0,4597	0,9412	0,3432
0,7562	0,8744	0,2375	3,5533	0,7357	1,5788	1,8380	0,7556	0,5803	1,1746	0,4273
0,7228	0,8387	0,2223	3,3699	0,6965	1,4730	1,7177	0,7036	0,5576	1,1022	0,4102
0,6643	0,7612	0,2062	3,0229	0,5921	1,2352	1,4443	0,5894	0,4748	0,9342	0,3284

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 83 – Índices de estabilidade de tensão às 12 horas.

IET_2	IET_3	IET_4	IET_5	IET_6	IET_9	IET_{10}	IET_{11}	IET_{12}	IET_{13}	IET_{14}
0,6918	0,8282	0,2355	3,6631	0,7626	1,6520	1,8974	0,7884	0,6504	1,2357	0,4658
0,6472	0,7827	0,2090	3,3571	0,6567	1,4994	1,6661	0,6702	0,5670	1,0824	0,4163
0,6482	0,7986	0,2074	3,3215	0,6509	1,5078	1,6982	0,6767	0,5484	1,0489	0,3961
0,6216	0,7661	0,1857	3,0756	0,5538	1,3202	1,4853	0,5732	0,4603	0,8832	0,3341
0,6979	0,8646	0,2222	3,4763	0,6774	1,5731	1,7733	0,7079	0,5643	1,0852	0,4132

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 84 – Índices de estabilidade de tensão às 14 horas.

IET_2	IET_3	IET_4	IET_5	IET_6	IET_9	IET_{10}	IET_{11}	IET_{12}	IET_{13}	IET_{14}
0,7428	0,9127	0,2294	3,4690	0,6814	1,5574	1,7676	0,7208	0,5395	1,0868	0,4134
0,7346	0,9070	0,2216	3,3795	0,6657	1,5103	1,7040	0,6959	0,5189	1,0516	0,4080
0,6909	0,8562	0,2041	3,1527	0,5967	1,3674	1,5325	0,6192	0,4684	0,9275	0,3614
0,7036	0,8692	0,2115	3,2259	0,6102	1,4122	1,5837	0,6363	0,4709	0,9676	0,3820
0,6957	0,8646	0,2089	3,2433	0,6242	1,4236	1,5732	0,6344	0,5044	1,0260	0,3913

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 85 – Índices de estabilidade de tensão às 16 horas.

IET_2	IET_3	IET_4	IET_5	IET_6	IET_9	IET_{10}	IET_{11}	IET_{12}	IET_{13}	IET_{14}
0,7277	0,8413	0,2117	3,6981	0,8013	1,7623	2,0228	0,8414	0,6709	1,3132	0,4873
0,6296	0,7059	0,1557	3,1376	0,5958	1,3950	1,5571	0,6283	0,4909	0,9631	0,3481
0,6868	0,7922	0,1908	3,4676	0,7207	1,6339	1,8661	0,7578	0,6031	1,1821	0,4375
0,6325	0,7026	0,1659	3,2034	0,6368	1,4847	1,6684	0,6635	0,5437	1,0641	0,3961
0,6208	0,7006	0,1526	3,0589	0,5741	1,3552	1,5048	0,5880	0,4926	0,9590	0,3415

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 86 – Índices de estabilidade de tensão às 18 horas.

IET_2	IET_3	IET_4	IET_5	IET_6	IET_9	IET_{10}	IET_{11}	IET_{12}	IET_{13}	IET_{14}
0,6901	0,7662	0,2007	3,2986	0,6531	1,4622	1,6647	0,6834	0,5423	1,0835	0,3813
0,7215	0,8273	0,2119	3,3982	0,7104	1,5412	1,7695	0,7355	0,5969	1,1745	0,4026
0,6232	0,6776	0,1669	2,9015	0,5698	1,2308	1,3917	0,5829	0,4771	0,9320	0,3176
0,6715	0,7606	0,1887	3,1588	0,6290	1,3814	1,5638	0,6436	0,5378	1,0671	0,3632
0,6547	0,7374	0,1776	3,0319	0,5991	1,3250	1,4942	0,6102	0,5110	1,0242	0,3400

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 87 – Índices de estabilidade de tensão às 20 horas.

IET_2	IET_3	IET_4	IET_5	IET_6	IET_9	IET_{10}	IET_{11}	IET_{12}	IET_{13}	IET_{14}
0,8385	0,9105	0,2473	3,8272	0,7778	1,7359	2,0169	0,8312	0,6513	1,2727	0,4496
0,8059	0,8481	0,2229	3,5676	0,6985	1,5896	1,8354	0,7469	0,5889	1,1488	0,3999
0,7543	0,7730	0,1973	3,2962	0,6373	1,4421	1,6545	0,6703	0,5401	1,0630	0,3743
0,6868	0,5983	0,1583	2,8459	0,5389	1,2187	1,3888	0,5444	0,4370	0,9041	0,3207
0,6786	0,6492	0,1684	2,9409	0,5750	1,2801	1,4818	0,5822	0,4587	0,9402	0,3357

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 88 – Índices de estabilidade de tensão às 22 horas.

IET_2	IET_3	IET_4	IET_5	IET_6	IET_9	IET_{10}	IET_{11}	IET_{12}	IET_{13}	IET_{14}
0,8791	0,9478	0,2706	3,8247	0,7924	1,6895	2,0045	0,8236	0,6247	1,2524	0,4534
0,8630	0,9196	0,2492	3,6105	0,7056	1,5213	1,7874	0,7279	0,5594	1,1108	0,3889
0,8013	0,8356	0,2219	3,2386	0,5805	1,2893	1,4957	0,5924	0,4669	0,9277	0,3133
0,7922	0,8318	0,2221	3,2455	0,6051	1,3191	1,5230	0,6050	0,4975	0,9864	0,3412
0,8200	0,8673	0,2313	3,3835	0,6539	1,4217	1,6398	0,6590	0,5291	1,0549	0,3724

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 89 – Índices de estabilidade de tensão às 24 horas.

IET_2	IET_3	IET_4	IET_5	IET_6	IET_9	IET_{10}	IET_{11}	IET_{12}	IET_{13}	IET_{14}
0,941406	0,968635	0,3019	3,9681	0,8561	1,7293	2,0800	0,8763	0,6693	1,3122	0,4768
0,920902	0,92503	0,2798	3,7202	0,7840	1,5972	1,8968	0,7992	0,6085	1,2007	0,4331
0,878089	0,857251	0,2517	3,4063	0,6614	1,4002	1,6449	0,6649	0,5040	1,0038	0,3614
0,824614	0,779684	0,2266	3,0978	0,5561	1,2194	1,4135	0,5594	0,4319	0,8585	0,3147
0,900932	0,910275	0,2713	3,6083	0,7489	1,5551	1,8507	0,7664	0,5758	1,1486	0,4237

Fonte: Elaborado pelo autor.