

INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO

ALEXANDRE GIACOMELLI LEAL

**AVALIAÇÃO DO USO DO MÉTODO DO ALICATE TERRÔMETRO
PARA MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO EM
COMPLEXOS EÓLICOS**

Curitiba

2021

ALEXANDRE GIACOMELLI LEAL

**AVALIAÇÃO DO USO DO MÉTODO DO ALICATE TERRÔMETRO
PARA MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO EM
COMPLEXOS EÓLICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, Área de Concentração Sistemas Energéticos Convencionais e Alternativos, do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, em parceria com o Instituto de Engenharia do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento de Tecnologia.

Orientador: Prof. Henry Leonardo López Salamanca

Coorientador: Prof. Débora Cintia Marcilio

Curitiba
2021

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

- L435a Leal, Alexandre Giacomelli
Avaliação do uso do método do alicate terrômetro para medição de resistência de aterramento em complexos eólicos / [recurso eletrônico] / Alexandre Giacomelli Leal. – Curitiba, 2021.
- Dissertação - Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC), em parceria com o Instituto de Engenharia do Paraná. (IEP).
- Orientador: Prof. Henry Leonardo López Salamanca
Coorientador: Prof. Débora Cintia Marcilio
1. Energia eólica. 2. Sistemas de aterramento. 3. Aerogeradores. I. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento. II. Instituto de Engenharia do Paraná. III. Salamanca, Henry Leonardo López. IV. Marcilio, Débora Cintia. V. Título.

CDD: 621.312136

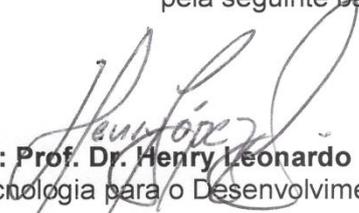
Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585

TERMO DE APROVAÇÃO

ALEXANDRE GIACOMELLI LEAL

AVALIAÇÃO DO USO DO MÉTODO DO ALICATE TERRÔMETRO PARA MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO EM COMPLEXOS EÓLICOS

Trabalho de conclusão de curso aprovado como requisito para obtenção do grau de Mestre, no Mestrado Profissional do Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, realização do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC) em parceria com o Instituto de Engenharia do Paraná (IEP), pela seguinte banca examinadora:


ORIENTADOR (A): Prof. Dr. Henry Leonardo López Salamanca
Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC)


Prof. Dr. Lúcio de Medeiros
Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC)


Prof. Dr. Luiz Felipe Ribeiro Barrozo Toledo
Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC)


Prof. Dr. André Eugênio Lazzaretti
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

Curitiba, 17 de setembro de 2021.

AGRADECIMENTOS

Bendito seja o Senhor, meu Refúgio, minha Fortaleza e meu Libertador.

Ao Professor Henry Leonardo López Salamanca, pela paciência, empenho e sentido prático com que me orientou neste trabalho.

À Professora Débora Cíntia Marcilio, por sua dedicação e apoio.

À minha família, pelo incentivo e apoio incondicionais.

Aos Srs. Eloi Rufato Junior e Alessandro Pinto Lourenço do Departamento de Energia Eólica da Copel, pelo compartilhamento de documentos técnicos essenciais para a realização deste estudo.

RESUMO

Atualmente não há um método padrão para a medição de resistência de aterramento dos aerogeradores em um parque eólico e os métodos usuais costumam não ser viáveis para as inspeções periódicas devido à complexidade do arranjo do ensaio e aos altos custos associados. O método do alicate terrômetro é um método alternativo para medição de resistência de aterramento em sistemas elétricos multiaterrados. Este trabalho busca viabilizar a utilização deste método para a medição da resistência de aterramento em atividades de manutenção periódica de parques eólicos de energia. Com este objetivo, o presente estudo propõe um método científico para verificação e mitigação dos erros de medição associados a aplicação do método do alicate terrômetro em parques eólicos. O erro associado ao uso do método direto e indireto do alicate terrômetro é avaliado por meio de simulações computacionais de seu circuito equivalente. Caso os resultados obtidos não sejam satisfatórios, métodos numéricos são empregados para minimização dos erros de medição. Desta forma, são avaliadas uma solução numérica e outra heurística que utiliza a técnica de redes neurais. O método proposto por esta dissertação é aplicado no sistema de aterramento do Complexo Eólico São Bento do Norte, para o qual o método direto apresenta um erro médio percentual absoluto (MAPE) de 349,28 % em relação aos valores de projeto das resistências de aterramento. Já a aplicação do método indireto apresenta um MAPE de 41,28 %. A solução numérica apresenta erros de medição praticamente nulos, no entanto devido à laboriosa formulação de seu equacionamento, é limitada a um sistema de aterramento de aerogerador, fato que a torna inviável para uso em manutenções periódicas. Solução final para o método proposto, a heurística cria redes neurais que conseguem estimar os valores das resistências de aterramento dos aerogeradores a partir das respectivas leituras tomadas com o alicate terrômetro, reduzindo o MAPE do método direto para 1,85%. Deste modo, apresenta-se como uma proposta alternativa para medição de resistência de aterramento em complexos eólicos nas atividades de inspeção durante as manutenções preventivas e corretivas periódicas.

Palavras-chave: Parques eólicos; sistemas de aterramento; alicate terrômetro; resistência de aterramento; aerogeradores.

ABSTRACT

Methods that have been used to measure grounding resistance are not feasible in periodic maintenance activities of onshore wind farms due to test arrangement complexity and associated high costs. The clamp-on earth ground meter is an alternative method proposed to measure earth resistance in multi-grounded electrical systems. This work aims to make possible the use of the clamp-on earth ground meter as an alternative to measure grounding resistance in periodic maintenance activities of wind farms. In pursuit of that goal this study proposes a scientific method for evaluating and mitigating measurement errors associated with the application of the clamp-on method in wind farms. The error associated with the use of the direct and indirect clamp-on method is evaluated through computational simulations of its equivalent circuit. If the results obtained are not satisfactory, numerical methods are used to minimize measurement errors. In this way, a numerical solution and a heuristic solution using artificial neural network technique are used. The method proposed by this dissertation is applied in the São Bento do Norte Wind Power Complex grounding system, for which the direct method presents a mean absolute percentage error (MAPE) of 349.28% in relation to the grounding resistances project values. On the other hand, the application of the indirect method presents a MAPE of 41.28%. The numerical solution presents errors close to zero, however, due to the laborious formulation of its equation, it is limited to one wind turbine grounding system, a fact that makes it unfeasible for use in periodic maintenance. The final solution proposed, the heuristic create neural networks that are able to estimate the values of the wind turbines grounding resistances from their respective clamp-on meter measurements, reducing the direct method's MAPE to 1.85%. Therefore, it is presented as an alternative proposal for measuring the grounding resistance of wind turbines in the wind park periodic maintenance.

Keywords: clamp-on method; grounding resistance; wind turbine generator; wind farms; measurement.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – ATERRAMENTO TÍPICO DE UM AEROGERADOR.....	15
FIGURA 2 – COMPONENTES DE CORRENTE DE SOLO	23
FIGURA 3 - VARIAÇÕES TÍPICAS DE RESISTIVIDADE P DO SOLO	26
FIGURA 4 - SOLO EQUIVALENTE COM DUAS CAMADAS.....	28
FIGURA 5 – CURVAS DE ENDRENYI.....	29
FIGURA 6 - SOLO ESTRATIFICADO	30
FIGURA 7 – MEDIÇÃO DE QUEDA DE POTENCIAL	34
FIGURA 8 - CURVA CARACTERÍSTICA TEÓRICA DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO DE UM ELETRODO PONTUAL.....	35
FIGURA 9 - ESQUEMA SIMPLIFICADO DA MEDIÇÃO COM ALTA FREQUÊNCIA	37
FIGURA 10 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE UM ALICATE TERRÔMETRO.	38
FIGURA 11 - SISTEMA MULTIATERRADO E SEU CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE	40
FIGURA 12 – VISÃO GERAL DE UM PARQUE EÓLICO DE ENERGIA (USINA EÓLICA).....	43
FIGURA 13 - VISTA INTERNA DOS DIFERENTES COMPONENTES DE UM AEROGERADOR TÍPICO	44
FIGURA 14 - ARRANJO TÍPICO DE UMA REDE SUBTERRÂNEA DE COLETA....	47
FIGURA 15 - DESENHO ESQUEMÁTICO DE UMA REDE SUBTERRÂNEA	48
FIGURA 16 - EXEMPLO DE ESTRUTURA AÉREA UTILIZADA EM REDES COLETORAS AÉREAS 13,8 KV	48
FIGURA 17 - MALHA DE ATERRAMENTO DE UM AEROGERADOR	50
FIGURA 18 – CONFIGURAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM SISTEMA DE ATERRAMENTO DE UM PARQUE EÓLICO DE ENERGIA.....	51
FIGURA 19 – MODELO DE PARÂMETRO CONCENTRADO ADOTADO PARA OS ELETRODOS HORIZONTAIS.....	58
FIGURA 20 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO DE UM CONDUTOR DE DESCIDA DO ATERRAMENTO DE UMA TORRE.....	62

FIGURA 21 - MODELO EQUIVALENTE DA MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO DE UM CONDUTOR DE DESCIDA DO ATERRAMENTO DE UMA TORRE.....	62
FIGURA 22 - MODELO EQUIVALENTE SIMPLIFICADO DA MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO DE UM CONDUTOR DE DESCIDA DO ATERRAMENTO DE UMA TORRE.	63
FIGURA 23 - FLUXOGRAMA METODOLÓGICO	68
FIGURA 24 - MEDIÇÃO DO SINAL GERADO PELO ALICATE TERRÔMETRO	70
FIGURA 25 - CIRCUITO EQUIVALENTE DO MÉTODO DIRETO DO ALICATE TERRÔMETRO SENDO APLICADO A UM AEROGERADOR DO PARQUE EÓLICO.....	71
FIGURA 26 – CIRCUITOS EQUIVALENTES DAS ETAPAS DO MÉTODO INDIRETO DO ALICATE TERRÔMETRO	74
FIGURA 27 – GRÁFICO DE REGRESSÃO LINEAR DO MÉTODO DIRETO DO ALICATE TERRÔMETRO	78
FIGURA 28 - FLUXOGRAMA DA SOLUÇÃO HEURÍSTICA.....	81
FIGURA 29 – PLANTA DOS PARQUES EÓLICOS SÃO BENTO DO NORTE E OLHO D'ÁGUA.....	83
FIGURA 30 – FORMA DE ONDA DE TENSÃO GERADA PELO ALICATE TERRÔMETRO UT-278A	85
FIGURA 31 - MODELO ELÉTRICO DO SISTEMA DE ATERRAMENTO DO COMPLEXO EÓLICO SÃO BENTO DO NORTE.....	89
FIGURA 32 - ERRO DO MÉTODO DIRETO DO ALICATE TERRÔMETRO EM DIFERENTES FREQUÊNCIAS DE TESTE POR AEROGERADOR DO PARQUE SÃO BENTO DO NORTE.	92
FIGURA 33 - COMPARAÇÃO ENTRE O USO DA MEDIÇÃO DIRETA E A INDIRETA DO MÉTODO DO ALICATE TERRÔMETRO NA FREQUÊNCIA DE 1572 HZ	95
FIGURA 34 - COMPARAÇÃO ENTRE O USO DA MEDIÇÃO DIRETA E A INDIRETA DO MÉTODO DO ALICATE TERRÔMETRO NA FREQUÊNCIA DE 0 HZ	95
FIGURA 35 – DIAGRAMA ESQUEMATICO DO SISTEMA DE ATERRAMENTO DE UM AEROGERADOR E O SEU CIRCUITO EQUIVALENTE.....	97

FIGURA 36 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO SISTEMA DE ATERRAMENTO DE UM PARQUE EÓLICO CUJAS MALHAS DE ATERRAMENTO DOS AEROGERADORES SÃO INTERLIGADAS POR ELETRODOS HORIZONTAIS	103
FIGURA 37 - CIRCUITO EQUIVALENTE DO SISTEMA DE ATERRAMENTO DE UM PARQUE EÓLICO CUJAS MALHAS DE ATERRAMENTO DOS AEROGERADORES SÃO INTERLIGADAS POR ELETRODOS HORIZONTAIS	103
FIGURA 38 – ESTRUTURA MATRICIAL ALGORITMO ATERRAD3.M.....	104
FIGURA 39 - TIPO DE ATERRAMENTO USADO NA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	106
FIGURA 40 - PARÂMETROS DA REDE NEURAL 7	113
FIGURA 41 - GRÁFICO DE PERFORMANCE DA REDE NEURAL 7	113
FIGURA 42 - GRÁFICOS DE REGRESSÃO DA REDE NEURAL 7.....	114
FIGURA 43 - PARÂMETROS DA REDE NEURAL SB13.....	127
FIGURA 44 - GRÁFICO DE PERFORMANCE DA REDE NEURAL SB13.....	127
FIGURA 45 - GRÁFICOS DE COMPARAÇÃO ENTRE A SAÍDA DESEJADA (LINHA CONTÍNUA) E A SAÍDA DA REDE SB13 (CÍRCULOS) NAS ETAPAS DE TREINAMENTO,VALIDAÇÃO E TESTES	128
FIGURA 46 - PARÂMETROS DA REDE NEURAL OD15-SB09	129
FIGURA 47 - GRÁFICO DE PERFORMANCE DA REDE NEURAL OD15-SB09 ...	129
FIGURA 48 - GRÁFICOS DE COMPARAÇÃO ENTRE A SAÍDA DESEJADA (LINHA CONTÍNUA) E A SAÍDA DA REDE OD15-SB09 (CÍRCULOS) NAS ETAPAS DE TREINAMENTO,VALIDAÇÃO E TESTES	130
FIGURA 49 - PARÂMETROS DA REDE NEURAL OD04-SB10-SB11	131
FIGURA 50 - GRÁFICO DE PERFORMANCE DA REDE NEURAL OD04-SB10-SB11	131
FIGURA 51 - GRÁFICOS DE COMPARAÇÃO ENTRE A SAÍDA DESEJADA (LINHA CONTÍNUA) E A SAÍDA DA REDE OD04-SB10-SB11 (CÍRCULOS) NAS ETAPAS DE TREINAMENTO,VALIDAÇÃO E TESTES	132
FIGURA 52 - PARÂMETROS DA REDE NEURAL OD11-OD12-OD13.....	133
FIGURA 53 - GRÁFICO DE PERFORMANCE DA REDE OD11-OD12-OD13	133

FIGURA 54 - GRÁFICOS DE COMPARAÇÃO ENTRE A SAÍDA DESEJADA (LINHA CONTÍNUA) E A SAÍDA DA REDE OD11-OD12-OD13 (CÍRCULOS) NAS ETAPAS DE TREINAMENTO,VALIDAÇÃO E TESTES	134
FIGURA 55 - PARÂMETROS DA REDE NEURAL OD14-SB15-SB14	135
FIGURA 56 - GRÁFICO DE PERFORMANCE DA REDE NEURAL OD14-SB15-SB14	135
FIGURA 57 - RÁFICOS DE COMPARAÇÃO ENTRE A SAÍDA DESEJADA (LINHA CONTÍNUA) E A SAÍDA DA REDE OD14-SB15-SB14 (CÍRCULOS) NAS ETAPAS DE TREINAMENTO,VALIDAÇÃO E TESTES.	136
FIGURA 58 - PARÂMETROS DA REDE NEURAL OD10-OD09-OD08-OD07-SB12-OD06- OD05	137
FIGURA 59 - DE PERFORMANCE DA REDE NEURAL OD10-OD09-OD08-OD07-SB12-OD06- OD05	137
FIGURA 60 - GRÁFICOS DE COMPARAÇÃO ENTRE A SAÍDA DESEJADA (LINHA CONTÍNUA) E A SAÍDA DA REDE OD10-OD09-OD08-OD07-SB12-OD06-OD05 (CÍRCULOS) NAS ETAPAS DE TREINAMENTO,VALIDAÇÃO E TESTES	138

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - VALORES TÍPICOS DE RESISTIVIDADE DE ALGUNS TIPOS DE SOLO	26
TABELA 2 – ORIGINALIDADE DA DISSERTAÇÃO FRENTE AOS ESTUDOS MAIS RELEVANTES	57
TABELA 3 - LEVANTAMENTO DAS CARACTERÍSTICAS DO SINAL GERADO PELO ALICATE TERRÔMETRO.	85
TABELA 4 – ESPECIFICAÇÕES DO ALICATE TERRÔMETRO UT-278A	86
TABELA 5- VALORES DAS GRANDEZAS ELÉTRICAS DOS ELETRODOS HORIZONTAIS DO COMPLEXO SÃO BENTO DO NORTE	87
TABELA 6 – RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO DOS AEROGERADORES DO COMPLEXO EÓLICO SÃO BENTO DO NORTE.....	88
TABELA 7 - RESULTADOS OBTIDOS COM O MÉTODO DIRETO DO ALICATE TERRÔMETRO.....	91
TABELA 8 – RESULTADOS OBTIDOS COM O MÉTODO INDIRETO DO ALICATE TERRÔMETRO.....	94
TABELA 9 – RESULTADOS OBTIDOS COM O ALGORITMO NUM_SBN.M	100
TABELA 10 – CÁLCULO DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO DOS AEROGERADORES DO PARQUE SÃO BENTO DO NORTE.....	107
TABELA 11 – ESTUDO DE SENSIBILIDADE DOS FATORES QUE INFLUENCIAM A RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO.....	107
TABELA 12 - RESULTADOS DOS TESTES DA ETAPA FINAL DO ALGORITMO RB_SBN.M.....	111
TABELA 13 - RESULTADOS DOS TESTES DA ETAPA FINAL DO ALGORITMO RB_SBN.M (CONTINUAÇÃO)	111
TABELA 14 - ESTUDO DO ESPECTRO E DO ERRO DAS AMOSTRAS DA ETAPA FINAL DE TESTES DO ALGORITMO RN_SBN.M.....	112
TABELA 15 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DAS METODOLOGIAS.	115

LISTA DE SIGLAS

ABB – Asea Brown Boveri

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

BEP – Barramento de Equipotencialização Principal

QD – Quadro de Distribuição

MAPE – Mean Absolute Percentage Error

MQP – Método da Queda de Potencial

NBR – Norma Brasileira

NR – Norma Regulamentadora

IEEE – Institute of Electrical and Electronic Engineers

IEC – International Electrotechnical Commission

RAM – Memória de Acesso Aleatório

SE – Subestação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	CONTEXTO	14
1.2	OBJETIVOS	17
1.3	JUSTIFICATIVA	18
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	ATERRAMENTO ELÉTRICO	21
2.2	ELETRODO DE ATERRAMENTO	23
2.3	RESISTIVIDADE DO SOLO	25
2.3.1	Resistividade aparente do solo	27
2.3.2	Resistividade média do solo a uma dada profundidade	30
2.3.3	Medição de resistividade do solo	30
2.3.4	Resistência de aterramento	32
2.4	MODELAGEM MATEMÁTICA DE SISTEMAS DE ATERRAMENTO	32
2.5	MÉTODOS DE MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO	33
2.5.1	Método da queda de potencial (MQP)	34
2.5.2	Método de injeção de baixa corrente em alta frequência	36
2.5.3	Método do alicate terrômetro	38
2.6	NORMATIZAÇÃO	41
2.7	PARQUES EÓLICOS DE ENERGIA	42
2.7.1	Definição de parque eólico de energia	42
2.7.2	Parques eólicos <i>onshore</i> e <i>offshore</i>	43
2.7.3	Aerogerador	43
2.7.4	Centrais de transformação	46
2.7.5	Rede coletora	46
2.7.5.1	Rede coletora subterrânea	47

2.7.5.2	Rede coletora aérea	48
2.7.6	Subestação Coletora	49
2.7.7	Sistema de aterramento de parques eólicos	49
2.8	MÉTODOS NUMÉRICOS	52
2.8.1	Método de Newton-Raphson.....	52
2.8.2	Redes Neurais Artificiais	53
3	REVISÃO DA LITERATURA	56
4	MATERIAIS E MÉTODO	67
4.1	MATERIAIS	67
4.2	MÉTODO.....	67
4.2.1	Levantamento das características elétricas do sistema de aterramento do parque eólico e do alicate terrômetro.	69
4.2.2	Modelagem elétrica do sistema de aterramento do parque eólico e do alicate terrômetro.	70
4.2.3	Método direto do alicate terrômetro.....	71
4.2.4	Análise dos resultados obtidos com o método direto do alicate terrômetro.....	72
4.2.5	Método indireto do alicate terrômetro.....	72
4.2.6	Análise dos resultados obtidos com o uso do método indireto do alicate terrômetro.....	76
4.2.7	Desenvolvimento de uma solução numérica.....	76
4.2.8	Análise dos resultados obtidos com o uso da solução numérica.	77
4.2.9	Desenvolvimento de uma solução heurística.	77
4.2.10	Análise dos resultados obtidos com o uso da solução heurística.....	82
5	APLICAÇÃO DO MÉTODO E ANALISE DE RESULTADOS	83
5.1	LEVANTAMENTO DAS CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DO ESTUDO DE CASO.....	83
5.2	MODELAGEM ELÉTRICA DO ESTUDO DE CASO.	86
5.3	MÉTODO DIRETO APLICADO AO ESTUDO DE CASO.....	90

5.4	ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS COM O MÉTODO DIRETO APLICADO AO ESTUDO DE CASO.....	91
5.5	MÉTODO INDIRETO APLICADO AO ESTUDO DE CASO.	93
5.6	ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS COM O MÉTODO INDIRETO APLICADO AO ESTUDO DE CASO.....	94
5.7	DESENVOLVIMENTO DE UMA SOLUÇÃO NUMÉRICA PARA O ESTUDO DE CASO.....	96
5.8	ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS COM A SOLUÇÃO NUMÉRICA APLICADA AO ESTUDO DE CASO.....	100
5.9	DESENVOLVIMENTO UMA SOLUÇÃO HEURÍSTICA PARA O ESTUDO DE CASO.....	101
5.10	ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS COM A SOLUÇÃO HEURÍSTICA APLICADA AO ESTUDO DE CASO.....	112
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	116
	REFERÊNCIAS	119
	APÊNDICE - PARÂMETROS E CARACTERÍSTICAS DAS REDES NEURAIS CRIADAS PELO ALGORITMO RN_SBN.M.....	127

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

Um parque eólico ou usina eólica é um espaço, terrestre ou marítimo, onde estão concentrados vários aerogeradores destinados a transformar energia eólica em elétrica.

De acordo com Senger e Reis Filho (2017), os aerogeradores comumente utilizados nas instalações de parques e complexos eólicos possuem potência nominal entre 1 e 3 MVA e tensão nominal em torno de 600 V, embora já existam equipamentos operando em média tensão e com potência superior. A cada aerogerador é associado um transformador elevador que aumenta a tensão para 13,8 kV ou 34,5 kV. As dezenas ou mesmo centenas de aerogeradores que integram um parque de grande porte são interconectados através de vários circuitos coletores, radiais, de média tensão, até o transformador da subestação responsável pela conexão da planta com o sistema interligado.

Segundo o Sistema de Informações de Geração da ANEEL SIGA, atualmente o Brasil possui 740 usinas eólicas em operação com uma capacidade total instalada de 19,1 GW e uma capacidade em construção de mais 5,4 GW. Considerando todas as fontes de geração de energia elétrica, a fonte de energia eólica representa 10,7 % da matriz elétrica brasileira (ANEEL, 2021).

Devido à importância dos parques eólicos no setor elétrico nacional, é imperativo garantir o correto desempenho de suas instalações e mitigar problemas de funcionamento devido às falhas e perturbações através de sistemas de proteção confiáveis. Segundo Barbosa (2009), um sistema de proteção com desempenho adequado deve proteger o sistema elétrico de potência dos efeitos destrutivos de uma falta sustentada evitando instabilidades e desligamento do sistema.

Um dos componentes mais importantes do sistema de proteção de um parque eólico é seu sistema de aterramento sendo também um fator preponderante na garantia de segurança das pessoas. Sua principal função é a de proporcionar uma menor impedância e maior capacidade de circulação de corrente elétrica ao solo para garantir a devida atuação das proteções do sistema elétrico de potência e a geração de potenciais de toque e passo dentro de valores permissíveis (VISACRO FILHO, 2019).

Segundo Freire et al. (2012), em um parque eólico típico, o aterramento de cada aerogerador é constituído por dois anéis de cabos de cobre de 70 mm², interligados entre si e à armadura da fundação da estrutura, podendo ser reforçados por hastes de aço-cobreado e também por condutores radiais adicionais, destinados à melhoria do desempenho da impedância impulsiva do sistema no tocante às descargas atmosféricas. As bases dos aerogeradores podem ser interligadas por cabo de cobre de 70 mm², que acompanham o mesmo encaminhamento da linha subterrânea de média tensão, podendo se estender ou não até a subestação de interligação. A Figura 1 ilustra o aterramento típico de aerogerador.

FIGURA 1 – ATERRAMENTO TÍPICO DE UM AEROGERADOR



Fonte: Adaptado de DEHN (2018)

Devido aos constantes esforços eletromecânicos que são submetidos, os efeitos corrosivos e a possibilidade de rompimento acidental, os condutores e as conexões do sistema de aterramento de uma instalação elétrica, podem ter seu desempenho afetado ao longo do tempo. A deficiência destas conexões é considerada umas das principais causas que afetam o desempenho dos sistemas de aterramento e pode resultar em diferenças de potenciais de superfície perigosas para os seres humanos (LÓPEZ-SALAMANCA et al., 2012). Por este motivo é determinante que o projeto do sistema de aterramento esteja em conformidade com as recomendações técnicas e normas nacionais e internacionais do setor. Além disso, é recomendado

que sejam realizadas verificações periódicas do sistema de aterramento através de medições da interligação dos equipamentos instalados com a malha de aterramento e da resistência de aterramento.

Usualmente a medição da resistência de aterramento é realizada no comissionamento das instalações antes da energização do sistema, nesta situação as metodologias convencionais, baseadas em injeção de corrente com alta amplitude e baixa frequência, são normalmente utilizadas para sua avaliação. No entanto, a utilização deste método de medição não é recomendada em sistemas energizados porque as altas magnitudes de corrente injetada durante o processo de medição podem ocasionar a atuação indevida dos reles de proteção contra fuga a terra e desenergizar o sistema. Por esta razão, novas metodologias baseadas em injeção de corrente de alta frequência e baixa amplitude vem sendo utilizadas para avaliação de sistemas de aterramento de instalações elétricas energizadas (SOTILLE et al., 2005).

Atualmente, o método mais utilizado para análise do aterramento em instalações elétricas energizadas é o método de queda de potencial realizado com terrômetro de alta frequência (25 kHz) e baixa amplitude de corrente. No entanto este método possui restrições para medição da resistência de aterramento em instalações alocadas em solos com resistividade elevada, ou com malhas de aterramento defeituosas (LÓPEZ-SALAMANCA et al., 2016a). Tais restrições serão abordadas na justificativa deste documento.

O método do alicate terrômetro, base para o estudo desta dissertação, é apresentado nas normas ABNT NBR 15749 e IEEE 81, e faz uso deste instrumento acoplado eletromagneticamente a um condutor de descida de um eletrodo de aterramento de um sistema multiaterrado para se obter o valor de sua resistência de aterramento (IEEE 81, 2012), (ABNT NBR 15749, 2009).

Este método permite se obter medições de resistência de aterramento sem a necessidade de se desconectar ou isolar o ponto de aterramento a ser medido, oferecendo ainda maior praticidade em relação aos métodos usuais pois não necessita da instalação de eletrodos auxiliares de potencial e de corrente. Segundo a norma ABNT NBR 15749, este método pode ser aplicado em sistemas de aterramento multi-aterrados desde que consideradas suas limitações que serão abordadas no capítulo 2.5.3 desta dissertação (ABNT NBR 15749, 2009).

Esta dissertação busca viabilizar a utilização deste método para a medição da resistência de aterramento de aerogeradores propondo um método científico para

verificação e mitigação dos erros de medição associados à sua aplicação em parques eólicos. O erro associado ao uso do método do alicate terrômetro é avaliado por meio de simulações computacionais de seu circuito equivalente. Caso os resultados obtidos não sejam satisfatórios, métodos numéricos são empregados para minimização dos erros de medição. Desta forma, são avaliadas uma solução numérica e outra heurística que utiliza a técnica de redes neurais.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo propor o uso do alicate terrômetro para a medição da resistência de aterramento de aerogeradores interligados por eletrodos horizontais subterrâneos ou por condutores aéreos, nas atividades de manutenção periódica dos parques eólicos de energia.

Seguindo este propósito, os objetivos específicos deste trabalho são:

- Simulação e análise computacional do uso direto das medições obtidas com o método do alicate terrômetro para estimativa dos valores das resistências de aterramento dos aerogeradores em parques eólicos de energia (Método direto do alicate terrômetro).
- Simulação, aplicação de metodologia numérica e análise computacional para uso indireto das medições obtidas com o alicate terrômetro acoplado ao condutor de descida da malha de aterramento de um aerogerador e aos demais condutores que o interligam às outras componentes do sistema de aterramento do parque eólico, para a estimativa de sua resistência de aterramento (Método indireto do alicate terrômetro).
- Desenvolvimento de uma solução numérica para estimativa das resistências de aterramento dos aerogeradores de um parque eólico a partir das medições obtidas com o método direto do alicate terrômetro.
- Desenvolvimento de uma solução heurística para estimativa das resistências de aterramento dos aerogeradores de um parque eólico a partir das medições obtidas com o método direto do alicate terrômetro.

1.3 JUSTIFICATIVA

As elevadas resistividades do solo onde vários dos complexos eólicos no Brasil são construídos, superiores a $1000 \Omega \cdot m$, acaba por resultar em um alto valor de resistência de aterramento para cada torre de aerogerador. Desta forma, para a obtenção de resistências de aterramento inferiores a 10Ω , adequadas ao funcionamento do sistema de aterramento de um parque eólico, faz-se necessária a interligação das armaduras das fundações dos aerogeradores entre si e, em alguns casos com a malha de aterramento da subestação de interface com o sistema de distribuição de energia (FREIRE et al., 2014).

O estudo dos valores individuais dos aterramentos dos aerogeradores e sua integração entre si e com a subestação de interligação devem ser conduzidos de forma a quantificar corretamente a distribuição das parcelas das correntes de curto-circuito para a terra em cada componente do sistema de aterramento (correntes de malha). A obtenção destes valores é de suma importância para o correto dimensionamento da coordenação das proteções de suas instalações elétricas.

Convencionalmente a medição do aterramento no comissionamento de uma instalação elétrica, é feita via injeção de corrente em frequência industrial, no entanto, devido aos altos valores da corrente circulante, existe o risco de choque elétrico aos profissionais envolvidos nas medições devido aos potenciais de superfície produzidos no solo. Além disto, para que a resistência medida corresponda apenas à malha de aterramento sob análise e não ao paralelo desta com outras adjacentes é necessária a sua total desconexão junto às demais. Assim, os métodos convencionais não são utilizados em inspeções periódicas devido à necessidade de interrupção do fornecimento de energia para o sistema elétrico e de sua complexidade operacional.

Neste contexto, métodos com baixa corrente e alta frequência vem recentemente sendo utilizados para medição de impedância em instalações elétricas energizadas. Tais métodos possuem fundamentação teórica no desacoplamento dos cabos que interligam as malhas de aterramento adjacentes de uma instalação elétrica. A forma de onda e a frequência do sinal de corrente de ensaio são projetadas para que a impedância do cabo de interligação entre as malhas seja muito maior comparada com a resistência de aterramento sob ensaio, permitindo assim que maior parte da corrente injetada flua para terra através da malha de aterramento sob ensaio tornando desprezível a parcela de corrente das malhas adjacentes. Assim o cálculo

da resistência é realizado pelo equipamento considerando a corrente total injetada, com erro de medição aceitável (SOTILLE et al., 2005).

Entretanto este método não é indicado para medição da resistência de aterramento em instalações elétricas situadas em solos com resistividade elevada (acima de $1000 \Omega.m$), pois a condição necessária para a correta aplicação deste método pode não ser atendida devido à resistência de aterramento sob ensaio possuir valor não desprezível em relação à impedância do cabo de interligação entre as malhas adjacentes, sendo que desta forma não estaria sendo observado o efeito de desacoplamento desejado, invalidando a medição. Além disso, a injeção de corrente pelo terrômetro fica limitada pela alta resistência de aterramento dos eletrodos utilizados para o retorno de corrente. Como resultado, a magnitude da corrente detectada pelo instrumento de medição é tão baixa que afeta significativamente sua exatidão, impossibilitando desta forma o ensaio (LÓPEZ-SALAMANCA et al., 2016b).

Portanto, este estudo avalia o uso do método do alicate terrômetro, como alternativa ao método de queda de potencial realizado com terrômetro de alta frequência (25 kHz) e baixa amplitude de corrente, na medição das resistências das malhas de aterramento dos aerogeradores de um parque eólico com as instalações energizadas.

As vantagens do uso do método do alicate terrômetro para medição de aterramento dos aerogeradores em parques eólicos são:

- Menor complexidade do arranjo de ensaio pois não há a necessidade da instalação dos longos cabos sensores para os eletrodos de corrente e potencial que são utilizados nas metodologias de medição usuais;
- Não há necessidade de desenergização do sistema, evitando-se os custos devido à parada de fornecimento de energia ao sistema elétrico;
- Minimiza a necessidade de desconexões dos eletrodos horizontais e cabos guarda que interligam as malhas de aterramento dos aerogeradores;
- Proporciona considerável otimização do tempo e dos recursos materiais e financeiros empregados atualmente com o uso das metodologias atuais de medição;

- Proporciona estudos mais confiáveis, de coordenação de proteções e isolamentos, do que os realizados de forma amostral através dos métodos convencionais;
- Proporciona maior segurança à equipe responsável pela medição pois é realizado em áreas abrigadas e em menor tempo do que os métodos convencionais.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A dissertação está dividida em sete capítulos sendo que o Capítulo 1 apresenta a contextualização referente ao assunto que é abordado e discutido no desenvolvimento da dissertação, incluindo os itens objetivo geral, objetivos específicos, justificativa do trabalho e estrutura da dissertação.

O Capítulo 2 contém uma revisão bibliográfica onde são abordados os principais temas concernentes ao desenvolvimento da pesquisa.

O Capítulo 3 versa sobre o estado da arte, onde são apresentados os trabalhos científicos publicados mais recentes e relevantes na área de medição de resistência de aterramento através o método do alicate terrômetro.

O Capítulo 4 contém a descrição dos materiais utilizados e do método da solução proposta, de uma forma que a pesquisa possa ser reconduzida para outros estudos de caso.

O Capítulo 5 apresenta o estudo de caso da dissertação, com a aplicação do método proposto e a análise dos resultados obtidos em um determinado sistema de aterramento de um parque eólico de energia.

Por fim, no Capítulo 6 apresentam-se as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ATERRAMENTO ELÉTRICO

A superfície da camada superior do planeta Terra é coberta com solo e rochas. Esta camada está geralmente associada ao uso agrícola, mineração ou a construções. No entanto, ela possui uma propriedade elétrica importante, chamada de condutividade. A Terra não é tão boa condutora de eletricidade em comparação com condutores de cobre ou alumínio. Entretanto considerando sua enorme massa, acaba fornecendo uma grande área para o fluxo de corrente elétrica, possuindo uma resistência elétrica seja tão baixa a ponto de ser considerada como um bom condutor. Na verdade, todo o planeta pode, portanto, ser considerado como um condutor infinito que está em potencial de referência. (KYORITSU, 2019).

As pessoas geralmente estão em contato constante com o solo, portanto, se tocarem um objeto carregado cujo potencial elétrico seja diferente da terra, a diferença de potencial resultante poderá resultar em choque elétrico. O processo de aterramento consiste em conectar a massa geral da terra com todos os objetos que potencialmente possam se tornar carregados, de modo a fornecer um caminho de menor impedância para as correntes de falta e criar uma equipotencialidade única entre todos os objetos e o solo. O ponto do sistema que se deseja conectar ao solo pode ser uma trilha numa placa de circuito impresso, a carcaça de um motor ou de um computador ou ainda o neutro de um sistema elétrico.

Em suma, um sistema de aterramento evitará uma diferença de potencial entre as partes aterradas, eliminando assim o risco de choque elétrico e providenciando um caminho de baixa resistência para as correntes de falta, garantindo assim que os sistemas de proteção de circuito como fusíveis, disjuntores e dispositivos diferenciais residuais possam operar. O aterramento é, portanto, uma parte indispensável de um sistema elétrico para garantir sua segurança e integridade.

As partes energizadas internas e a carcaça externa de metal de um equipamento elétrico são isoladas e este isolamento fornece proteção contra choque elétrico por contato direto. Em caso de falha de isolamento, o potencial do chassi de metal do equipamento torna-se o da tensão de alimentação e, portanto, é criada uma diferença de potencial em relação ao aterramento. Assim, se não houver aterramento e proteção adequados, quando um ser humano tocar neste chassi, como resultado da

diferença de potencial ao longo do corpo, uma corrente passará do chassi para a terra via corpo humano causando um choque elétrico que pode ser potencialmente letal (KYORITSU, 2019).

Se a caixa de metal for aterrada, o fluxo da corrente de falha é dividido. Assim, a maior parte da corrente de falha flui através do condutor de proteção para o solo, uma vez que a resistência do caminho de terra é projetada para ser muito mais baixa do que a resistência do corpo humano. Assim, apenas uma pequena quantidade de corrente flui pelo corpo. A desconexão automática da fonte de alimentação é necessária quando um risco de efeitos fisiológicos prejudiciais para uma pessoa pode surgir devido a uma falha como resultado do valor e da duração de uma tensão de toque perigosa. Neste sentido, uma adequada coordenação e projeto do sistema de aterramento juntamente com o dispositivo de proteção garantirão a desconexão automática da fonte de alimentação (KYORITSU, 2019).

O propósito de um aterramento não se limita apenas à proteção da vida. Caso haja uma ruptura no isolamento entre o primário (média tensão) e o secundário (baixa tensão) de um transformador de distribuição, uma média tensão aparecerá em seu secundário. Nesse caso, uma carga elétrica conectada ao lado secundário será danificada e exporá as pessoas a riscos de choque elétrico e incêndio. Uma medida de prevenção utilizada é conectar uma das extremidades do lado secundário do transformador de distribuição ao terra. Deste modo, a média tensão presente no secundário terá um caminho alternativo para o terra e os riscos provenientes da falha serão minimizados após a devida ativação de um disjuntor que desligará a linha de alimentação no lado primário (KYORITSU, 2019).

Os sistemas de aterramento também são utilizados para (KYORITSU, 2019):

- Prevenir os perigos causados pelo contato acidental entre as tensões isoladas de alta e baixa tensão nas linhas de transmissão e transformadores do sistema de potência;
- Prevenir choques elétricos causados pela fuga no isolamento de equipamentos elétricos e eletrônicos;
- Prover um caminho elétrico seguro e de baixa impedância para a corrente impulsiva proveniente de descargas atmosféricas;

- Prevenir eletricidade estática nas superfícies dos ambientes e incêndios causados por descargas estáticas;
- Prover a equipotencialização de partes metálicas das instalações;
- Reduzir o nível de ruído presente no sistema elétrico;
- Prover potenciais elétricos estáveis para operação adequada de computadores;
- Fornecer um caminho de baixa impedância à corrente de falha para a devida atuação dos relês diferenciais residuais de fuga a terra que protegem o sistema, os equipamentos e os seres vivos.

2.2 ELETRODO DE ATERRAMENTO

Um eletrodo de aterramento se constitui de qualquer corpo metálico enterrado no solo e pode assumir uma configuração muito diversificada. Destacam-se as hastes verticais, usadas principalmente quando as camadas mais profundas do solo possuem menor resistividade e os eletrodos horizontais enterrados usualmente a 0,5 metros usados principalmente quando a maior preocupação é o controle de gradiente de potencial na superfície do solo (VISACRO FILHO, 2019).

Para se avaliar o comportamento elétrico de um eletrodo de aterramento, deve ser considerado que uma conexão à terra apresenta componentes resistivas R , condutivas G , capacitivas C e indutivas L . Para ilustrar a natureza da impedância de aterramento formada por estas quatro componentes, a Figura 2 apresenta uma representação simplificada de um aterramento por meio de seu circuito equivalente.



FONTE: Adaptado de Visacro Filho (2019)

Se uma porção limitada do eletrodo é considerada, pode-se observar na Figura 2 que a corrente que é injetada no eletrodo ($i_{injetada}$) é parcialmente dissipada para o solo através de sua componente transversal ($i_{transversal}$) e parcialmente transferida para o comprimento restante do eletrodo ($i_{longitudinal}$).

No que concerne a essa última parcela, a corrente longitudinal, são observadas perdas internas ao condutor e um campo magnético é estabelecido na região em volta dos caminhos de corrente, no interior e exterior do condutor. Em termos de um circuito equivalente, o cômputo das energias correspondentes pode ser feito por meio de uma resistência e uma indutância em série (VISACRO FILHO, 2019). A corrente longitudinal pode ser quantificada através a equação (1).

$$i_{longitudinal} = i_R - j \cdot i_L \quad (1)$$

Onde:

- $i_{longitudinal}$:= fluxo de corrente ao longo do eletrodo, em A;
- i_R := fluxo de corrente resistiva no eletrodo, em A;
- i_L := fluxo de corrente indutiva no eletrodo, em A.

Por outro lado, o campo elétrico no solo determina o fluxo de corrente condutiva i_G e capacitiva i_C no meio. A relação entre tais correntes depende da relação entre a condutividade e o produto da frequência angular e a permissividade. A energia associada ao fluxo dessas correntes transversais pode ser considerada por meio de um circuito formado por uma condutância e uma capacitância em paralelo (VISACRO FILHO, 2019). A corrente transversal pode ser obtida pela equação (2).

$$i_{transversal} = i_G + j \cdot i_C \quad (2)$$

Onde:

- $i_{transversal}$:= fluxo de corrente dissipada para o solo, em A;
- i_G := fluxo de corrente condutiva no meio, em A;
- i_C := fluxo de corrente capacitiva no meio, em A.

Além disso, devem ser computados os efeitos mútuos entre as diversas partes componentes dos eletrodos de aterramento.

Em muitas aplicações, não se refere à impedância de aterramento, mas à sua resistência. Isto se deve ao fato de que, nas condições dessas aplicações, os efeitos reativos são muito reduzidos. Essas condições são usuais para fenômenos lentos. O valor da resistência de aterramento pode ser então quantificado pela equação (3).

$$R = \frac{V}{I} \quad (3)$$

Onde:

- R := Resistência de aterramento, em Ω ;
- V := Potencial adquirido pelo aterramento referido ao infinito, em V;
- I := Corrente resultante, em A.

Pode ser demonstrado que a resistência de aterramento R_t é diretamente proporcional à resistividade do solo ρ em que os eletrodos estão instalados – equação (4).

$$R_t = k \cdot \rho \quad (4)$$

Onde:

- R_t := Resistência de aterramento dos eletrodos, em Ω ;
- k := Constante de proporcionalidade k expressa apenas os efeitos geométricos dos eletrodos;
- ρ := resistividade do solo, em $\Omega \cdot m$.

2.3 RESISTIVIDADE DO SOLO

A resistividade é uma propriedade física de cada substância, sendo medida e tabelada para diversos materiais. O sistema de aterramento tem uma relação direta com os parâmetros que influenciam a resistividade do solo.

A resistividade específica de um solo pode definir-se como sendo a resistência elétrica R , medida entre as faces opostas de um cubo de dimensões unitárias com aresta de 1 m e área das faces 1 m², preenchido com a terra do respectivo solo. Sua unidade é dada em “ $\Omega \cdot m$ ”.

O solo é um meio geralmente heterogêneo, de modo que o valor de sua resistividade varia em função do tipo, nível de umidade, profundidade das camadas, estrutura geológica, temperatura, granulometria, salinidade e outros fatores naturais, sendo também afetado por fatores externos como contaminação e compactação. Exemplos de variação da resistividade em função de alguns destes parâmetros são mostrados na Tabela 1 e na Figura 3 (ABNT NBR 7117-1, 2020).

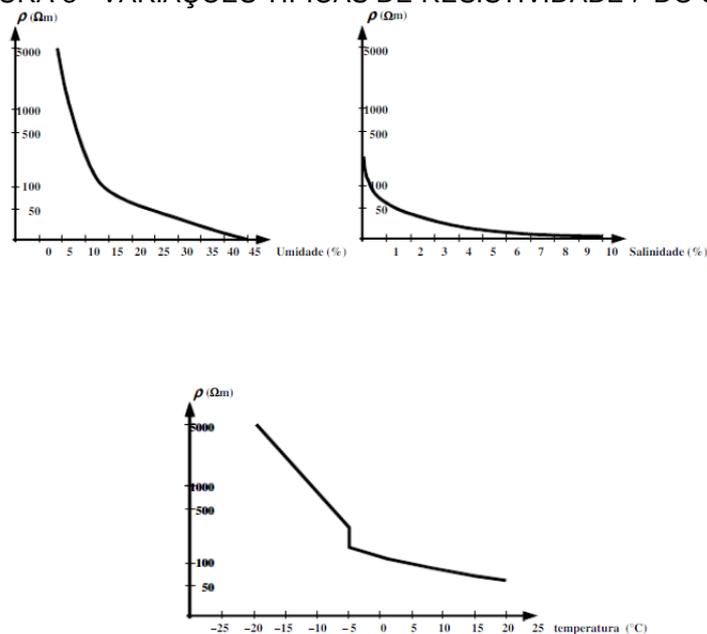
TABELA 1 - VALORES TÍPICOS DE RESISTIVIDADE DE ALGUNS TIPOS DE SOLO

Tipos de solo	Faixa de resistividades ($\Omega \cdot m$)
Água do mar	menor do que 10
Alagadiço, limo, humus, lama	até 150
Água destilada	300
Argila	300 – 5 000
Calcário	500 – 5 000
Areia	1 000 – 8 000
Granito	1 500 – 10 000
Basalto	a partir de 10 000
Concreto ^a	Molhado: 20 – 100 Úmido: 300 – 1 000 Seco: 3 k $\Omega \cdot m$ – 2 M $\Omega \cdot m$

^a A categoria molhado é típica de aplicação em ambientes externos. Valores inferiores a 50 $\Omega \cdot m$ são considerados corrosivos.

FONTE: ABNT NBR 7117-1, 2020.

FIGURA 3 - VARIAÇÕES TÍPICAS DE RESISTIVIDADE ρ DO SOLO



FONTE: ABNT NBR 7117-1, 2020.

2.3.1 Resistividade aparente do solo

Um solo com várias camadas apresenta resistividade diferente para cada tipo de sistema de aterramento. A passagem da corrente elétrica do sistema de aterramento para o solo depende da composição do solo com suas respectivas camadas e da geometria e do tamanho do sistema de aterramento.

A resistividade aparente é a resistividade vista pelo sistema de aterramento em integração com o solo, considerada a profundidade atingida pelo escoamento das correntes elétricas.

O cálculo da resistividade aparente ρ_a de um sistema de aterramento é efetuado considerando o nível de penetração da corrente de escoamento num solo de duas camadas, portanto um solo com muitas camadas deve ser reduzido a um solo equivalente com duas camadas conforme se vê na Figura 4 (KINDERMANN; CAMPAGNOLO,1995).

O procedimento de redução é feito a partir da superfície, considerando-se o paralelismo entre as duas camadas, usando a fórmula de Hummel (5) e (6), que transforma o solo em duas camadas equivalentes.

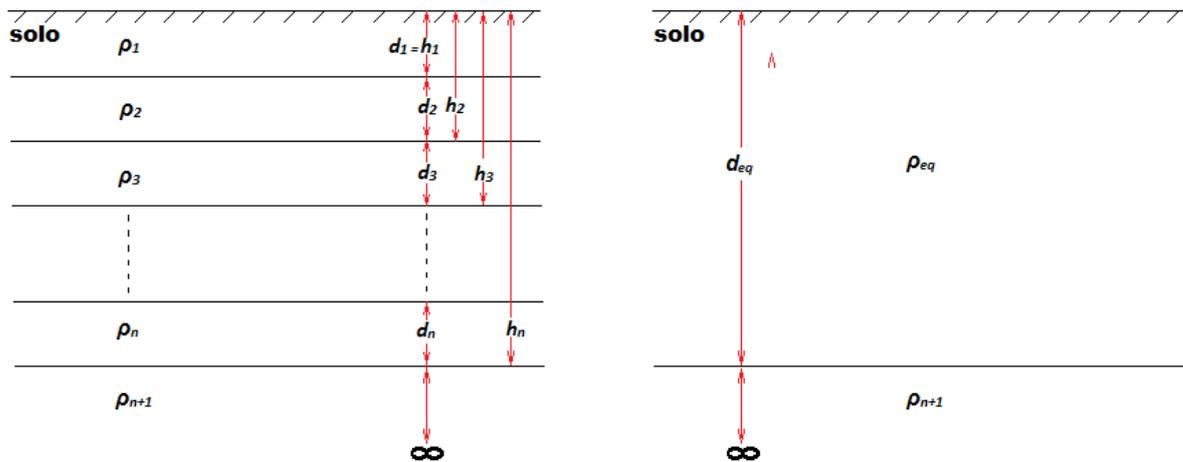
$$\rho_{eq} = \frac{d_1 + d_2 + d_3 + \dots + d_n}{\frac{d_1}{\rho_1} + \frac{d_2}{\rho_2} + \frac{d_3}{\rho_3} + \dots + \frac{d_n}{\rho_n}} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\rho_i}} \quad (5)$$

$$d_{eq} = d_1 + d_2 + d_3 + \dots + d_n = \sum_{i=1}^n d_i \quad (6)$$

Onde:

- d_i :=Espessura da i-ésima camada, em m
- ρ_i :=Resistividade da i-ésima camada, em $\Omega.m$
- n :=Número de camadas reduzidas

FIGURA 4 - SOLO EQUIVALENTE COM DUAS CAMADAS.



FONTE: Adaptado de Kindermann e Campagnolo (1995).

O coeficiente de penetração α indica o grau de penetração das correntes escoadas pelo aterramento no solo equivalente e é dado pela equação (7).

$$\alpha = \frac{r}{d_{eq}} \quad (7)$$

Onde:

- r : =Raio do anel equivalente do sistema de aterramento considerado.

Cada sistema de aterramento é transformado em um anel equivalente de Endrenyi cujo raio r é a metade da maior dimensão do aterramento (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995). Para um sistema genérico de aterramento com hastes espaçadas e não alinhadas considera-se que o valor de r é dado pela equação (8).

$$r = \frac{A}{D} \quad (8)$$

Onde:

- A : =área abrangida pelo aterramento
- D : =Maior dimensão do aterramento

Para um solo de duas camadas, o coeficiente de divergência β é definido pela relação entre a resistividade da última camada e a resistividade da primeira

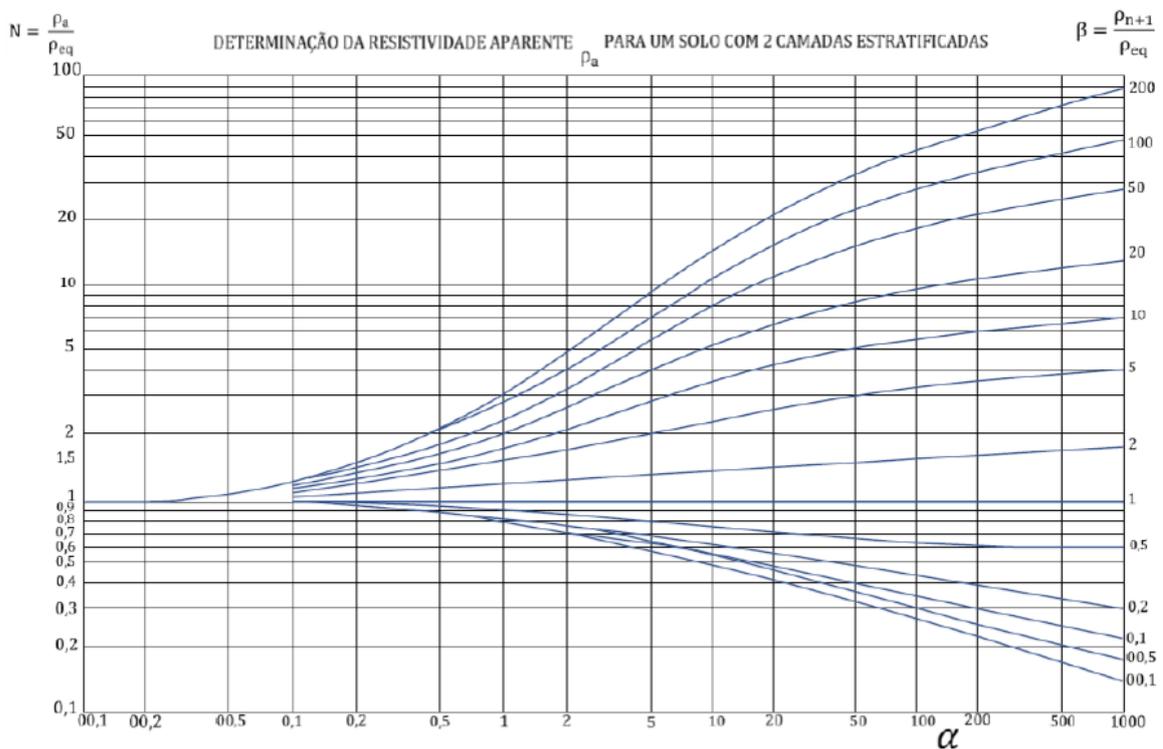
camada equivalente sendo similar ao coeficiente de reflexão entre as duas camadas e dado pela equação (9).

$$\beta = \frac{\rho_{n+1}}{\rho_{eq}} \quad (9)$$

Com α e β obtidos, pode-se determinar a resistividade aparente ρ_a do aterramento especificado em relação ao solo de duas camadas. Usando as curvas da FIGURA 5, desenvolvidas por Endrenyi, onde α é o eixo das abscissas e β é a curva correspondente, obtém-se o valor de N (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995).

$$\rho_a = N \cdot \rho_{eq} \quad (10)$$

FIGURA 5 – CURVAS DE ENDRENYI



FONTE: Adaptado de Kindermann e Campagnolo (1995).

2.3.2 Resistividade média do solo a uma dada profundidade

É o valor de resistividade resultante da avaliação das condições locais e do tratamento estatístico dos resultados de diversas medições de resistividade do solo para aquela profundidade, efetuada numa determinada área ou local, e que possa ser considerado como representativo das características elétricas do solo (ABNT NBR 7117-1, 2020).

2.3.3 Medição de resistividade do solo

Em geral, o solo é constituído por diversas camadas, cada uma apresentando um valor de resistividade e uma espessura própria.

O valor de resistividade do solo é determinado através de medições, cujos resultados recebem um tratamento matemático, de modo a se obter a estratificação do solo em camadas paralelas ou horizontais, de diferentes resistividades ρ e de espessuras e definidas, conforme Figura 6 (ABNT NBR 7117-1, 2020).

FIGURA 6 - SOLO ESTRATIFICADO



FONTE: ABNT NBR 7117-1, 2020.

Onde:

- ρ_1, e_1 := Resistividade e espessura da camada de número 1
- ρ_2, e_2 := Resistividade e espessura da camada de número 2
- ρ_3, e_3 := Resistividade e espessura da camada de número 3
- ρ_4, e_4 := Resistividade e espessura da camada de número 4

Assim sendo, foram desenvolvidos métodos de prospecção geolétrica que se caracterizam pela facilidade operacional e pela precisão fornecidas. A complexidade adicional causada pelos solos não uniformes é comum, e apenas em

poucos casos a resistividade é constante com o aumento da profundidade, ou seja, homogênea.

Basicamente, os métodos que utilizam sondagem elétrica procuram determinar a distribuição vertical de resistividade, abaixo do ponto em estudo, resultando então em camadas horizontais, geralmente causadas por processos sedimentares (ABNT NBR 7117-1, 2020).

Segundo a norma NBR 7117-1, cerca de metade da corrente injetada no solo, circula acima de uma profundidade igual à metade da distância entre eletrodos, e grande parte da corrente flui acima da profundidade igual à separação entre eles. Para estas conclusões pressupõe-se a condição de solos homogêneos, não sendo as mesmas válidas para solos estratificados, nos quais a densidade de corrente varia de acordo com a distribuição de resistividades (ABNT NBR 7117-1, 2020).

Os gradientes de potencial da superfície do solo, dentro ou adjacentes a um eletrodo, são principalmente uma função da resistividade da camada superficial do solo. Em contraste, a resistência do eletrodo de terra é primariamente uma função de suas dimensões e das resistividades das camadas mais profundas do solo, especialmente se o eletrodo for de grandes dimensões (ABNT NBR 7117-1, 2020).

Dispondo-se de dois eletrodos de corrente pelos quais se faz circular uma corrente I , e de dois eletrodos de potencial que detectarão uma diferença de potencial V , pode-se mostrar que a resistividade do solo é proporcional a V/I , sendo o fator de proporcionalidade uma função do método empregado (ABNT NBR 7117-1, 2020).

Os métodos usualmente adotados para a medição da resistividade são:

- Amostragem física do solo;
- Método da variação de profundidade;
- Método dos dois eletrodos;
- Método dos quatro eletrodos com os arranjos:
 - Do eletrodo central
 - De Lee
 - De Wenner
 - De Schlumberger – Palmer

2.3.4 Resistência de aterramento

Designa-se por resistência de aterramento, a resistência oferecida pelo eletrodo à passagem de corrente elétrica para o solo, e é dada, de uma forma geral, pela razão entre a tensão no eletrodo V e a corrente I injetada no solo através do mesmo. Esta resistência oferecida pelo eletrodo à passagem da corrente divide-se em três componentes principais:

- Resistência própria do eletrodo e das ligações elétricas ao mesmo;
- Resistência de contato entre o eletrodo e a terra adjacente ao mesmo;
- Resistência de terra da vizinhança do eletrodo.

A primeira componente pode ser desprezada em função da alta condutividade dos metais empregados nos aterramentos. A resistência de contato também pode ser considerada desprezada se o eletrodo estiver isento de qualquer cobertura isolante e se a terra ao seu redor estiver bem compactada em torno da sua superfície.

Portanto a componente fundamental que efetivamente determina o valor da resistência de aterramento é resistência de terra circunvizinha que depende basicamente da resistividade e da forma e dimensão do eletrodo (VISACRO FILHO, 2019).

2.4 MODELAGEM MATEMÁTICA DE SISTEMAS DE ATERRAMENTO

Diversas modelagens matemáticas têm sido propostas na literatura para analisar e simular sistemas de aterramento. No entanto, em sua maioria, podem ser classificados como:

- Modelo de teoria de circuitos elétricos;
- Modelo de linha de transmissão;
- Modelo de teoria de campos eletromagnéticos;
- Modelo híbrido: uma composição das teorias de circuitos e eletromagnética.

Esta dissertação faz uso de parâmetros concentrados para a representação dos eletrodos horizontais encontrados no parque eólico do estudo de caso, utilizando

a teoria de circuitos elétricos para a análise do problema de estudo. A modelagem matemática adotada será abordada nos Capítulos 3 e 5 deste documento.

2.5 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO

A norma ABNT NBR 15749, denominada Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento estabelece os critérios e métodos de medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo, bem como define as características gerais dos equipamentos que podem ser utilizados nas medições (ABNT NBR 15749, 2009).

A norma apresenta os seguintes métodos de medição de resistência de aterramento:

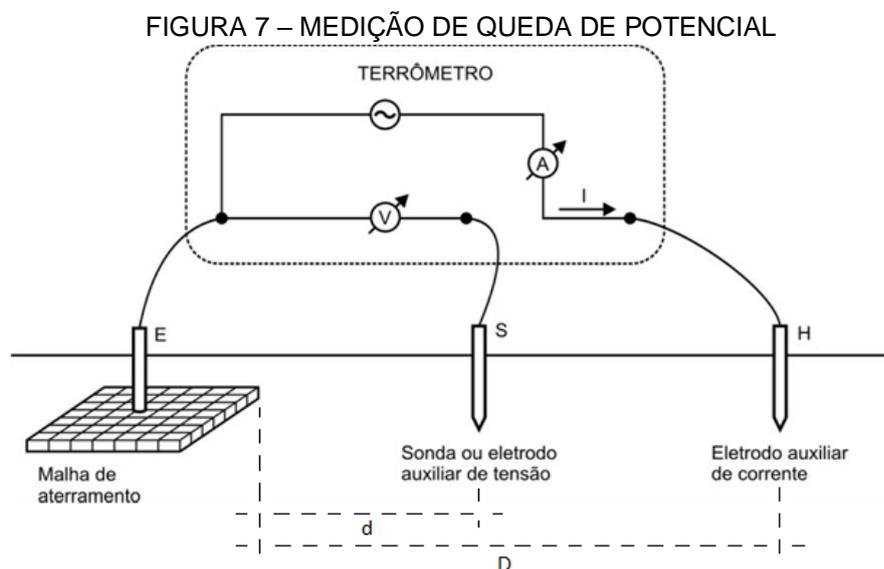
- Método da queda de potencial;
- Método da queda de potencial com injeção de alta corrente;
- Método síncrono à frequência industrial;
- Método do batimento;
- Método de medição com injeção de corrente com amperímetro, voltímetro e inserção de wattímetro adicional;
- Métodos alternativos de medição com as instalações energizadas.
 - Método da queda de potencial com baixas correntes e onda quadrada;
 - Método da injeção de baixa corrente em alta frequência;
 - Método de medição simultânea de correntes do sistema.

A ABNT NBR 15749 trata ainda dos seguintes assuntos decorrentes das normatizações como compensação capacitiva, especificação de equipamentos para execução dos ensaios e informações sobre o alicate terrômetro (ABNT NBR 15749, 2009).

Neste capítulo são apresentados os dois métodos mais utilizados para a medição das resistências de aterramento em parques eólicos de energia, como também o método do alicate terrômetro que é objeto de estudo da dissertação.

2.5.1 Método da queda de potencial (MQP).

O método da queda de potencial é apresentado nas normas NBR 15749 e IEEE 81 e realiza a medição da resistência de aterramento através de um instrumento chamado terrômetro. Consiste basicamente em fazer circular uma corrente alternada através do aterramento sob ensaio por intermédio de um eletrodo auxiliar de corrente H, e medir a tensão entre a malha de aterramento E, e o terra remoto de referência por meio de um eletrodo auxiliar de potencial S conforme indicado na Figura 7 (ABNT NBR 15749, 2009; IEEE 81, 2012).



FONTE: Adaptado de ABNT NBR 15749:2009, 2009

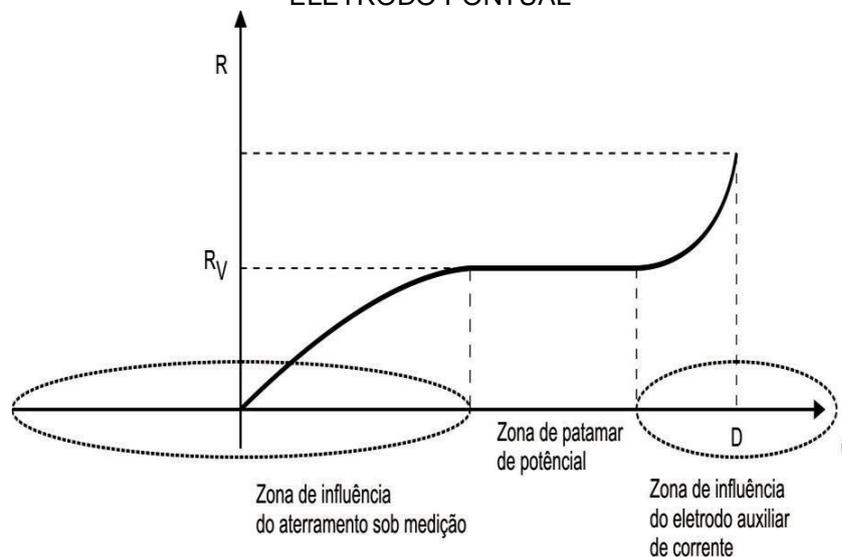
A razão pela qual uma corrente alternada é usada para medições de resistência de terra é porque uma corrente contínua causaria uma reação química, semelhante à eletrólise da água onde bolhas de hidrogênio e oxigênio surgiriam ao redor dos eletrodos diante da presença de umidade no solo, bloqueando gradualmente o fluxo de corrente contínua. As frequências da corrente de ensaio utilizadas pelos terrômetros são diferentes das frequências industriais (16, 50, 60 e 400Hz) afim de se evitar interferências nas medições ocasionadas pelas componentes harmônicas e pelo ruído circulante no sistema de aterramento. Os medidores de aterramento modernos possuem filtros especiais de hardware e software visando a mitigação dos efeitos do ruído nas medições, realizando a seleção automática da frequência da corrente de teste (KYORITSU, 2019).

Conforme a Figura 7, a metodologia utiliza uma fonte de corrente conectada entre a malha de aterramento sob ensaio e o eletrodo auxiliar H localizado a uma distância D de 5 a 10 vezes a maior diagonal do sistema de aterramento. O uso desse distanciamento garante uma região do solo com potencial inalterado, suficientemente distante do aterramento sob ensaio e do eletrodo auxiliar de corrente (ABNT NBR 15749:2009, 2009).

Já o eletrodo de potencial S é cravado ao solo em intervalos regulares de medição iguais a 5% da distância D ao longo da reta imaginária que interliga a malha de aterramento ao eletrodo de corrente auxiliar. Conhecido o valor de corrente injetada I e o potencial registrado entre o eletrodo de potencial e a malha de aterramento V , calcula-se a resistência R para cada posição do eletrodo auxiliar de potencial através a fórmula (3) (ABNT NBR 15749:2009, 2009).

Fazendo-se a leitura do valor da resistência em cada posição, obtém-se a curva de resistência de aterramento em função da distância d conforme indicado na Figura 8.

FIGURA 8 - CURVA CARACTERÍSTICA TEÓRICA DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO DE UM ELETRODO PONTUAL



FONTE: ABNT NBR 15749:2009, 2009

Realizado o levantamento da curva característica da resistência do aterramento, tem-se que seu trecho horizontal (patamar de potencial) representa o valor da resistência de aterramento R_v do sistema sob ensaio. Teoricamente, para um solo homogêneo e um sistema de aterramento com dimensões inferiores a 10 metros, o valor verdadeiro da resistência do sistema de aterramento pode ser obtido

a uma distância d de 62% do valor de D , a partir da periferia do sistema sob ensaio (MODENA; SUETA, 2011).

2.5.2 Método de injeção de baixa corrente em alta frequência

Este método é apresentado em caráter informativo na norma NBR 15749, e é uma variação do MQP, no qual o instrumento utilizado injeta correntes de ensaio em alta frequência de modo que a malha de aterramento sob ensaio seja desacoplada das demais componentes do sistema de aterramento.

O instrumento a utilizar neste método opera numa frequência tal que a impedância indutiva dos cabos pára-raios de uma ou mais linhas de transmissão acopladas à subestação seja razoavelmente alta a ponto de se reduzir o efeito dos aterramentos adjacentes ao que se está medindo (NBR-15749, 2009).

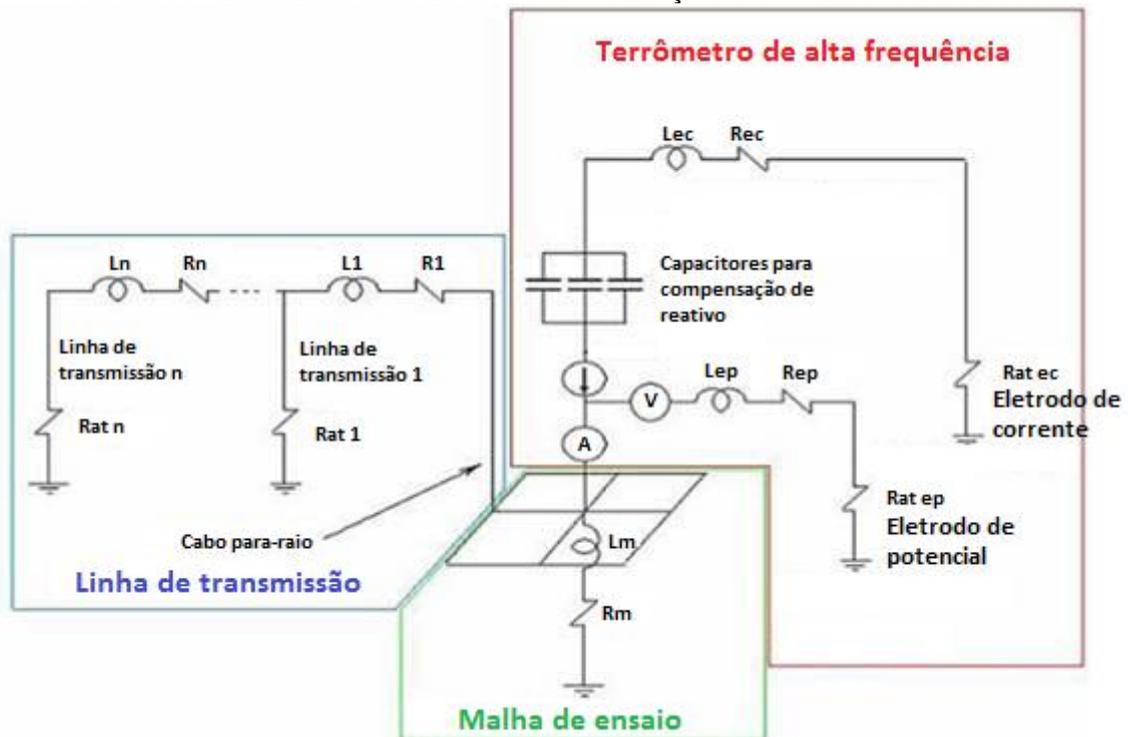
Desta forma, a resistência e a reatância dos cabos pára-raios tendem ao infinito, ou seja, sua influência passa a ser minimizada na medição em alta frequência, sem a necessidade de seu desacoplamento físico, com conseqüente ganho na operacionalidade. Assim sendo, a corrente em alta frequência tenderá a circular na sua totalidade pelo circuito formado pela malha de terra e o eletrodo auxiliar de corrente, elevando os potenciais de superfície junto à malha de terra e ao eletrodo auxiliar.

Ao se deslocar o eletrodo auxiliar de potencial numa região livre das influências tanto da malha de aterramento sob ensaio quanto do eletrodo auxiliar de corrente (patamar da curva), obtém-se o valor procurado para a resistência da malha.

Este método se aplica em sistemas energizados e em locais com poucas e pequenas áreas disponíveis para colocação dos eletrodos de corrente e de potencial, tais como áreas em regiões semi-urbanas ou rurais.

Os parâmetros que compõem a medição de alta frequência são os mostrados no diagrama da Figura 9.

FIGURA 9 - ESQUEMA SIMPLIFICADO DA MEDIÇÃO COM ALTA FREQUÊNCIA



FONTE: Adaptado de ABNT NBR 15749:2009, 2009

Na Figura 9 é possível identificar os parâmetros envolvidos na medição, onde:

- $L_1...L_n$:= parte indutiva da impedância do circuito formada pelas torres (cabos pára-raios das linhas de transmissão);
- $R_1...R_n$:= parte da resistência do circuito (cabos pára-raios das linhas de transmissão);
- $Rat_1...Rat_n$:= resistências dos aterramentos de cada torre das linhas de transmissão;
- L_m := parte indutiva da impedância da malha de aterramento sob ensaio;
- R_m := parte resistiva da impedância da malha de aterramento sob ensaio;
- L_{Ec} := parte indutiva da impedância do eletrodo de corrente;
- R_{Ec} := parte resistiva da impedância do eletrodo de corrente;
- Rat_{Ec} := resistência de aterramento do eletrodo de corrente;
- L_{Ep} := parte indutiva da impedância do eletrodo de potencial;
- R_{Ep} := parte resistiva da impedância do eletrodo de potencial;
- Rat_{Ep} := resistência de aterramento do eletrodo de potencial;
- C_1, C_2, C_3 := banco de capacitores que pode ser utilizado para compensar a parte reativa do circuito.

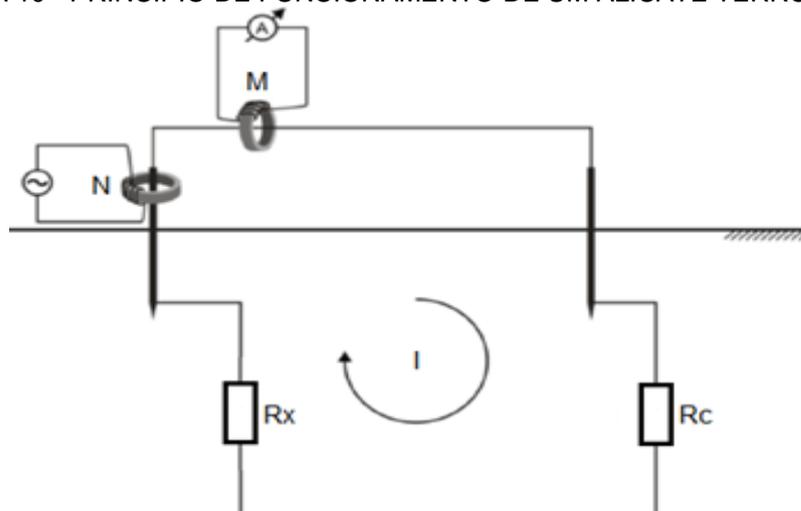
2.5.3 Método do alicate terrômetro

O método do alicate terrômetro, base para o estudo realizado neste trabalho, é apresentado nas normas ABNT NBR 15749 e IEEE 81, e utiliza este instrumento para efetuar a medição da resistência de aterramento em sistemas multiterrados (IEEE 81, 2012), (ABNT NBR 15749, 2009).

Este terrômetro é construído na forma de um alicate que possui dois transformadores toroidais bi-partidos com dimensões suficientes para envolver os condutores do sistema de aterramento sob ensaio.

O princípio de funcionamento deste tipo de medidor consiste em um gerador de corrente alternada, que aplica uma tensão no enrolamento primário de um transformador “N”, cujo núcleo ferromagnético envolve um condutor de um laço de medição como o indicado na Figura 10, o qual representa a única espira do seu enrolamento secundário. A tensão aplicada no primário do transformador “N” produzirá nos terminais de seu enrolamento secundário uma tensão alternada conhecida “V”. Caso o laço de medição estiver fechado, uma corrente “I” circulará pelo então circuito de medição. Por meio de um transformador “M”, pode-se medir esta corrente (ABNT NBR 15749, 2009).

FIGURA 10 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE UM ALICATE TERRÔMETRO.



FONTE: Adaptado da norma ABNT NBR 15749 (2009).

O instrumento então calcula a relação entre o valor eficaz da tensão V_{rms} gerada em uma espira do transformador “N” e a corrente eficaz I_{rms} que flui pelo

circuito de medição, estimando, desta forma, o valor da resistência de aterramento do laço fechado do circuito de medição R_{med} , conforme a equação (11) (FORTIVE INDUSTRIAL INSTRUMENTATION TECHNOLOGIES R&D CO., LTD, 2018).

$$R_{med} = \frac{V_{rms}}{I_{rms}} \quad (11)$$

Onde:

- R_{med} := Resistência de aterramento auferida pelo instrumento, em Ω .
- V_{rms} := Tensão eficaz gerada no circuito de medição pelo alicate terrômetro, em V.
- I_{rms} := Corrente eficaz auferida pelo alicate terrômetro, em A

A resistência R_{med} auferida pelo alicate terrômetro será a soma da resistência de aterramento R_x do eletrodo de interesse com a resistência de aterramento R_c do eletrodo paralelo ao de interesse, conforme equação (12).

$$R_{med} = R_x + R_c \quad (12)$$

Onde:

- R_x := Resistência de aterramento do eletrodo de interesse, em Ω
- R_c := Resistência de aterramento do eletrodo em paralelo ao de interesse, em Ω

A norma NBR 15749 preconiza: “Quando R_c representar um conjunto de eletrodos em paralelo (condição característica de sistemas multiaterrados) pode-se considerar R_x muito maior que R_c . Nesta condição, o instrumento indicará o valor da resistência de aterramento R_x procurada” (ABNT NBR 15749, 2009).

A Figura 11 representa um sistema multiaterrado e seu circuito elétrico correspondente. Neste circuito o conjunto de eletrodos $R_1... R_n$ está substituindo o eletrodo R_c da Figura 10, e a resistência de aterramento R_{med} auferida pelo alicate terrômetro é calculada pela equação (13) (ABNT NBR 15749, 2009):

$$R_{med} = R_x + \frac{1}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k}} \quad (13)$$

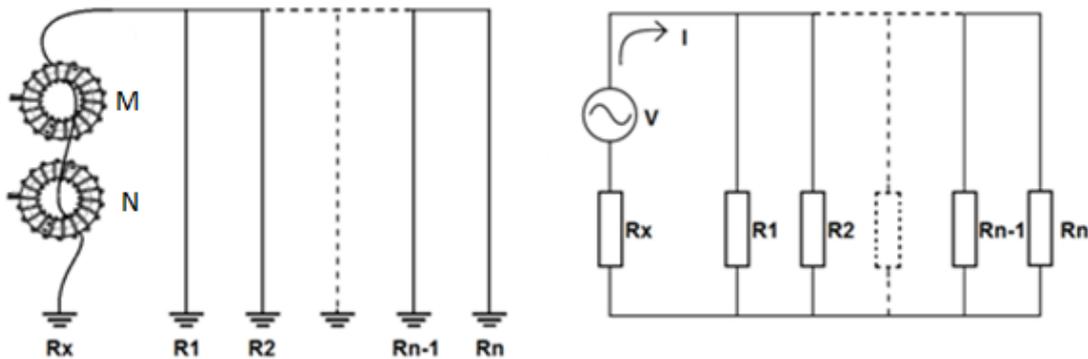
Na condição de:

$$R_x \gg R_x + \frac{1}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k}} \quad (14)$$

Pode se admitir que:

$$R_{med} = R_x \quad (15)$$

FIGURA 11 - SISTEMA MULTIATERRADO E SEU CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE



FONTE: Adaptado da norma ABNT NBR 15749 (2009).

Segundo a norma IEEE 81 este método pode ser aplicado em linhas de transmissão desde que consideradas suas limitações (IEEE 81, 2012):

- O eletrodo sob medição deve estar conectado a um sistema de aterramento com baixa impedância equivalente;
- Deve ser considerado que no valor da resistência medido está somado com o valor da reatância do sistema na frequência de operação do instrumento, que é da ordem de 1 kHz a 3,5 kHz nos alicates terrômetros comerciais, ou então considerar o valor medido com a impedância do eletrodo na frequência de operação específica do instrumento;
- Conexões fracas ou corroídas podem aumentar a valor da resistência medida, resultando em erro de medição;

De acordo com o Guia Resistência de aterramento, princípios, métodos de teste e aplicações da fabricante Fluke (2017), a principal vantagem do método do alicate terrômetro é a rapidez e facilidade da medição, pois não é necessária a utilização de sensores adicionais e nenhum condutor de aterramento precisa ser desconectado do sistema para realização do teste (FLUKE CORPORATION, 2017).

O documento MEGGER (2020), que descreve e analisa os vários métodos atualmente utilizados na medição da resistência de aterramento, cita um exemplo de otimização do tempo no processo de medição da resistência de aterramento de uma grande área industrial onde seriam necessárias centenas de pontos de teste para a realização do método de queda de potencial, despendendo-se várias horas para sua consecução. Através do uso do método do alicate terrômetro este mesmo teste levaria apenas algumas horas para ser executado. O documento cita o caso de subestações e torres de antena de telefonia celular onde a desconexão de condutores de aterramento não é possível, sendo necessária a utilização de outros métodos de medição alternativos como o do alicate terrômetro.

Entretanto de acordo com Csanyi (2017) determinadas considerações devem ser observadas para a utilização deste método na avaliação do aterramento de instalações elétricas (CSANYI, 2017).

2.6 NORMATIZAÇÃO

Para garantir a confiabilidade de operação das instalações elétricas e a manutenção de suas condições de segurança é determinante que seus sistemas de aterramento sejam inspecionados periodicamente em atendimento às recomendações das normas NR-10 e ABNT NBR-5419-3. A norma NR-10, subitem 10.2.4, estabelece que a documentação desta inspeção, deve ser parte integrante do prontuário de uma instalação elétrica (NR-10, 2004). A norma ABNT NBR 5419-3, em seu item 7, apresenta recomendações quanto ao conteúdo, periodicidade e documentação da inspeção. Em relação ao conteúdo, a norma sugere a avaliação da resistência ôhmica do sistema de aterramento (ABNT NBR 5419-3, 2015).

A norma IEC-61400-24 recomenda a adoção de um valor de resistência de aterramento ou dispersão inferior a $10,0 \Omega$ para instalações em geral, não existindo na literatura técnica um valor de referência para a impedância impulsiva do aterramento de uma instalação (COSTANZO et al., 2013).

Segundo Sana (2020), valores de resistência da ordem de $2,0 \Omega$ são facilmente encontrados quando a malha do aerogerador está interconectada com o sistema de aterramento da planta de energia eólica através do cabo contrapeso.

A norma brasileira que estabelece os critérios e métodos de medição de resistência de sistemas de aterramento e de potenciais na superfície do solo, bem como define as características gerais dos equipamentos que podem ser utilizados nas medições é a ABNT NBR 15749, denominada medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento, publicada em agosto de 2009 (ABNT NBR 15749, 2009). Já a norma ABNT NBR-7117 estabelece os requisitos para a medição da resistividade e determinação da estratificação do solo (ABNT NBR 7117-1, 2020).

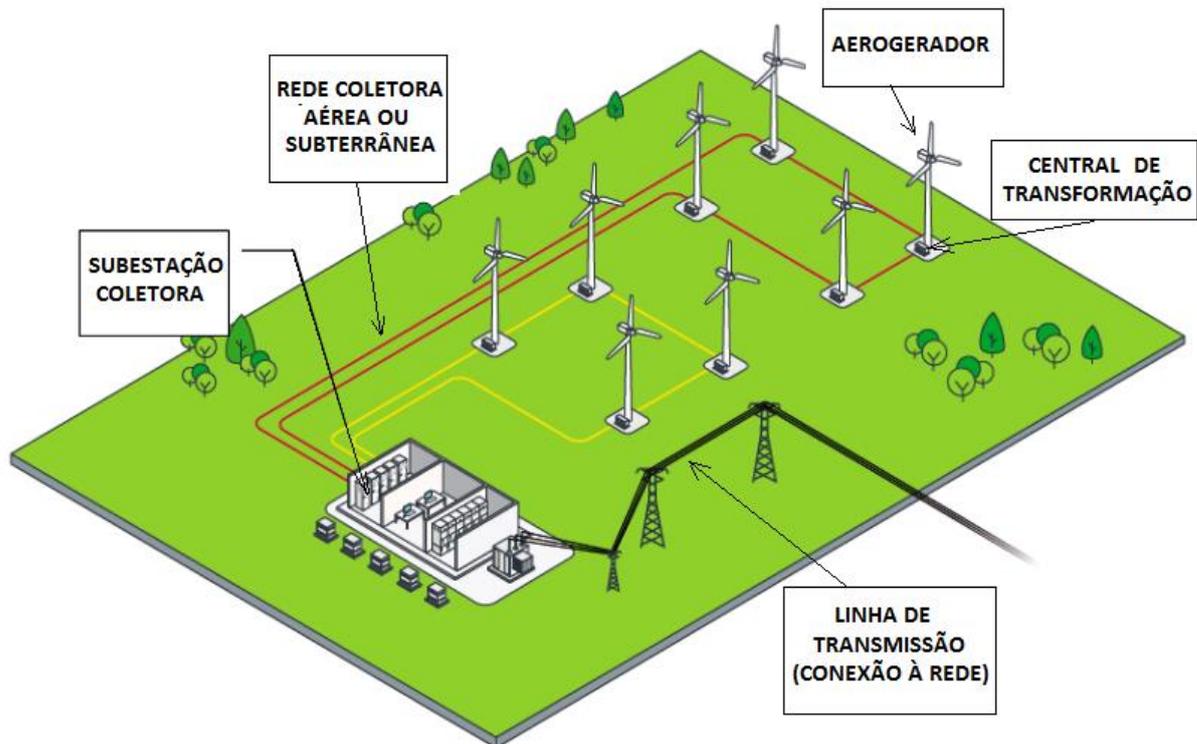
Técnicas e métodos para medição das características elétricas dos sistemas de aterramento são também apresentados pela norma americana IEEE-81 (IEEE 81, 2012). Os tópicos abordados incluem considerações de segurança, medição de resistividade, medição da impedância do sistema de aterramento, medição do transiente ou da impedância de surto do sistema de aterramento, medição das tensões de passo e toque, verificação da integridade do sistema de aterramento, revisão dos métodos de medição de resistência de aterramento mais utilizados e das características e limitações das instrumentações, revisando ainda vários fatores que podem distorcer as medições.

2.7 PARQUES EÓLICOS DE ENERGIA

2.7.1 Definição de parque eólico de energia

Segundo Goree (2019), uma usina eólica ou parque eólico de energia é um grupo de aerogeradores interconectados que possuem um ou mais pontos de conexão com a rede elétrica de energia. Esta definição significa simplesmente que cada usina eólica é composta por vários aerogeradores individuais. Essas estações geradoras coletam em conjunto a energia eólica e a convertem em energia elétrica que é então transmitida para a rede elétrica de energia através de uma subestação coletora. Os equipamentos e subsistemas envolvidos neste processo são os aerogeradores, as centrais de transformação, a rede coletora, a subestação coletora e a linha de transmissão de energia conforme se podem observar no desenho esquemático da Figura 12.

FIGURA 12 – VISÃO GERAL DE UM PARQUE EÓLICO DE ENERGIA (USINA EÓLICA)



FONTE: Adaptado de CTGÁS-ER (2012).

2.7.2 Parques eólicos *onshore* e *offshore*

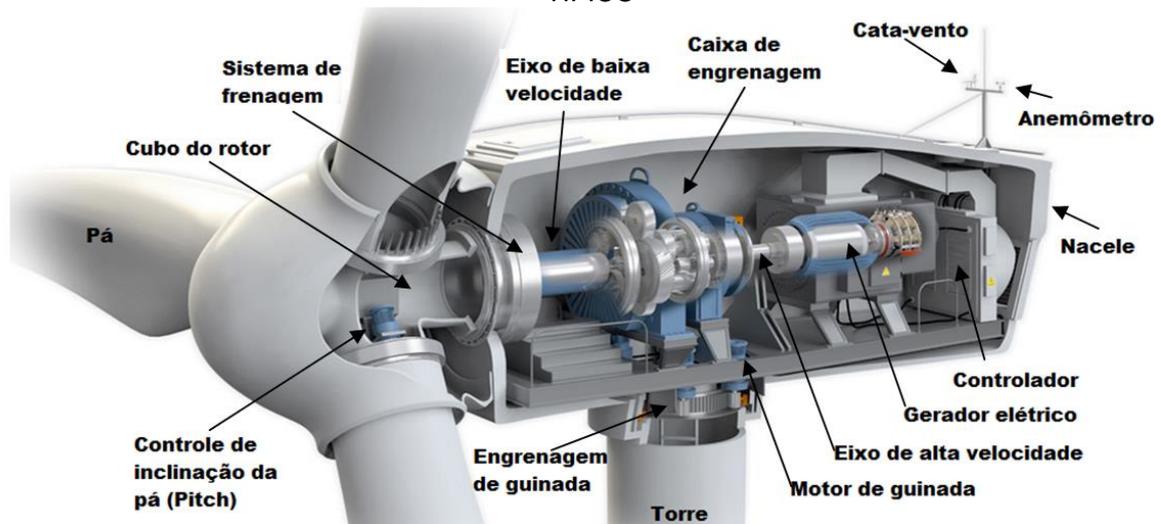
A energia eólica *offshore* consiste em construir parques eólicos ao longo da costa marítima. É uma tecnologia que possibilita aumentar a potência instalada de energia eólica e ainda proporciona algumas vantagens face aos parques eólicos *onshore* (terrestres) no quesito quantidade e qualidade do vento devido à inexistência de obstáculos no mar e a menor rugosidade da superfície marítima.

Os sistemas de aterramento dos parques *onshore* e *offshore* são muito diferentes. O presente trabalho tem sua área de aplicação apenas em parques eólicos *onshore* (terrestres).

2.7.3 Aerogerador

As turbinas eólicas ou aerogeradores são máquinas que aproveitam a energia do vento e a usam para gerar energia elétrica. A ação do vento movimenta suas pás, que giram um rotor que através de seu eixo transmite esta rotação ao gerador que converte essa energia mecânica em energia elétrica. A Figura 13 fornece uma visão detalhada do interior de uma turbina eólica e de seus componentes.

FIGURA 13 - VISTA INTERNA DOS DIFERENTES COMPONENTES DE UM AEROGERADOR TÍPICO



FONTE: Adaptado de TURBOSQUID (2021)

De acordo com o Escritório de Tecnologias de Energia Eólica do Governo Norte Americano (2021), as principais partes componentes de uma turbina eólica são (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2021):

- i) **Anemômetro**: Mede a velocidade do vento e transmite os dados da velocidade do vento para o controlador;
- ii) **Pás**: Levanta e gira quando o vento sopra sobre eles, fazendo com que o rotor gire. A maioria das turbinas tem duas ou três lâminas ou pás;
- iii) **Sistema de frenagem**: Freia mecanicamente, eletricamente ou hidraulicamente o rotor, em situações de emergência;
- iv) **Controlador**: Inicia a máquina com velocidades de vento de 13 a 26 km/h e desliga a máquina à de cerca 88 km/h. As turbinas não operam em velocidades de vento acima de 88 km/h, pois podem ser danificadas. O sistema de controle também monitora as principais grandezas mecânicas e elétricas da máquina. Nele encontram-se instaladas as proteções individuais para cada aerogerador como, por exemplo, um sistema de pára-raios, protetores contra sobre-corrente e curto-circuito, protetores contra sub e sobre-tensão e finalmente, proteção contra sobre e sub-frequência. Sob o comando do sistema de controle também se encontram os

capacitores para compensação de energia reativa ou o sistema de conversão de potência, quando existentes;

- v) Caixa de engrenagem: Conecta o eixo de baixa velocidade ao eixo de alta velocidade e aumenta as velocidades de rotação de cerca de 30 a 60 rpm para cerca de 1.000 a 1.800 rpm. Esta é a velocidade de rotação exigida pela maioria dos geradores para produzir eletricidade;
- vi) Gerador: A energia mecânica fornecida pela etapa de transmissão mecânica é convertida em energia elétrica pelo gerador elétrico, o qual pode ser de indução (tipo gaiola ou de rotor bobinado) ou do tipo síncrono. Para máquinas com potência em torno de 1 MW ou menor, a tensão trifásica fornecida pelo gerador situa-se entre 400 e 690 V. Já para máquinas com potências superiores, a tensão de geração é da ordem dos 2400 V. Em todos os casos, um transformador elevador compatibiliza os níveis de tensão da geração do aerogerador com o nível de tensão da rede de distribuição, a qual normalmente opera entre 13,8 e 34,5 kV.
- vii) Eixo de alta velocidade: Aciona o gerador. Eixo de baixa velocidade: Gira o eixo de baixa velocidade à cerca de 30 a 60 rpm.
- viii) Nacelle: Situa-se no topo da torre e contém a caixa de engrenagens, eixos de baixa e alta velocidade, gerador, controlador e sistema de freio.
- ix) Controle de inclinação das pás (Pitch): Vira ou inclina as pás contra o vento para controlar a velocidade do rotor e para evitar que o rotor gire em ventos muito altos ou muito baixos para a produção de eletricidade.
- x) Rotor: Formado pelas pás e o cubo do rotor
- xi) Torre: Feito de aço tubular, concreto ou estrutura de aço. Suporta a estrutura da turbina. Como a velocidade do vento aumenta com a altura, as torres mais altas permitem que as turbinas capturem mais energia e gerem mais eletricidade.
- xii) Cata-vento: Mede a direção do vento e se comunica com o mecanismo de guinada para orientar a turbina adequadamente em relação ao vento.
- xiii) Engrenagem de guinada: Orienta as turbinas contra o vento para mantê-las de frente para o vento quando a direção muda. As turbinas a favor do vento não requerem um mecanismo de guinada porque o próprio vento já realiza esta função.
- xiv) Motor de guinada: Potencializa o impulso de guinada.

2.7.4 Centrais de transformação

As centrais de transformação, também conhecidas como subestações unitárias, são compostas basicamente por transformadores elevadores associados a um dispositivo de manobra e proteção, sendo este conjunto responsável pela elevação do nível da tensão de geração fornecida pelos aerogeradores (400 a 12000 V) para o nível de tensão de distribuição (12 a 34,5kV). O método construtivo e os equipamentos de manobra e proteção utilizados nas centrais de transformação podem variar, conforme concepção adotada durante o desenvolvimento do projeto básico.

Dos diferentes tipos construtivos, algumas centrais de transformação são instaladas dentro das torres ou naceles, sendo nestes casos, fornecida conjuntamente com os aerogeradores dentro do contrato de aquisição das turbinas.

As centrais de transformação para os aerogeradores mais antigos ou que possuem torres de menor diâmetro são instaladas fora da área interna do aerogerador.

Os equipamentos de proteção e manobra utilizados nas centrais de transformação variam conforme aplicação e a confiabilidade operativa.

2.7.5 Rede coletora

Dá-se o nome de rede coletora à rede de distribuição utilizada para interligação dos aerogeradores de um determinado parque eólico com a subestação coletora.

As redes coletoras podem ser implementadas de diferentes formas e em diferentes topologias. Das topologias possíveis, a radial simples é a mais utilizada nas centrais eólicas construídas no Brasil. Ela é composta por um único alimentador desde o ponto de origem no agrupamento do primeiro aerogerador, até sua conexão com o barramento da subestação coletora. Por ser a topologia mais simples, também é aquela que apresenta menor custo e rapidez de implantação. Este tipo de topologia consegue isolar as faltas ocorridas em trechos intermediários da rede coletora com perda parcial de geração. Já na ocorrência de uma falta no trecho mais próximo do barramento da subestação coletora, ocorrerá perda total da geração conectada neste circuito (SECCO, 2015)

Já a topologia em anel permite a passagem da energia gerada por dois caminhos distintos entre o ponto de origem e sua conexão final no barramento da

subestação coletora, possuindo maior confiabilidade que a radial simples. Devido ao custo adicional com condutores e implantação, as configurações em anel possuem baixo índice de utilização no Brasil, porém são comumente encontradas em parques eólicos instalados em outros países (SECCO, 2015).

As topologias descritas anteriormente podem ser implementadas de forma subterrânea ou aérea.

2.7.5.1 Rede coletora subterrânea

É uma rede de distribuição interna utilizada em sistemas de geração de energia, incluindo eólica, que utilizam cabos com isolamento especial para instalações subterrâneas ou em dutos prioritariamente alocados ao longo das vias de acesso interno das centrais eólicas (SECCO, 2015). Um arranjo típico de rede coletora subterrânea de um parque eólico pode ser visualizado na Figura 14.

FIGURA 14 - ARRANJO TÍPICO DE UMA REDE SUBTERRÂNEA DE COLETA

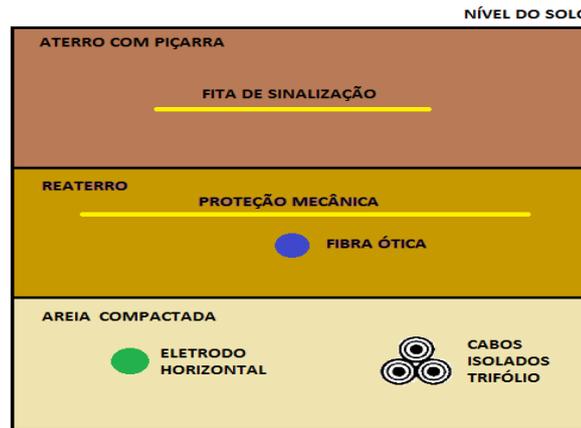


FONTE: Goree, 2020.

Estes condutores são dispostos em trifólio, acompanhados dos condutores de aterramento e fibra-óptica e depois cobertos com areia ou terra compactada conforme desenho esquemático da Figura 15.

Sinalizações de policloreto de vinila (PVC) ou de concreto são utilizados para identificar o trajeto da rede, advertindo contra a escavação próxima aos condutores energizados (SECCO, 2015).

FIGURA 15 - DESENHO ESQUEMÁTICO DE UMA REDE SUBTERRÂNEA



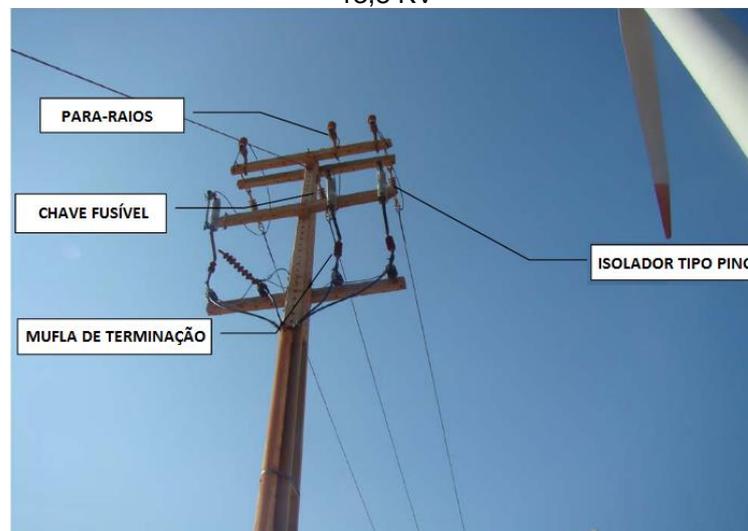
FONTE: Adaptado de Secco (2015)

As redes subterrâneas possuem maior proteção contra eventos externos e por isso apresentam menores índices de falha quando comparada com as redes aéreas, no entanto possui maior custo de implementação.

2.7.5.2 Rede coletora aérea

Rede de distribuição interna, utilizada em sistemas de geração de energia, que é composta por cabos de força, aterramento e comunicação fixados através de isoladores instalados em cruzetas ou vergalhões e sustentados por ferragens fixadas em postes de concreto, da mesma forma e padrão utilizado pelas concessionárias de distribuição de energia na construção de seus ramais de distribuição (Figura 16).

FIGURA 16 - EXEMPLO DE ESTRUTURA AÉREA UTILIZADA EM REDES COLETORAS AÉREAS 13,8 KV



FONTE: Adaptado de CTGÁS-ER (2012).

Quando comparada com a rede subterrânea, pode-se observar que as redes aéreas possuem maior vulnerabilidade a eventos externos. É a solução mais econômica e a de mais rápida implantação, sendo utilizada principalmente nos parques construídos em regiões mais afastadas do mar (SECCO, 2015).

2.7.6 Subestação Coletora

Com usinas eólicas instaladas em áreas remotas, toda a energia coletada deve ser transmitida para os grandes centros de carga, como cidades, indústrias e residências. A transmissão desta energia é feita de uma subestação local centralizada que aumentará a tensão coletada de média para alta tensão para a transmissão na rede elétrica. Estas subestações coletoras são responsáveis pelo recebimento de toda potência gerada pelos aerogeradores através de sua conexão no barramento de média tensão (de 12 a 34,5 kV) e elevação para tensão de conexão com o sistema interligado (de 69 a 500 kV).

2.7.7 Sistema de aterramento de parques eólicos

Segundo Goree (2019), atualmente não existe um padrão para o aterramento de uma usina eólica e cada turbina eólica possui seu próprio sistema de aterramento individual.

Um sistema de aterramento eficiente é essencial para dispersar correntes impulsivas advindas de descargas atmosféricas e evitar danos às turbinas eólicas. O sistema de aterramento do parque deve ainda proteger as pessoas e o gado contra choques elétricos. Quando ocorrerem faltas na rede elétrica, é necessário manter as tensões de toque e passo e o aumento de potencial da terra global a um nível seguro até que os dispositivos de proteção tenham disparado e interrompido o fluxo de corrente de falta. A norma ABNT NBR 5419 descreve dois tipos básicos de arranjos de eletrodos para um sistema de aterramento (ABNT NBR 5419, 2019):

- i) Arranjo tipo A: Composto de eletrodos radiais verticais, horizontais ou inclinados conectados à pelo menos dois condutores de descida das estruturas. É indicado para solos de baixa ou média resistividade (inferior a 500 $\Omega.m$) e pequenas estruturas. Este arranjo não é

recomendado para turbinas eólicas, no entanto, tem seu uso indicado para os edifícios contendo equipamentos de medição ou galpões de escritório que são conectados a um parque de turbinas eólicas;

- ii) Arranjo tipo B: O arranjo do tipo B é recomendado para uso em turbinas eólicas. Este tipo de arranjo inclui tanto um eletrodo de aterramento externo em anel em contato com o solo em pelo menos 80% do seu comprimento total como também o eletrodo de aterramento da fundação. Os eletrodos em anel e partes metálicas da fundação devem estar conectados à estrutura da torre.

Em geral, todos os componentes estruturais de uma turbina eólica são capazes de conduzir parte da corrente de descargas elétricas. A armação metálica da fundação deve ser considerada parte do sistema de proteção contra descargas atmosféricas.

A Figura 17 mostra o aço estrutural de um aerogerador antes que o concreto fosse derramado para sua fundação.

FIGURA 17 - MALHA DE ATERRAMENTO DE UM AEROGERADOR



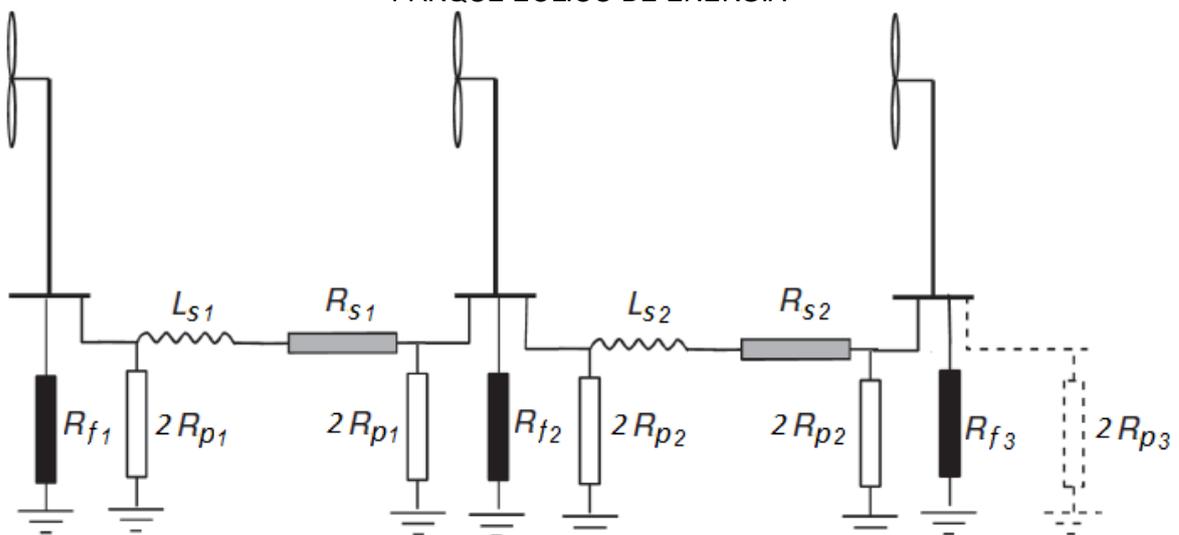
FONTE: Goree, 2020.

Em áreas rochosas, a menor resistividade está normalmente na superfície da rocha. Nestas áreas, pode não ser possível alcançar baixas resistências de aterramento (inferiores a 10Ω) sem estabelecer sistemas de aterramento muito extensos. A ênfase deve ser o controle das tensões de toque e passo na superfície. Para que isso seja feito, é recomendado o uso de pelo menos dois eletrodos de anel concêntrico em torno da turbina eólica, que podem ser combinados com eletrodos verticais fixados na rocha (ABB PSGS, 2012).

Em um parque eólico com rede coletora subterrânea, os sistemas de aterramento das turbinas eólicas e os da subestação de alta tensão são interligados com condutores de aterramento para formar um único sistema de aterramento geral do parque eólico. Isto é particularmente benéfico no caso de baixas resistências de terra ser difíceis de obter em cada posição individual de turbinas eólicas (IEC 61400–24, 2010).

Estes longos condutores de aterramento, também chamados pela literatura de eletrodos horizontais, são instalados ao longo das trincheiras aonde foram instalados os cabos de energia de média tensão e cabos de fibra ótica que interligam os vários aerogeradores e a subestação coletora conforme se pode observar na Figura 14. O desempenho de um sistema de aterramento de parque eólico pode ser compreendido por meio da Figura 18.

FIGURA 18 – CONFIGURAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM SISTEMA DE ATERRAMENTO DE UM PARQUE EÓLICO DE ENERGIA



FONTE: Adaptado de Burton et al. (2011)

Segundo Burton et al. (2011), uma vez que o sistema de aterramento de uma turbina eólica consiste em um eletrodo em anel com um diâmetro máximo de 20 metros e hastes acionadas verticalmente, ele pode ser considerado como sendo uma resistência de aterramento R_f . No entanto, os longos eletrodos horizontais que conectam cada turbina eólica às adjacentes têm um comportamento mais complexo, semelhante a uma linha de transmissão, podendo ser representados através um circuito equivalente com parâmetros concentrados em π onde a resistência de aterramento do eletrodo horizontal é então indicada por R_p , sua resistência série longitudinal por R_s e sua auto-indutância por L_s . Nesta análise, a capacitância ao solo do eletrodo horizontal e o efeito da ionização do solo foram ignoradas, embora possam se tornar significativas em altas frequências e para elevadas magnitudes de corrente.

2.8 MÉTODOS NUMÉRICOS

Segundo Araújo (2017), os métodos numéricos encontram soluções numéricas aproximadas dos mais variados problemas complexos encontrados no mundo real, por meio de aplicações de algoritmos, que possibilitam elaborar e calcular operações matemáticas usando sequências de operações aritméticas mais simples.

A análise numérica idealiza e concebe métodos para aprovar de forma eficiente as soluções de problemas expressados matematicamente e tem como objetivo encontrar uma solução aproximada do valor real por meio de sucessões, utilizando o mínimo de operações elementares possíveis (ARAUJO, 2017).

2.8.1 Método de Newton-Raphson

Segundo Ruggiero e Lopes (1997), o método de Newton-Raphson está entre os métodos numéricos clássicos mais conhecidos para se resolver os sistemas de equação não lineares, e é sem dúvida o mais estudado. Ele tem como estratégia, tornar o modelo localmente linear em torno da variável de decisão. É baseado na derivada das funções e converge para a solução se existir uma raiz do sistema próxima ao valor inicial.

O primeiro passo do método consiste na escolha de uma aproximação inicial. A etapa seguinte compreende o cálculo da equação da reta tangente por meio da

derivada da função nesse ponto e a interseção dela com o eixo das abcissas a fim de encontrar uma melhor aproximação para a raiz. Repetindo-se o processo, cria-se um método iterativo para encontrarmos a raiz da função. O método iterativo segue a equação recursiva (16).

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (16)$$

Onde

x_n := aproximação inicial

n := n-ésima iteração do algoritmo

$f'(x_n)$:= Derivada primeira da função f no ponto x_n

Bastos (2004) cita que uma característica imprescindível para a aplicabilidade dos métodos clássicos é a necessidade de que a função seja contínua e diferenciável no espaço de busca. Porém, este fato não ocorre na maioria dos problemas práticos de engenharia, dificultando assim a sua aplicação.

Os métodos de programação matemática apresentam algumas limitações tais como: a dificuldade em identificar soluções ótimas globais, pois são fortemente dependentes do ponto de partida; dificuldade de trabalhar com variáveis discretas e dificuldade de operar com funções não diferenciáveis (ALBUQUERQUE, 2007).

2.8.2 Redes Neurais Artificiais

Os métodos probabilísticos, nos quais se incluem as Redes Neurais Artificiais, entre outros, não empregam o cálculo de derivadas, atuando diretamente na busca das soluções no espaço viável. Estes métodos, entretanto, exigem um grande número de avaliações das funções, sendo considerados métodos computacionalmente mais caros que os clássicos.

A técnica de redes neurais (RN) foi apresentada pela primeira vez por Warren McCulloch e Walter Pitts em 1943. Trata-se de uma ferramenta computacional programada para reconhecer padrões em bancos de dados e sua principal finalidade é estimar funções matemáticas onde as distribuições de amostragens não tem uma função com forma analítica conhecida (ROGERS et al. 1995).

De acordo com Basheer (2001, apud HECHT-NIELSEN, 1990; SCHALKOFF, 1997) redes neurais artificiais (RNA) são ferramentas que encontraram um vasto campo de aplicação na modelagem de problemas complexos do mundo real. As RNA podem ser definidas como uma estrutura composta por elementos de processamento simples chamados neurônios que têm a capacidade de realizar operações como cálculos em paralelo para processamento de dados e representação de conhecimento. Seu primeiro conceito foi introduzido por McCulloch e Pitts (1943), mas décadas depois, tornou-se popular devido à introdução de algoritmos de treinamento, como a retro-propagação, que permitiram um treinamento adicional para melhorar os resultados do modelo.

A atratividade das RNAs vem das notáveis características de processamento de informações do sistema biológico como não linearidade, alto paralelismo, robustez, tolerância a falhas, aprendizado, capacidade de lidar com informações imprecisas e difusas e capacidade de generalizar conforme preconiza Basheer (2001, apud JAIN et al., 2016).

Desde o seu desenvolvimento, essa tecnologia tem sido amplamente utilizada e validada em diversos campos de pesquisa que visam prever eventos e auxiliar na tomada de decisões. Atualmente, várias estruturas topológicas de RNA tentam resolver diferentes tipos de problemas, tais como processamento de linguagem natural, reconhecimento de fala e imagens e previsão de valores.

A Rede Neural Artificial Perceptron foi introduzida por Rosenblatt (1957), inspirado nos trabalhos de McCulloch e Pitts (1943). O Perceptron é a forma mais simples da configuração de uma rede neural artificial, uma vez que é constituída de uma única camada neural e de um único neurônio.

Com o intuito de lidar com os problemas não linearmente separáveis, foram adicionadas camadas de neurônio ocultas no modelo de Rosenblatt, formando então a Rede Neural Artificial Multilayer Perceptron (MLP). Essa topologia funciona como uma rede feedforward onde a saída de um neurônio se conecta com outro neurônio da próxima camada. A rede possui uma camada de entrada, uma ou mais camadas ocultas e uma camada de saída. A complexidade da rede MLP se dá pela quantidade de camadas ocultas que houver e a quantidade de neurônios que essas camadas possuam.

O algoritmo de retro-propagação do erro ou em inglês backpropagation foi originalmente introduzido na década de 1970, mas sua importância não foi totalmente

apreciada até a publicação do artigo de Rumelhart et al. (1986). Esse artigo descreve várias redes neurais em que o algoritmo de retropropagação do erro tem um desempenho melhor do que as abordagens de aprendizado da época, possibilitando o uso de redes neurais para resolver problemas que antes eram insolúveis (GRUBLER, 2018).

O algoritmo de retro-propagação do erro apresenta uma série de problemas que acabam limitando seu uso. O principal problema diz respeito à lentidão do algoritmo para superfícies mais complexas. Desde que o algoritmo de retro-propagação do erro foi popularizado algumas pesquisas vêm buscando técnicas tanto para acelerar o algoritmo quanto para reduzir a incidência de mínimos locais. Dentro destas técnicas destaca-se o algoritmo de Levenberg-Marquardt (HAGAN e MENHAJ, 1994).

O Método ou Algoritmo de Levenberg–Marquardt é um método de otimização publicado primeiramente por Levenberg (1944) e aperfeiçoado por Marquardt (1963). É considerado como o mais rápido dos algoritmos de treinamento retro-propagação do erro, no entanto requer mais memória computacional do que os outros algoritmos utilizados para o mesmo fim.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Da literatura científica foram levantados artigos que contribuíram para esta dissertação. A Tabela 2 apresenta um resumo comparativo entre as principais referências e a dissertação, apresentando sua originalidade em relação a cada aspecto elencado.

De um modo geral, esta dissertação possui originalidade no tocante ao estudo e modelagem elétrica do alicate terrômetro, na análise dos erros de medição introduzidos pelas reatâncias dos eletrodos horizontais de um parque eólico e no desenvolvimento das soluções numérica e heurística para a minimização dos erros de medição observados com o uso do método direto em parques eólicos.

No tocante a modelagem elétrica de sistemas de aterramento de parques eólicos de energia, Jenkins e Vaudin (1993) propuseram o uso de parâmetros concentrados para a representação dos longos eletrodos horizontais encontrados em parques eólicos de energia. Este artigo seminal serviu para fornecer maior confiança aos projetos dos sistemas de aterramento de parques eólicos, sendo ainda utilizado por empresas como a Asea Brown Boveri (ABB) em seus projetos de plantas eólicas de energia em todo o mundo.

O estudo de Jenkins e Vaudin (1993) foi realizado sobre um parque eólico com aproximadamente 25 turbinas eólicas com potência entre 300 a 400kW. Estas turbinas foram erguidas sob fundações em laje reforçada de concreto com 8 a 10 metros de diâmetro. Uma extensa rede de coleta de cabos de energia e comunicações foi instalada ao longo do parque e uma subestação de alta tensão conectava a planta eólica com a rede elétrica da concessionária local. As turbinas foram espaçadas a distâncias de aproximadamente 250 metros umas das outras para garantir que um rotor a jusante não operasse no fluxo de ar mais lento e turbulento de qualquer outra turbina eólica a montante. Desta forma embora a área ocupada por cada turbina fosse pequena, o parque eólico se estendia por vários quilômetros quadrados. Como havia de se esperar e conforme confirmado por medições em campo, as condições e a resistividade dos solos variavam consideravelmente em um parque tamanha dimensão.

TABELA 2 – ORIGINALIDADE DA DISSERTAÇÃO FRENTE AOS ESTUDOS MAIS RELEVANTES

Aspecto	Jenkins e Vaudin (1993)	Freire (2016)	Wang Jiaolong et al. (2018)	Zhang et al (2019)	Goree (2019)	Dissertação	Originalidade da dissertação
Aplicação	Parques eólicos	Parques eólicos	Linhas de transmissão	Linhas de transmissão	Parques eólicos	Parques eólicos	Projeto de aterramento dos Parques Eólicos Olho D'Água e São Bento - ABB PSGS (2012)
Método de medição de aterramento	Não	Baixa corrente e alta frequência (25 kHz)	Alicate terrômetro	Alicate terrômetro	Não	Alicate terrômetro	Estudo e modelagem do alicate terrômetro UT-278A / UNIT©
Modelagem por	Circuitos elétricos	Campo eletromagnético	Circuitos elétricos	Circuitos elétricos	Campo eletromagnético	Circuitos elétricos	-
Reatâncias do sistema de aterramento (modelagem)	Sim	Sim	Sim	Não	Sim	Sim	Análise dos erros de medição introduzidos pelas reatâncias dos eletrodos horizontais.
Simulação Computacional	Planilhas de cálculo	CDEGS©	Simulink©	Matlab©	CDEGS©	Atpdraw©	Desenvolvimento de algoritmo para simulação computacional do problema de estudo.
Emprego de algoritmos numéricos	Método de Gauss-Seidel	Não	Não	Método do gradiente conjugado	Não	Método Newton-Raphson	Desenvolvimento de algoritmo para a solução numérica do problema de estudo (Newton-Raphson).
Emprego de algoritmos heurísticos	Não	Não	Não	Algoritmo genético	Não	Redes Neurais	Desenvolvimento de algoritmo para a solução heurística do problema de estudo (Redes Neurais).

FONTE: O autor (2021)

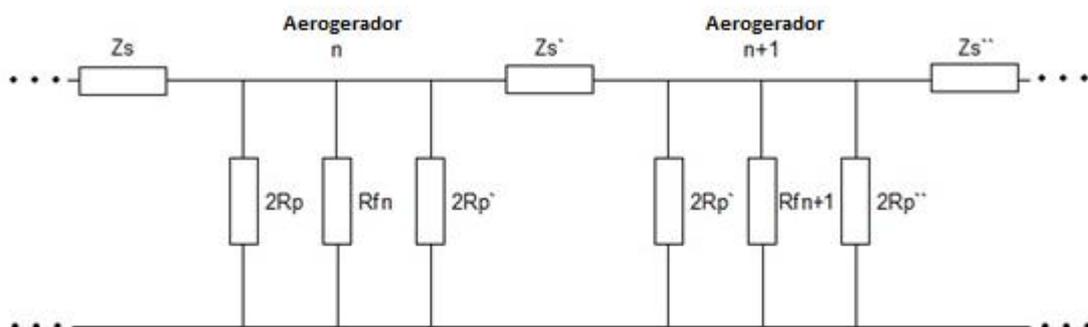
Uma baixa resistência de aterramento era necessária em vários pontos dentro do parque eólico: na subestação de 33/11 kV, em cada turbina eólica para as descargas atmosféricas e no transformador localizado adjacente a cada turbina. Como não era viável se estabelecer uma baixa resistência de aterramento para cada ponto requerido, foram instalados condutores de cobre subterrâneos que interligavam as malhas de aterramento dos aerogeradores entre si e com a subestação coletora. Estes condutores de cobre nú também chamados eletrodos horizontais, serviam para unir todas as partes do sistema de aterramento do parque eólico, bem como fornecer uma baixa resistência de aterramento para o sistema como um todo.

No entanto a previsão do desempenho, para efeito de projeto, deste longo eletrodo horizontal com aproximadamente 5 km de comprimento sob diversas condições de solo foi considerada extremamente difícil. Nesta época os projetos eram baseados na suposição de que eletrodos tão extensos poderiam ser substituídos por um único hemisfério equivalente em solo homogêneo. No entanto esta suposição era considerada aberta a muitos questionamentos pela comunidade científica.

Neste contexto, estes autores desenvolveram e validaram um modelo de parâmetro concentrado para a representação dos longos eletrodos horizontais de aterramento encontrados em parques eólicos de energia.

Cada seção do eletrodo horizontal foi representada por um modelo concentrado π . A Figura 19 mostra dois nós do modelo adotado pelos autores.

FIGURA 19 – MODELO DE PARÂMETRO CONCENTRADO ADOTADO PARA OS ELETRODOS HORIZONTAIS



Z_s := Impedância série do eletrodo horizontal.

R_f := Resistência de aterramento do aerogerador.

R_p := Resistência de aterramento do eletrodo horizontal.

Autor: Adaptado de Jenkins e Vaudin (1993)

As resistências de aterramento da fundação R_f das turbinas eólicas foram calculadas a partir da geometria da fundação e da resistividade local do solo.

A resistência de aterramento de cada seção de eletrodo horizontal R_p , foi calculada, de acordo com a equação (17) (BS7430,1998):

$$R_p = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot (\ln(\frac{2 \cdot L^2}{w \cdot h}) - 1,3) \quad (17)$$

Onde:

- R_p : = resistência paralela à terra, em Ω .
- ρ : = resistividade da terra, em $\Omega \cdot m$.
- L : = comprimento do condutor, em m.
- w : = diâmetro do condutor, em m.
- h : = profundidade de sepultamento, em m.

A autoimpedância de cada seção do eletrodo horizontal Z_s foi calculada através da reformulação da equação de Carsons (18) (ELECTRICITY ASSOCIATION SERVICES LIMITED, 2003).

$$Z_s = R_s + \left(49,4 + j \cdot 62,8 \cdot \ln \left[\frac{93,2 \cdot \sqrt{\rho}}{C_g} \right] \right) \cdot 10^{-3} \quad (18)$$

Onde:

- Z_s : = autoimpedância, em Ω / km .
- R_s : = resistência em série, em Ω / km
- ρ : = resistividade da terra, em $\Omega \cdot m$
- C_g : = raio médio geométrico do eletrodo, em m.

Desta forma foi realizada a modelagem de todo o sistema de aterramento do parque eólico e obtido seu circuito equivalente. Para o cálculo dos valores de impedância em qualquer nó deste circuito, foi desenvolvido um algoritmo numérico que utilizava o método de Gauss Siedel.

Os autores demonstraram que os resultados obtidos estavam em concordância com os valores encontrados nos ensaios de comissionamento de cada turbina do parque. O estudo destes autores serviu para fornecer maior confiança aos projetos dos sistemas de aterramento de parques eólicos.

A modelagem por parâmetros concentrados proposta por Jenkins e Vaudin (1993) é utilizada na aplicação do método proposto por esta dissertação. Neste aspecto, a contribuição desta dissertação está no uso desta modelagem para análise dos efeitos causados pelas reatâncias dos eletrodos horizontais nas medições de aterramento dos aerogeradores na frequência de operação do alicate terrômetro.

No tocante às características dos sistemas de aterramento encontrando em grandes plantas de energia eólica, esta dissertação utilizou conceitos e informações advindas do trabalho de Goore (2019) que analisou um sistema de aterramento de um grande complexo eólico terrestre dos Estados Unidos através do uso da teoria de campo eletromagnético através simulação computacional via software CDEGS®.

Novas metodologias para avaliação do sistema de aterramento em sistemas energizados sem a necessidade de desconexão de condutores interligados ao sistema de aterramento tem sido objeto de estudo de pesquisas em diferentes países do mundo. Voltado para sistema de aterramento de parques eólicos, o estudo de Freire et al. (2014) analisou e comparou os desempenhos de diferentes geometrias de aterramento de aerogeradores, através simulações computacionais nas frequências de 60 Hz e 25 kHz utilizando o programa canadense MultiGround Z. Estas frequências foram tomadas tendo em vista a avaliação do desempenho dos aterramentos, respectivamente, para a condição de curto-circuito no cubículo de média tensão e para uma medição com terrômetro de alta-frequência, que se aproxima das condições de um evento de queda direta de uma descarga atmosférica.

Em 2021, Panicalli e Barbosa avaliaram o uso de terrômetros com frequência de 25 kHz na medição da resistência de aterramento de pequenas e grandes malhas de aterramento e demonstraram que podem ocorrer erros significativos de medição em grandes malhas se o comprimento efetivo do eletrodo for menor do que as dimensões gerais da malha. Por outro lado, este estudo concluiu que o medidor pode fornecer resultados precisos para pequenas malhas de aterramento desde que equipadas com um circuito para compensação de reativos (PANICALI; BARBOSA, 2021).

No que se refere à aplicação do método do alicate terrômetro, a totalidade dos estudos pesquisados na literatura científica estão voltados para sistemas multi-aterrados genéricos ou especificamente para torres de linhas de transmissão de energia, sendo que não foram identificados, até o presente momento, pesquisas relacionadas à sua aplicação em plantas eólicas de energia, excetuando-se o estudo de Giacomelli et al. 2021 que buscou compreender os efeitos da frequência de operação do instrumento na medição da resistência de aterramento individual dos aerogeradores quando suas malhas são interligadas por eletrodos horizontais (GIACOMELLI et.al, 2021).

Como exemplo de pesquisa voltada para a área de transmissão de energia, o trabalho de Wang et al. (2006) avalia a utilização do alicate terrômetro para medição da resistência de aterramento de torre de linha de transmissão, em diferentes frequências de corrente de ensaio. O estudo utilizou a teoria dos circuitos elétricos para a modelagem de um sistema de aterramento composto por quatro torres, desprezando as reatâncias dos cabos-guarda.

Foram encontrados estudos mais recentes como o de Wang et al. (2018), que propõe um aprimoramento da medição da resistência de aterramento de torres de linhas de transmissão quando realizadas pelo método do alicate terrômetro. O método consiste em injetar uma fonte de excitação de tensão com frequência variável sob o ponto de medição. Esta frequência é selecionada automaticamente evitando-se a banda de frequência ocupada pelo ruído de interferência do sinal, destarte melhorando consideravelmente a qualidade do sinal de corrente a ser medido pelo instrumento.

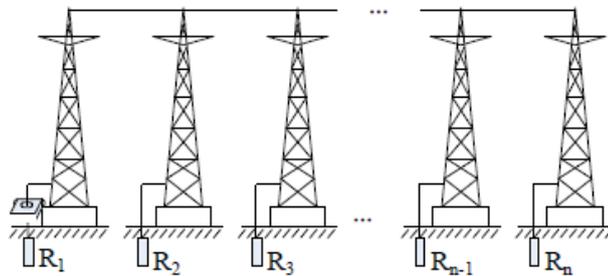
A metodologia utilizada consiste em primeiramente realizar a medição do sinal de interferência (ruído) que circula pelo sistema de aterramento e depois analisar o seu espectro de frequência, selecionando uma frequência de operação do instrumento que esteja fora da banda de frequência do sinal de interferência encontrado.

De relevância não menos importante, pode-se citar o estudo de Zhang et al. (2019), onde é apresentado um modelo para monitoramento online do sistema de aterramento de linhas de transmissão baseado em um algoritmo híbrido genético, fazendo uso de alicates de corrente. Esse trabalho propõe uma metodologia para a medição das resistências de aterramento individuais das torres de linhas de transmissão sem a desconexão dos cabos guardas e com o sistema elétrico energizado.

Como demonstração da metodologia proposta por Zhang et al. (2019), o diagrama esquemático e o modelo equivalente da medição da resistência de aterramento de um condutor de descida do aterramento de uma torre são mostrados na Figura 20 e Figura 21. A estrutura da torre, o cabo pára raio, o condutor de descida do aterramento das torres, as torres adjacentes e o solo formam um circuito fechado.

Na Figura 20, R_1 é a resistência de aterramento da torre sob teste e R_2, R_3, R_n , são as resistências de aterramento das outras torres do circuito.

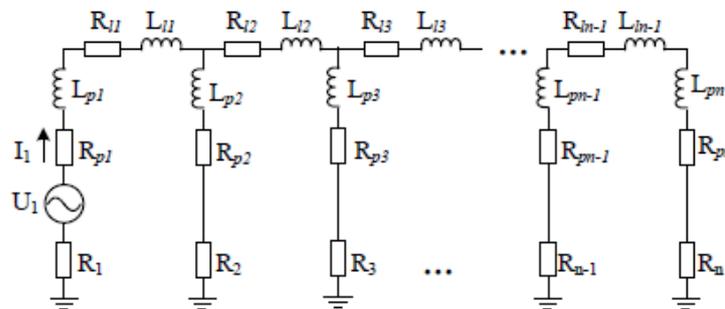
FIGURA 20 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO DE UM CONDUTOR DE DESCIDA DO ATERRAMENTO DE UMA TORRE



FONTE: Zhang et al. (2019)

Na Figura 21, $R_{p1}, R_{p2} \dots R_{pn}$ correspondem às resistências e $L_{p1}, L_{p2} \dots L_{pn}$ às reatâncias das estruturas das torres. $R_{11}, R_{12} \dots R_{1n}$ são as resistências e $L_{11}, L_{12} \dots L_{1n}$ as reatâncias dos cabos pára-raios. U_1 é a tensão de excitação e I_1 é a corrente induzida pelo instrumento no circuito fechado.

FIGURA 21 - MODELO EQUIVALENTE DA MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO DE UM CONDUTOR DE DESCIDA DO ATERRAMENTO DE UMA TORRE.

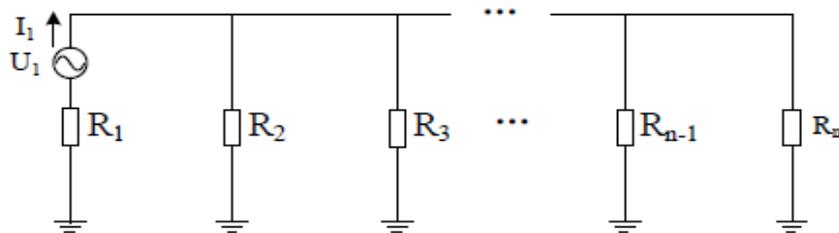


FONTE: Zhang et al. (2019)

Os autores assumiram que desde que as resistências e reatâncias dos cabos pára-raios e das estruturas das torres sejam desprezíveis comparadas com a resistência de aterramento da torre sob ensaio, suas medições podem ser negligenciadas.

Então o circuito equivalente pode ser simplificado e representado de acordo com a Figura 22.

FIGURA 22 - MODELO EQUIVALENTE SIMPLIFICADO DA MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO DE UM CONDUTOR DE DESCIDA DO ATERRAMENTO DE UMA TORRE.



FONTE: Zhang et al. (2019)

Neste caso, a resistência do circuito fechado é dada pela equação (19):

$$R'_1 = R_1 + R_0 = \frac{U_1}{m \times I_1} \quad (19)$$

Com

$$R_0 = 1 / \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} \right) \quad (20)$$

Onde

- R'_1 := Resistência de aterramento medida pelo instrumento na base da torre sob ensaio, em Ω .
- R_0 := Resistência de aterramento das torres adjacentes em paralelo, em Ω .
- R_2, R_3, \dots, R_n := Resistências de aterramento das torres, em Ω .
- U_1 := Tensão de excitação gerada pelo instrumento de medição, em V.
- I_1 := Corrente induzida e detectada pelo instrumento de medição, em A.
- m := Número de condutores de aterramento de descida na base da torre.

Medindo-se as resistências de aterramento na base de cada torre e aplicando-as à equação (19) é obtido o sistema de equações (21):

$$\left\{ \begin{array}{l} R'_1 = R_1 + \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_i} + \dots + \frac{1}{R_n}} \\ R'_2 = R_2 + \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_i} + \dots + \frac{1}{R_n}} \\ \dots \\ R'_i = R_i + \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_{i-1}} + \frac{1}{R_{i+1}} + \dots + \frac{1}{R_n}} \\ \dots \\ R'_n = R_n + \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_i} + \dots + \frac{1}{R_{n-1}}} \end{array} \right. \quad (21)$$

Onde:

- R'_i := Resistência de aterramento medida pelo instrumento na base da torre sob ensaio, em Ω .
- R_1, R_2, \dots, R_n := Resistências de aterramento das torres, em Ω .

As resistências de aterramento individuais de cada torre do circuito podem ser obtidas através da resolução do sistema de equações não lineares (21) com “ n ” variáveis e “ n ” equações (≥ 4), de difícil resolução direta. Este sistema de equações (21) precisa ser transformado em um problema de otimização para busca dos valores mínimos da função objetivo. Algoritmos clássicos (como o método de Newton, método gradiente e, etc.) ou algoritmo genético podem ser usados neste sentido. De acordo com os autores do artigo, o algoritmo clássico tem forte capacidade de busca local e rápida velocidade de convergência, e pode obter a solução ótima local. Entretanto sua convergência está relacionada à seleção do ponto inicial, fazendo com que a qualidade do ponto inicial afete diretamente a precisão do algoritmo.

O algoritmo genético é um método de busca aleatório para simular o processo evolucionário. Ele tem uma forte capacidade de pesquisa global e pode obter rapidamente o intervalo de solução ideal, no entanto sua capacidade de convergência

local é fraca. Os autores afirmam que o algoritmo genético não é dominante em comparação com o algoritmo clássico, na maioria das vezes encontrando apenas uma solução subótima para o problema.

Combinando as vantagens e desvantagens do algoritmo clássico e do algoritmo genético, os pesquisadores propõem um algoritmo genético híbrido que combina o algoritmo clássico (método do gradiente conjugado) e o algoritmo genético para resolver o sistema de equações não lineares (21). Destacam que o novo algoritmo herda a capacidade de busca global do algoritmo genético e a capacidade de busca local e a rápida convergência do algoritmo clássico, que pode efetivamente melhorar a velocidade de convergência e a precisão da solução, e encontrar de forma rápida e precisa a solução ótima global.

Para conveniência de cálculo, o sistema de equações (21) pode ser simplesmente expresso como:

$$\left\{ \begin{array}{l} f_1 = (R_1, R_2, R_3, \dots, R_n) = R^1 \\ f_2 = (R_1, R_2, R_3, \dots, R_n) = R^2 \\ \vdots \\ f_i = (R_1, R_2, R_3, \dots, R_n) = R^i \\ \vdots \\ f_n = (R_1, R_2, R_3, \dots, R_n) = R^n \end{array} \right. \quad (22)$$

Onde:

$$f_i = (R_1, R_2, R_3, \dots, R_n) = R_i + \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_{i-1}} + \frac{1}{R_{i+1}} + \dots + \frac{1}{R_n}} \quad (23)$$

A ideia de usar um algoritmo genético híbrido para resolver o sistema de equações (22) é de primeiro construir a função objetivo do algoritmo genético, e transformar as equações a em um problema de otimização global isto é, encontrar um R , de modo que o valor das equações (22) seja o menor possível. Quando o valor mínimo se aproxima de 0, o R correspondente é a solução do sistema de equações, e a função objetivo é mostrada na equação (23). Então, a seleção, operações de recombinação e mutação do algoritmo genético são realizadas para encontrar um ponto próximo ao centro populacional. Finalmente, o ponto populacional central obtido pelo algoritmo genético é usado como o ponto inicial do método de gradiente

conjugado para otimização secundária no sentido de encontrar o valor mínimo para a função objetivo, encontrando desta forma uma solução mais precisa.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{find: } R = (R_1, R_2, R_3, \dots, R_n) \\ \text{minf}(R) = \min \sqrt{\sum_{i=0}^n (f_i(R) - R_i)^2} \end{array} \right. \quad (24)$$

A metodologia de Zhang et al. (2019) assume que desde que as resistências e reatâncias dos cabos pára-raios e das estruturas das torres sejam desprezíveis em relação à resistência de aterramento da torre sob ensaio, suas medições podem ser negligenciadas. Entretanto, de acordo com Giacomelli et al. (2021), as reatâncias dos eletrodos horizontais de um parque eólico, nas frequências de operação dos alicates terrômetros comerciais, não são desprezíveis em relação à resistência de aterramento do aerogerador sob ensaio sendo que, portanto, não devem ser negligenciadas. Por este motivo, a metodologia de Zhang et al. (2019) não foi aplicada nesta dissertação cuja principal contribuição está em considerar os efeitos das reatâncias e resistências destes eletrodos horizontais nas medições das resistências de aterramento dos aerogeradores de um parque eólico.

4 MATERIAIS E MÉTODO

4.1 MATERIAIS

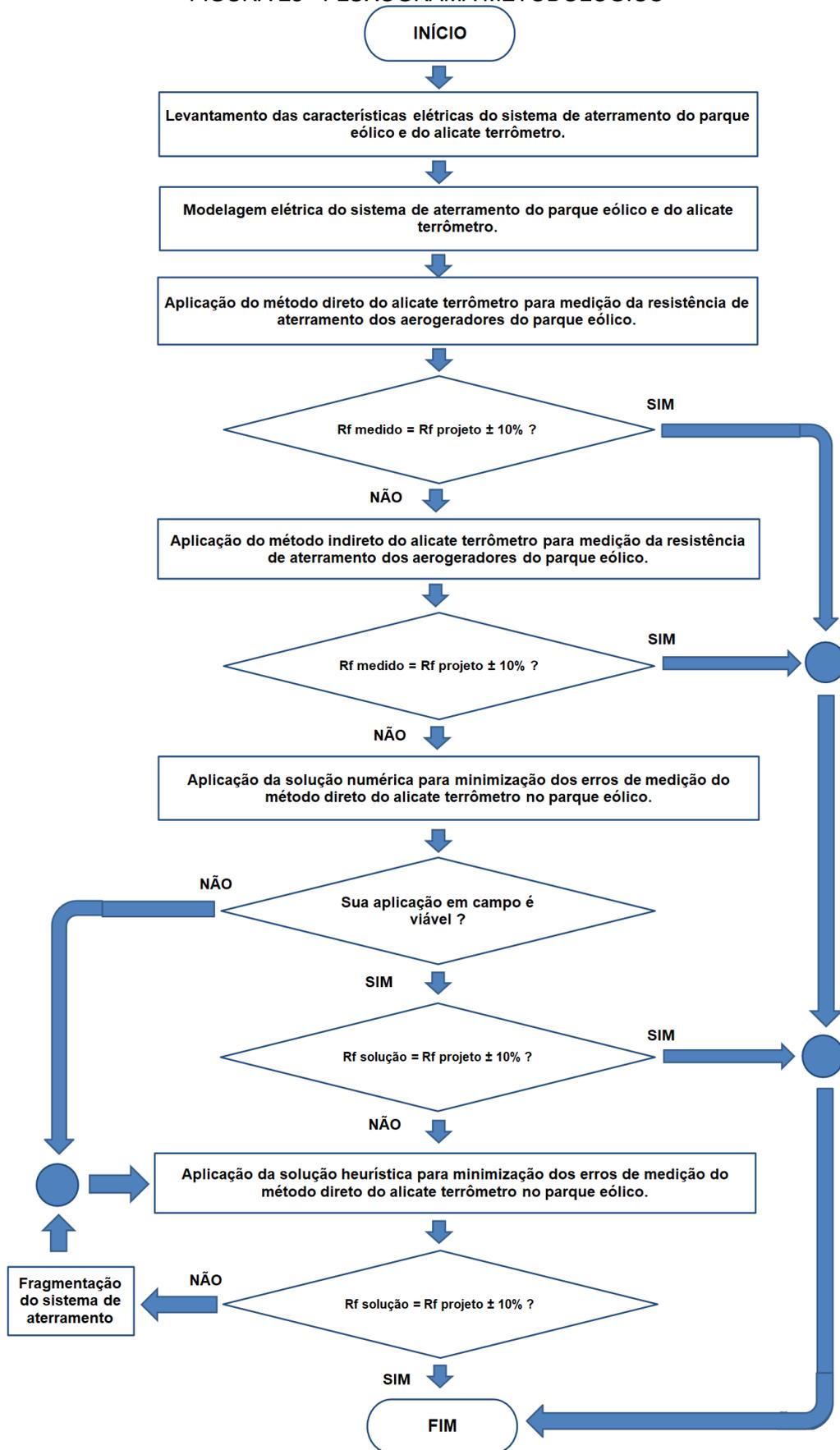
Para a aplicação do método proposto são necessários os materiais:

- Projeto elétrico executivo do sistema de aterramento do parque eólico;
- Software para simulação computacional do circuito equivalente do parque eólico (Matlab®, Simulink®, Atpdraw®, Comsol Multiphysics®, CDEGS®, ou equivalente);
- Alicates terrômetro digital com configuração mínima de 4 dígitos, nível de segurança CAT III – 600 V, faixa de medição de 0,01 a 1200 Ω e precisão mínima de $\pm (1\%+0,1)$ para a faixa de valores das resistências de aterramento dos laços de medição do sistema de aterramento do parque eólico.
- Multímetro digital com configuração mínima de 4 dígitos, nível de segurança CAT III – 600 V e precisão mínima de $\pm (0,1\%+2)$ para a faixa dos valores de resistências a serem medidos;
- Osciloscópio digital duplo canal com sensibilidade menor que 10 mV/div;
- Amplificador de corrente com fator de deflexão menor que 20mA/div;
- Probe de corrente com largura de banda sugerida > 100 kHz;
- Resistores de carbono de diversos valores com potência de dissipação superior a 0,125 W;
- Cabos condutores elétricos com seção nominal mínima de 0,05 mm²;
- Computador com configuração mínima imposta pelo software de simulação computacional a ser utilizado.

4.2 MÉTODO

O método a ser utilizado para atingir os objetivos propostos é composto por uma série de etapas distintas que podem ser visualizadas no fluxograma metodológico da Figura 23 e que são descritas ao longo deste capítulo.

FIGURA 23 - FLUXOGRAMA METODOLÓGICO



FONTE: O autor (2021).

4.2.1 Levantamento das características elétricas do sistema de aterramento do parque eólico e do alicate terrômetro.

Em posse do projeto elétrico de aterramento do parque eólico, são coletadas as seguintes informações sobre as características elétricas de seu sistema de aterramento:

- Impedâncias das malhas de aterramento individuais dos aerogeradores;
- Impedâncias equivalentes das subestações coletoras do parque eólico;
- Impedâncias dos eletrodos horizontais (cabos contra-peso) interligados às malhas de aterramento dos aerogeradores;
- Impedâncias dos cabos aéreos de aterramento interligados às malhas de aterramento dos aerogeradores (cabos-guarda das linhas de transmissão);
- Impedâncias das blindagens dos cabos de energia e de telecomunicações conectados às malhas de aterramento dos aerogeradores;
- Esquema elétrico das ligações entre os elementos que compõe o sistema de aterramento do parque eólico.

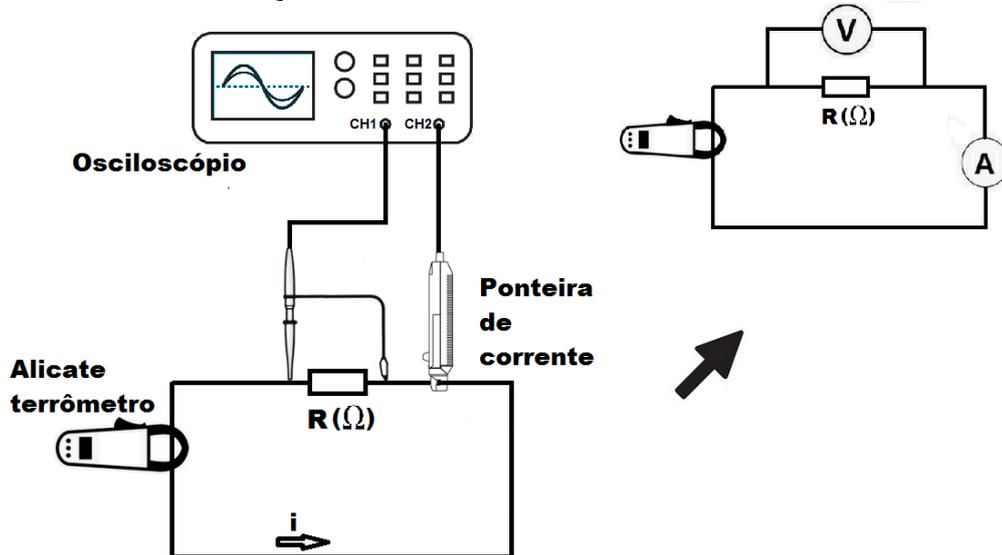
Ato contínuo, a forma de onda, a amplitude e a frequência do sinal gerado pelo alicate terrômetro devem ser levantadas objetivando sua modelagem elétrica dentro do circuito equivalente do parque eólico. Caso essas informações não estejam contidas nas especificações técnicas do instrumento de medição, deve-se realizar um ensaio em laboratório para o levantamento de tais parâmetros elétricos.

A parte experimental pode ser realizada com o auxílio de um resistor, um alicate terrômetro, um condutor de cobre de comprimento com resistência elétrica desprezível, um osciloscópio e uma ponteira de corrente com amplificador de sinal.

Um circuito em malha fechada formado por um resistor e um condutor de cobre deve ser implementado em bancada, conforme Figura 24. A tensão e a corrente no resistor devem ser monitoradas através o uso de um osciloscópio e uma ponteira de corrente (TC) enquanto o alicate terrômetro realiza a leitura de resistência no circuito fechado. Devem ser anotados e analisados os valores da amplitude e frequência dos sinais de tensão e corrente obtidos para alguns valores de resistência

de “R” que estejam compreendidos dentro da faixa de funcionamento especificada pelo fabricante do instrumento.

FIGURA 24 - MEDIÇÃO DO SINAL GERADO PELO ALICATE TERRÔMETRO



FONTE: O autor (2021).

4.2.2 Modelagem elétrica do sistema de aterramento do parque eólico e do alicate terraômetro.

Nesta etapa ocorre a escolha dos modelos elétricos que são adotados para as malhas de aterramento dos aerogeradores, os eletrodos horizontais, os cabos-guarda e o alicate terraômetro. Este instrumento de medição deve ser representado por uma fonte de tensão constante em série com a resistência de aterramento de interesse. O valor de leitura do instrumento será a relação entre os valores eficazes de tensão e de corrente fornecidos pela fonte.

De acordo com Diefenthaler (2019), em uma rede elétrica real pode-se considerar que os parâmetros resistência, indutância e capacitância são distribuídos ao longo da linha de transmissão. Para linhas curtas, estes parâmetros sofrem pequena variação e podem ser considerados como concentrados em um único ponto. Essa afirmação determina a principal classificação de modelos de linhas de transmissão entre parâmetros concentrados e distribuídos. Os modelos de linhas de transmissão ainda podem ser classificados de acordo com o efeito da frequência sobre os parâmetros dos cabos. Assim, sugere-se que a modelagem de linhas de transmissão deve ser realizada de acordo com os objetivos da pesquisa e a escolha

do modelo matemático adequado deve ponderar acerca do comprimento das linhas de transmissão, da maior frequência esperada e do erro de cálculo aceito (DIEFENTHÄLER, 2019).

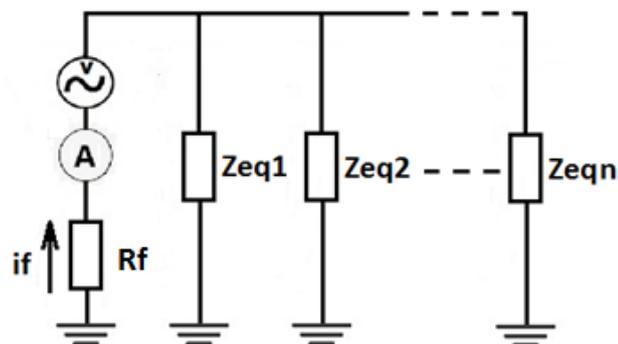
Nesta dissertação a modelagem do sistema de aterramento foi realizada de acordo com a teoria dos circuitos elétricos, onde os eletrodos horizontais foram representados pelo modelo de parâmetros concentrados da Figura 19, enquanto as malhas de aterramento foram representadas por suas resistências elétricas. Um maior detalhamento sobre esta modelagem está contido na seção 5.2 deste documento.

4.2.3 Método direto do alicate terrômetro.

Esta etapa compreende a simulação e análise computacional do uso direto das medições obtidas com o método do alicate terrômetro para estimativa dos valores das resistências de aterramento dos aerogeradores do parque eólico de energia.

Nesta fase é realizada a simulação computacional do uso do alicate terrômetro no circuito equivalente do parque eólico, onde uma fonte de tensão senoidal é introduzida em série com a malha de aterramento do aerogerador sob ensaio, simulando desta forma o sinal tensão injetado pelo instrumento no circuito de medição representado pela Figura 25.

FIGURA 25 - CIRCUITO EQUIVALENTE DO MÉTODO DIRETO DO ALICATE TERRÔMETRO SENDO APLICADO A UM AEROGERADOR DO PARQUE EÓLICO.



FONTE: O autor, 2021

Onde:

- R_f := Resistência de aterramento do aerogerador, em Ω .
- v := Tensão gerada pelo alicate terrômetro, em V.
- i_f := Corrente auferida pelo alicate terrômetro, em V.

- $Z_{eq1}, Z_{eq2}, \dots, Z_{eqn} :=$ Impedâncias de aterramento na frequência de operação do alicate terrômetro, das “n” componentes do sistema de aterramento do parque eólico que estão conectadas a malha de aterramento do aerogerador, em Ω .

O valor de leitura da resistência de aterramento auferida pelo alicate terrômetro R_{med} é obtida por meio da equação (11).

O número de simulações desta etapa será igual ao número de aerogeradores do parque eólico sendo que cada simulação conterà apenas uma fonte em série com a impedância de aterramento de interesse.

4.2.4 Análise dos resultados obtidos com o método direto do alicate terrômetro.

Nesta etapa são analisadas as diferenças entre os valores das resistências de aterramento dos aerogeradores do parque eólico e seus respectivos valores mensurados diretamente pelo alicate terrômetro no cabo de descida de sua malha de aterramento. O erro de medição é calculado pela equação (25).

$$Erro_n = \frac{(R_{med_n} - R_{f_n})}{R_{f_n}} \times 100 (\%) \quad (25)$$

Onde:

- $R_{med_n} :=$ Resistência de aterramento do aerogerador “n” mensurada pelo alicate terrômetro, em Ω .
- $R_{f_n} :=$ Resistência de aterramento de projeto do aerogerador “n”.
- $n := 1, 2, \dots, k$.

Os resultados serão considerados satisfatórios se os erros estiverem dentro de uma faixa de tolerância de +- 10%. Caso seja detectado algum erro fora desta faixa de tolerância, segue-se para a próxima etapa do método proposto.

4.2.5 Método indireto do alicate terrômetro.

Esta etapa compreende a simulação, aplicação de metodologia numérica e análise computacional para uso indireto das medições obtidas com o alicate

terrômetro acoplado ao condutor de descida da malha de aterramento de um aerogerador e aos demais condutores que o interligam às outras componentes do sistema de aterramento do parque eólico, para obtenção de sua resistência de aterramento.

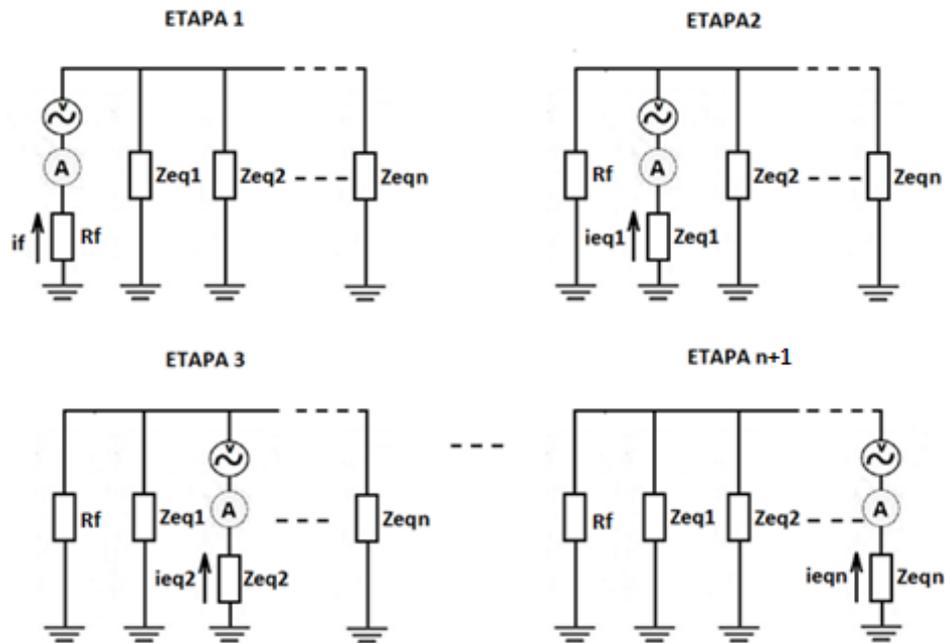
Esta fase consiste em obter o valor da impedância de aterramento de um determinado aerogerador através de uma série de medições efetuadas junto ao barramento de equipotencialização de seu quadro de distribuição principal (BEP), sem que haja a necessidade de desconexões e deslocamentos dentro do parque eólico de energia. Estas medições são efetuadas com o alicate terrômetro acoplado aos cabos de descida provenientes da malha de aterramento do próprio aerogerador e dos eletrodos horizontais, dos cabos guarda e das blindagens de cabos de energia e telecomunicações.

Uma simulação computacional do circuito equivalente do sistema de aterramento do parque eólico é executada de acordo com a Figura 26. Para a obtenção dos valores que serão lidos pelo alicate terrômetro, uma fonte senoidal e um amperímetro são introduzidos ao circuito de medição. A impedância medida pelo instrumento é obtida pela amplitude máxima de tensão gerada pela fonte, dividida pela amplitude máxima da corrente que flui através da mesma (lei de ohm). Deverá ser realizada uma simulação para cada posição do instrumento de medição junto ao circuito de medição.

Para um melhor entendimento do método, é analisado o caso de um aerogerador que possui “n” componentes do sistema de aterramento do parque eólico conectados à sua malha de aterramento. A Figura 26 ilustra um exemplo típico do emprego deste método sob um sistema de aterramento de um parque eólico.

Cada uma das leituras do instrumento (etapas) corresponde a um equacionamento distinto que é definido pelo caminho da corrente injetada pelo alicate terrômetro ao longo do circuito de medição.

FIGURA 26 – CIRCUITOS EQUIVALENTES DAS ETAPAS DO MÉTODO INDIRETO DO ALICATE TERRÔMETRO



FONTE: O autor (2021).

São anotados os valores eficazes das correntes i_f , i_{eq1} , i_{eq2} ... e i_{eqn} obtidos através a simulação computacional dos circuitos equivalentes de cada uma das etapas da Figura 26.

De acordo com o princípio de funcionamento do alicate terrômetro a leitura da resistência de aterramento em cada etapa do ensaio é realizada segundo as equações (26).

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{med_etapa_1} = \frac{v_{rms}}{i_{f\ rms}} \\ R_{med_etapa_2} = \frac{v_{rms}}{i_{eq1\ rms}} \\ R_{med_etapa_3} = \frac{v_{rms}}{i_{eq2\ rms}} \\ \vdots \\ R_{med_etapa_n+1} = \frac{v_{rms}}{i_{eqn\ rms}} \end{array} \right. \quad (26)$$

Onde:

$R_{med_etapa_1}, R_{med_etapa_2}, R_{med_etapa_3}, \dots, R_{med_etapa_n+1}$: Resistências de aterramento lidas pelo instrumento a cada etapa do processo de medição, em Ω .

V_{rms} := Valor eficaz da tensão gerada pelo alicate terrômetro, em V.

$\hat{I}_f rms, \hat{I}_{eq1 rms}, \hat{I}_{eq2 rms}, \dots, \hat{I}_{eqn rms}$:= Valores eficazes das correntes auferidas pelo instrumento a cada etapa do processo de medição, em ampéres.

Para efeito de análise do erro introduzido pelo método indireto do alicate terrômetro, a impedância equivalente do laço de medição será considerada como sendo igual à resistência de aterramento lida pelo instrumento em (27).

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{med_etapa_1} = R_f + \frac{1}{\frac{1}{Z_{eq1}} + \frac{1}{Z_{eq2}} + \dots + \frac{1}{Z_{eqn}}} \\ R_{med_etapa_2} = Z_{eq1} + \frac{1}{\frac{1}{R_f} + \frac{1}{Z_{eq2}} + \dots + \frac{1}{Z_{eqn}}} \\ R_{med_etapa_3} = Z_{eq2} + \frac{1}{\frac{1}{R_f} + \frac{1}{Z_{eq1}} + \dots + \frac{1}{Z_{eqn}}} \\ \vdots \\ R_{med_etapa_n+1} = Z_{eqn} + \frac{1}{\frac{1}{R_f} + \frac{1}{Z_{eq1}} + \frac{1}{Z_{eq2}} + \dots + \frac{1}{Z_{eqn-1}}} \end{array} \right. \quad (27)$$

Onde:

- R_f : Resistência de aterramento do aerogerador, em Ω .
- $Z_{eq1}, Z_{eq2}, \dots, Z_{eqn}$:= Impedâncias de aterramento na frequência de operação do alicate terrômetro, das “n” componentes do sistema de aterramento do parque eólico que estão conectadas a malha de aterramento do aerogerador, em Ω .

Este sistema de equações não lineares (27) pode ser transformado em um problema de otimização para busca dos valores mínimos da função objetivo (28) onde algoritmos clássicos como o método de Newton-Raphson ou o método gradiente reduzido generalizado podem então ser utilizados para a obtenção do valor da resistência de aterramento do aerogerador R_f

$$f_{med_etapa_i+1} = (R_f, Z_{eq1}, Z_{eq2}, \dots, Z_{eqn}) = Z_{eqi} + \frac{1}{\frac{1}{R_f} + \frac{1}{Z_{eq1}} + \dots + \frac{1}{Z_{eqi-1}} + \frac{1}{Z_{eqi+1}} + \dots + \frac{1}{Z_{eqn}}} \quad (28)$$

4.2.6 Análise dos resultados obtidos com o uso do método indireto do alicate terrômetro.

Nesta etapa são analisadas as diferenças entre os valores das resistências de aterramento dos aerogeradores do parque eólico e seus respectivos valores obtidos com o método indireto do alicate terrômetro. O erro de medição é calculado por meio da equação (25).

Os resultados serão considerados satisfatórios se os erros estiverem dentro de uma faixa de tolerância de $\pm 10\%$. Caso seja detectado algum erro fora da faixa de tolerância, segue-se para a próxima etapa do método proposto.

4.2.7 Desenvolvimento de uma solução numérica.

Uma solução numérica para mitigação dos erros de medição obtidos com o uso do método direto do alicate terrômetro em parques eólicos é desenvolvida para o sistema de aterramento do parque eólico. A ideia aqui é estimar o valor da resistência de aterramento do aerogerador a partir do conhecimento dos demais parâmetros de projeto do sistema de aterramento do parque eólico. Eletrodos horizontais, cabos guarda e esquema da interligação entre as malhas de aterramento dos aerogeradores devem ser modelados eletricamente e assim representados no circuito elétrico equivalente do sistema de aterramento do parque. As variáveis de interesse são as resistências de aterramento dos aerogeradores do parque eólico sob ensaio.

Para tanto é necessário realizar o equacionamento da impedância de aterramento do circuito fechado vista pelo alicate terrômetro no ponto de medição. A impedância de aterramento que é computada pelo instrumento deve ser equacionada em função dos valores das resistências e reatâncias do circuito elétrico equivalente do sistema de aterramento do parque eólico. É importante salientar que o alicate terrômetro identifica apenas o módulo da impedância de aterramento, informação necessária ao equacionamento.

As resistências de aterramento individuais de cada aerogerador que compõe o parque eólico devem ser obtidas através da resolução do sistema de equações não lineares com “n” variáveis e “n” equações, de difícil resolução direta. Este sistema de equações precisa ser transformado em um problema de otimização para busca dos

valores mínimos da função objetivo. Algoritmos clássicos como o método de Newton-Raphson, método gradiente reduzido generalizado podem ser usados neste sentido.

4.2.8 Análise dos resultados obtidos com o uso da solução numérica.

Nesta etapa são analisadas as diferenças entre os valores das resistências de aterramento dos aerogeradores e seus respectivos valores estimados pela solução numérica. O erro de medição é calculado pela equação (29).

$$Erro_n = \frac{(Rf_{solução_n} - Rf_n)}{Rf_n} \times 100 (\%) \quad (29)$$

Onde:

- $Rf_{solução_n}$:= Resistência de aterramento do aerogerador “n” estimada pela solução numérica, em Ω .
- Rf_n := Resistência de aterramento de projeto do aerogerador “n”, em Ω .
- n:= 1, 2, ..., k.

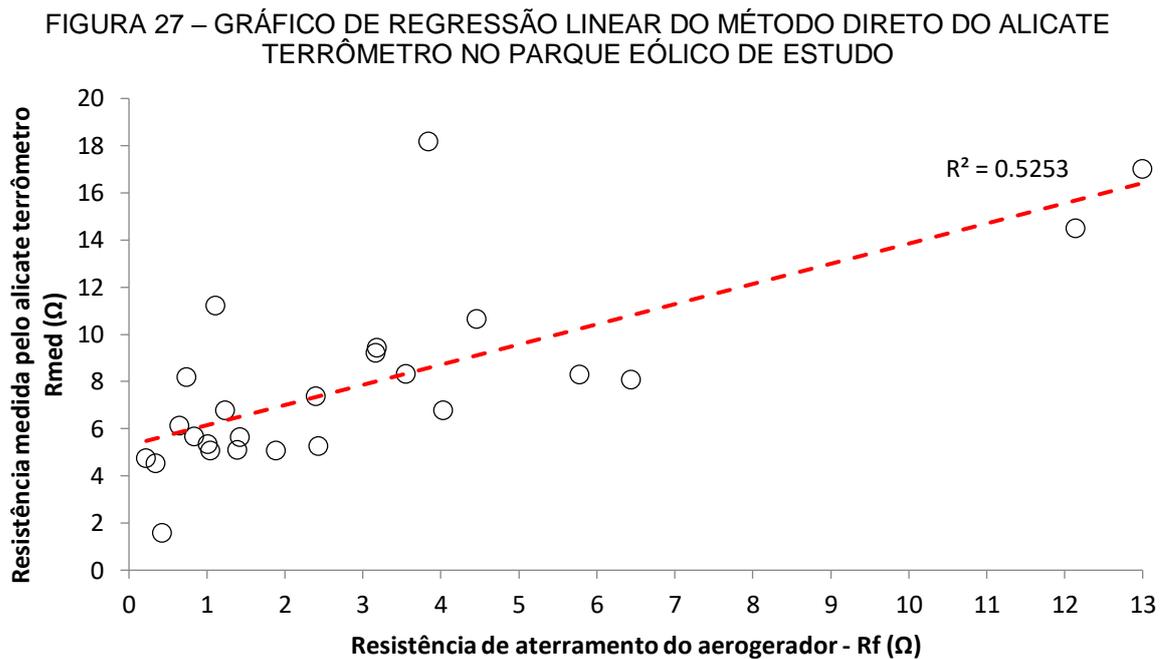
Os resultados serão considerados satisfatórios se os erros estiverem dentro de uma faixa de tolerância de +- 10%. Caso seja detectado algum erro fora da faixa de tolerância, segue-se para a próxima etapa do método proposto.

4.2.9 Desenvolvimento de uma solução heurística.

Caso a formulação matemática das equações advindas da solução numérica, seja de difícil desenvolvimento, deve se adotar a técnica computacional de redes neurais artificiais para se estimar a resistência de aterramento dos aerogeradores R_f a partir de seus correspondentes valores de leitura obtidos com o método direto do alicate terrômetro R_{med} . Devido a não linearidade da relação entre estas variáveis (Figura 27), e ao laborioso equacionamento de sua função matemática para sistemas de aterramento com um grande número de aerogeradores interconectados, opta-se pelo uso de redes neurais devido às suas notáveis características de processamento de informações não lineares, alto paralelismo, e capacidade de generalização (BASHEER; HAJMEER, 2001).

A Figura 27 apresenta um gráfico de regressão linear da relação entre as variáveis R_f e R_{med} obtida com a aplicação do método direto no parque de estudo.

No gráfico da Figura 27 percebe-se uma correlação linear relativamente fraca entre estas duas variáveis para aerogeradores do parque eólico com resistência de aterramento menores do que 13 ohms (Coeficiente de Pearson = 0,5253), o que evidencia a não linearidade desta relação.



FONTE: O autor (2021).

Para a construção do entendimento da aplicação da solução desenvolvida, uma vez levantados os parâmetros e características elétricas do projeto do sistema de aterramento do parque eólico e do alicate terrômetro e realizada a modelagem elétrica de suas componentes, o circuito elétrico equivalente de medição é carregado em um software de simulação computacional.

Todas as grandezas elétricas devem ser inseridas conforme os valores do projeto do aterramento, excetuando-se as variáveis de interesse (resistências de aterramento dos aerogeradores do parque eólico).

Um estudo de sensibilidade dos parâmetros que influenciam a resistência de aterramento dos aerogeradores do parque deve ser realizado para estimar sua variação diante de não conformidades que possam ocorrer durante o processo de execução da obra ou da presença de processos de deterioração.

Um vetor de amostras de entrada [$R_f 1, \dots, R_f k$], contendo valores das resistências de aterramento dos “n” aerogeradores do parque eólico, deve ser gerado aleatoriamente segundo uma distribuição uniforme em torno de seus respectivos valores de projeto e dentro da faixa de variação do estudo de sensibilidade realizado. O circuito equivalente do sistema de aterramento do parque é então carregado com os valores das resistências de aterramento dos aerogeradores contidas neste vetor e simulado computacionalmente para se obter analiticamente os valores que serão lidos pelo alicate terrômetro em cada aerogerador segundo a seção 4.2.3. Desta forma se obtém um vetor de amostras de saída [$Z_{med} 1, \dots, Z_{med} k$] que contém os valores de resistência auferidos pelo alicate terrômetro em cada aerogerador do parque.

Estes vetores de amostras de entrada e saída são então armazenados em um banco de dados que será utilizado posteriormente. Esta etapa de geração de amostras aleatórias em torno das resistências de aterramento de projeto e posterior simulação do circuito equivalente do sistema de aterramento deve ocorrer “m” vezes até que se obtenha o número de amostras definido para o treinamento da rede neural artificial.

Ato contínuo deve ser utilizado uma ferramenta computacional que possibilite a implementação de uma rede neural artificial do tipo “feedforward backpropagation” (Matlab®, Python®, Neuroph®, TensorFlow®, entre outros), que será treinada com o mesmo banco de dados das “m” amostras geradas pelas simulações computacionais anteriores. No entanto, os dados de entrada para o treinamento da rede neural serão os valores de leitura tomados com o alicate terrômetro junto ao cabo de descida do aterramento de cada aerogerador do parque eólico [$Z_{med} 1, \dots, Z_{med} k$] e os dados de saída serão os valores das resistências de aterramento de cada aerogerador do parque eólico [$R_f 1, \dots, R_f k$].

Seguindo o processo, a rede neural fará o reconhecimento do padrão inverso da solução utilizada pelo software de simulação computacional para resolução do circuito equivalente de medição, validando e testando os resultados, sendo assim capaz de estimar, dentro de certa margem de erro (erro de medição), os valores das resistências de aterramento a partir das leituras do alicate terrômetro realizadas via método direto.

É implementada uma etapa final de teste, para verificação dos erros de medição advindos da solução heurística. Esta etapa de verificação final da rede neural é executada com novos valores de medições das resistências de aterramento dos

aerogeradores obtidos de forma aleatória dentro da faixa de variação estipulada pelo estudo de sensibilidade da geometria da malha de aterramento.

Novamente, um vetor de amostras de entrada com valores para as resistências de aterramento dos aerogeradores do parque eólico deve ser gerado aleatoriamente segundo uma distribuição uniforme em torno de seus respectivos valores de projeto e dentro da faixa de variação do estudo de sensibilidade realizado. O circuito equivalente do sistema de aterramento do parque é então carregado com os valores da amostra de entrada e simulado computacionalmente para se obter os valores que serão lidos pelo alicate terrômetro em cada aerogerador conforme seção 4.2.3. Desta forma um vetor de amostras de saída contendo os valores lidos pelo alicate terrômetro em cada aerogerador é obtido.

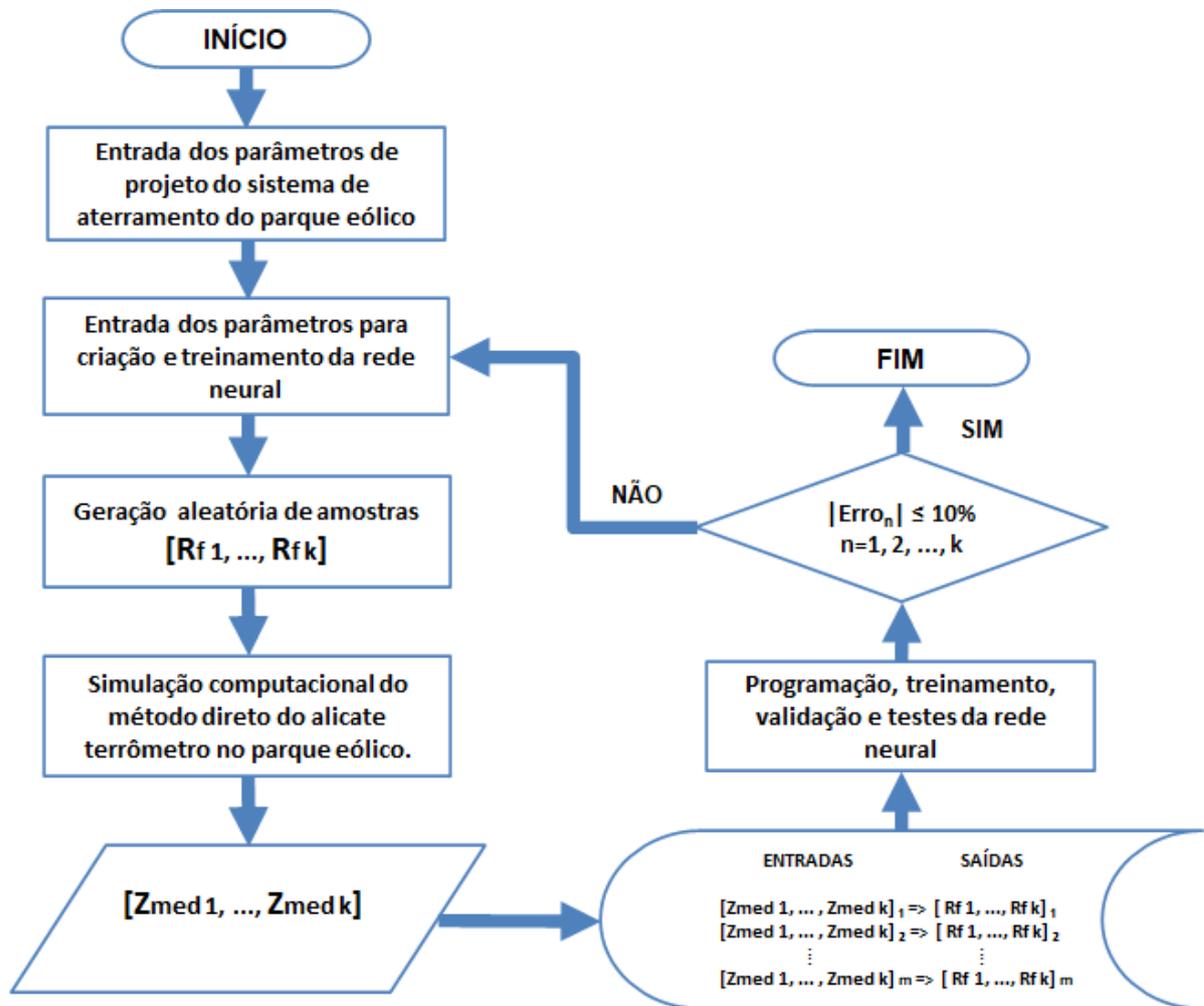
Os vetores de amostras de entrada e de saída são então armazenados em um novo banco de dados que será utilizado posteriormente. Esta etapa de geração de amostras aleatórias em torno das resistências de aterramento de projeto e posterior simulação do circuito equivalente do sistema de aterramento deve ocorrer “ $\frac{m}{10}$ ” vezes.

Seguindo o processo, a rede neural é executada para estimar os valores das resistências de aterramento a partir das leituras do alicate terrômetro para cada amostra do banco de dados. Por último, os erros de previsão da rede neural são calculados em relação à solução da simulação computacional utilizada. Os resultados serão considerados satisfatórios se os erros estiverem dentro de uma faixa de tolerância de +- 10%.

Caso seja detectado algum erro fora desta faixa de tolerância, o banco de dados da solução heurística é ressetado, os parâmetros de criação e treinamento da rede neural são alterados e uma nova etapa de geração de amostras aleatórias em torno das resistências de aterramento de projeto é iniciada.

O fluxograma da solução heurística é apresentado na Figura 28.

FIGURA 28 - FLUXOGRAMA DA SOLUÇÃO HEURÍSTICA.



FONTE: O autor (2021).

4.2.10 Análise dos resultados obtidos com o uso da solução heurística.

Nesta etapa são analisadas as diferenças entre os valores das resistências de aterramento dos aerogeradores do parque eólico e seus respectivos valores estimados pela solução heurística. O erro de medição é calculado pela equação (30).

$$Erro_n = \frac{(Rr_n - Rf_n)}{Rf_n} \times 100 (\%) \quad (30)$$

Onde:

- Rr_n : Resistência de aterramento do aerogerador “n” estimada pela solução heurística, em Ω .
- Rf_n : Resistência de aterramento de projeto do aerogerador “n”, em Ω .
- n:= 1, 2, ..., k.

Os resultados serão considerados satisfatórios se os erros estiverem dentro de uma faixa de tolerância de +- 10%. Caso não seja possível a criação de uma rede neural que ofereça resultados dentro desta faixa da tolerância, o sistema de aterramento do parque eólico deve ser segmentado em sub-sistemas menores, com um menor número de aerogeradores interconectados, e a etapa da solução heurística deve ser novamente aplicada até que se obtenham resultados dentro da faixa de tolerância de +-10%.

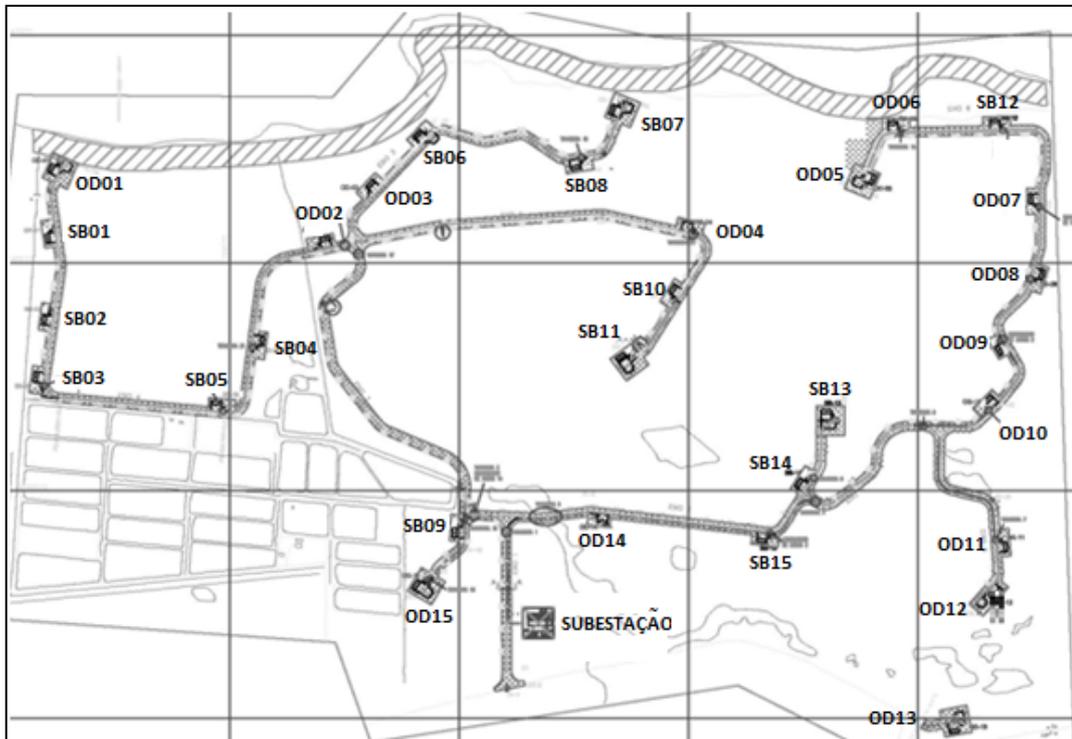
5 APLICAÇÃO DO MÉTODO E ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1 LEVANTAMENTO DAS CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DO ESTUDO DE CASO.

Como estudo de caso é realizado o levantamento das características elétricas do projeto do sistema de aterramento dos parques eólicos de São Bento do Norte (SB) e Olho D'Água (OD) disponibilizado pela empresa Copel (ABB PSGS, 2012).

Localizados no estado brasileiro do Rio Grande do Norte e originalmente viabilizados pela Galvão Energia, esses projetos foram adquiridos pela Copel em 2013 e entraram em operação em 16 de junho de 2015. Esses parques eólicos são equipados com trinta turbinas Vestas, possuem uma capacidade instalada de 60 MW, pertencem ao complexo eólico São Bento do Norte e são interligados por uma subestação coletora de 138 / 34,5kV que é conectada à subestação João Câmara III. As fundações dos aerogeradores são interligadas por condutores de cobre enterrados (eletrodos horizontais) com secção transversal 95 mm² que seguem a linha subterrânea de média tensão, e se estendem até a subestação. Figura 29 ilustra a planta dos parques eólicos São Bento do Norte e Olho D'Água.

FIGURA 29 – PLANTA DOS PARQUES EÓLICOS SÃO BENTO DO NORTE E OLHO D'ÁGUA



FONTE: Adaptado de ABB PSGS (2012).

As fundações dos aerogeradores foram projetadas e construídas seguindo duas concepções:

- Estaca Raiz, com o aterramento consistindo de dois eletrodos em anel de cobre com secção transversal 95 mm^2 , um com raio de 9,6 m na mesma profundidade da base do aerogerador e outro com raio de 3,6 m em uma profundidade de 0.6 m da superfície do solo. Quatro cabos radiais conectam estes dois anéis, que por sua vez encontram-se interligados a vinte e oito estacas de concreto armado com 15 m de comprimento. Esta solução foi utilizada para as turbinas OD-01, OD-02, OD-03, OD-04, OD-05, OD-06, OD-07, OD-08, OD-09, OD-10, OD-11, OD-15, SB-01, SB-02, SB-03, SB-04, SB-06, SB-07, SB-08, SB-09, SB-10, SB-11, SB-12, SB-13, SB-14 e SB-15;

- Fundação direta, com o aterramento consistindo de dois eletrodos em anel de cobre com secção transversal 95 mm^2 , um com raio 9,6 m na profundidade da base e outro com raio 3,6 m em uma profundidade de 0.6 m da superfície do solo. Quatro cabos radiais conectam estes dois anéis que por sua vez encontram-se interligados a quatro hastes de cobre com 6 m de comprimento. Esta solução foi utilizada para as turbinas OD-12, OD-13, OD-14 e SB05.

Em posse do projeto de aterramento do parque eólico, foram coletados os seguintes parâmetros:

- R_f := Resistência de aterramento da turbina eólica, em Ω .
- R_s := Resistência série, em Ω / km .
- ρ := Resistividade média do solo, em $\Omega \cdot \text{m}$.
- C_g := Raio médio geométrico do cabo de cobre, em m.
- A := Secção transversal do cabo de cobre em mm^2 .
- ρ_{cu} := Resistividade do cobre, em $\Omega / \text{mm}^2 \cdot \text{km}$.
- L := Comprimento do cabo horizontal, em m
- W := Diâmetro do condutor, em m
- h := Profundidade do cabo em relação ao solo, em m.
- Esquema elétrico do sistema de aterramento.

- Resistência de aterramento equivalente do sistema de aterramento da subestação coletora, em Ω .

Conforme a etapa indicada no capítulo 4.2.1, é realizado o levantamento das características do sinal gerado pelo alicate terrômetro modelo UT-278A junto ao circuito de medição da Figura 24. Os resultados obtidos no ensaio em laboratório são visualizados na Tabela 3.

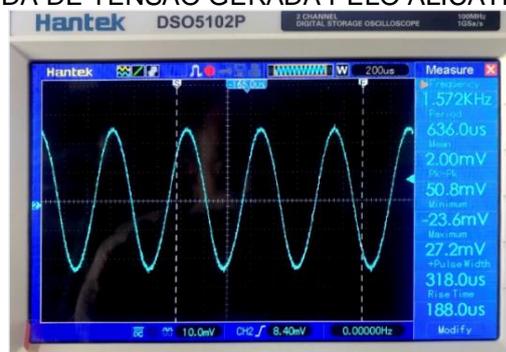
TABELA 3 - LEVANTAMENTO DAS CARACTERÍSTICAS DO SINAL GERADO PELO ALICATE TERRÔMETRO.

Resistor			Multímetro 117			UT-278			Osciloscópio 100MHz + Probe AM503A					
R (Ω)			R (Ω)			R (Ω)			Freq. (Hz)	Vpp (V)	Ipp (A)	Rcalc. (Ω)		
0,0	±	0,0	0,00	±	0,07	0,00	±	0,00	1572	0,00000	3,52000	0,00	±	0,00
0,3	±	0,0	0,30	±	0,07	0,31	±	0,01	1572	0,05480	0,17600	0,31	±	0,01
1,0	±	0,1	0,98	±	0,07	0,96	±	0,02	1572	0,05560	0,05760	0,97	±	0,04
15,0	±	0,8	14,9	±	0,07	14,9	±	0,3	1572	0,05640	0,00380	14,8	±	0,6
47,0	±	2,4	46,2	±	0,07	46,2	±	0,8	1572	0,05600	0,00128	43,8	±	4,4
82,0	±	4,1	81,5	±	0,07	81,5	±	1,7	1572	0,05600	0,00075	75,1	±	7,5

FONTE: O autor (2021).

Conforme se depreende da Tabela 3 e da Figura 30, o sinal elétrico gerado pelo instrumento é caracterizado por forma de onda senoidal, amplitude constante de aproximadamente 0,028 V e frequência de 1572 Hz independente da magnitude da resistência R utilizada para o circuito de medição da Figura 24.

FIGURA 30 – FORMA DE ONDA DE TENSÃO GERADA PELO ALICATE TERRÔMETRO UT-278A



FONTE: O autor (2021).

Conforme se observa das especificações técnicas do alicate terrômetro UT-278A, colecionada na Tabela 4, concluí-se que este instrumento não é recomendado para medições de resistências de aterramento acima de 395 ohms.

Visto que as resistências dos laços de medição do sistema de aterramento do parque de estudo não ultrapassam 49,9 ohms, o instrumento pode ser utilizado para o estudo de caso.

TABELA 4 – ESPECIFICAÇÕES DO ALICATE TERRÔMETRO UT-278A

UT-278A	Faixa	Melhor precisão
Resistência de aterramento (Ω)	0.01 Ω -0.099 Ω	$\pm (1\%+0.01)$
	0.1 Ω -0.99 Ω	$\pm (1\%+0.01)$
	1.0 Ω -49.9 Ω	$\pm (1\%+0.1)$
	50 Ω -99.5 Ω	$\pm (2\%+0.5)$
	100 Ω -199 Ω	$\pm (3\%+1)$
	200 Ω -395 Ω	$\pm (6\%+5)$
	400 Ω -590 Ω	$\pm (10\%+10)$
	600 Ω -800 Ω	$\pm (20\%+20)$
	800 Ω -1200 Ω	$\pm (25\%+30)$

FONTE: Uni Trend Technology China Co Ltd (2020).

5.2 MODELAGEM ELÉTRICA DO ESTUDO DE CASO.

Para modelar o sistema de aterramento do complexo eólico, foi utilizado um modelo de parâmetro concentrado proposto por Jenkins e Vaudin (1993) onde cada seção de eletrodo horizontal é representada por um modelo concentrado π . A Figura 19 mostra dois nós do modelo adotado. Este modelo também é adotado pela ABB em seus projetos de sistemas de aterramento (ABB PSGS, 2012).

A resistência de aterramento de cada seção de eletrodo horizontal R_p , é calculada de acordo com a equação (17) e a autoimpedância de cada seção de eletrodo horizontal Z_s é calculada pela reformulação da equação de Carsons (18).

A Tabela 5 contém os valores de Z_s , R_p , L_s e R_s calculados para cada seção de eletrodo horizontal do complexo eólico São Bento do Norte. No circuito elétrico equivalente do sistema de aterramento do parque, são inseridos os valores de resistência de aterramento R_p , da resistência série R_s e indutância série L_s de cada

cada seção de eletrodo horizontal do parque em estudo. Os valores de R_s e L_s são obtidos a partir dos valores da autoimpedância Z_s calculada para a frequência de 50 Hz segundo a equação (18).

TABELA 5- VALORES DAS GRANDEZAS ELÉTRICAS DOS ELETRODOS HORIZONTAIS DO COMPLEXO SÃO BENTO DO NORTE

ELETRODOS HORIZONTAIS					
DE	PARA	R_p (Ω)	Z_s (Ω) @ 50Hz	R_s (Ω)	L_s (mH)
OD01	-	35,84	0,0184+0,0672i	0,0184	0,2139
OD01	SB01	5,68	0,069+0,243i	0,0690	0,7735
SB01	SB02	12,39	0,0805+0,29225i	0,0805	0,9303
SB02	SB03	10,81	0,0736+0,2512i	0,0736	0,7996
SB03	SB05	6,10	0,184+0,676i	0,1840	2,1518
SB05	SB04	8,52	0,069+0,2475i	0,0690	0,7878
SB04	OD02	55,84	0,1196+0,468i	0,1196	1,4897
OD02	SB09	17,74	0,3128+1,2104i	0,3128	3,8528
OD02	OD04	19,99	0,3772+1,476i	0,3772	4,6983
OD02	OD03	88,22	0,0713+0,279i	0,0713	0,8881
OD03	SB06	75,48	0,0851+0,333i	0,0851	1,0600
SB06	SB08	32,15	0,161+0,623i	0,1610	1,9831
SB08	SB07	34,05	0,069+0,261i	0,0690	0,8308
SB07	-	71,67	0,0184+0,0688i	0,0184	0,2190
OD04	SB10	25,42	0,0782+0,2924i	0,0782	0,9307
SB10	SB11	5,68	0,069+0,243i	0,0690	0,7735
SB11	-	143,34	0,0184+0,0704i	0,0184	0,2241
SB09	SE	63,48	0,1035+0,405i	0,1035	1,2892
SB09	OD14	39,84	0,1265+0,4895i	0,1265	1,5581
SB09	OD15	46,78	0,0667+0,2552i	0,0667	0,8123
OD15	-	17,92	0,0184+0,0648i	0,0184	0,2063
OD14	SB15	39,83	0,1748+0,684i	0,1748	2,1772
SB15	SB14	90,81	0,069+0,27i	0,0690	0,8594
SB14	OD10	27,03	0,1955+0,7565i	0,1955	2,4080
SB14	SB13	68,11	0,069+0,267i	0,0690	0,8499
SB13	-	143,34	0,0184+0,0704i	0,0184	0,2241
OD10	OD09	8,52	0,069+0,2475i	0,0690	0,7878
OD10	OD11	51,46	0,1311+0,513i	0,1311	1,6329
OD11	OD12	13,32	0,0575+0,21i	0,0575	0,6685
OD12	OD13	6,43	0,1311+0,4617i	0,1311	1,4696
OD13	-	1,12	0,0184+0,0568i	0,0184	0,1808
OD09	OD08	44,11	0,0713+0,2728i	0,0713	0,8683
OD08	OD07	10,44	0,0759+0,2772i	0,0759	0,8824
OD07	SB12	35,23	0,092+0,352i	0,0920	1,1205
SB12	OD06	32,38	0,1012+0,3872i	0,1012	1,2325
OD06	OD05	96,49	0,0644+0,252i	0,0644	0,8021
OD05	-	143,34	0,0184+0,0704i	0,0184	0,2241

FONTE: O autor (2021)

Os valores das resistências de aterramento R_f das turbinas eólicas foram obtidos do projeto do sistema de aterramento podendo ser visualizados na Tabela 6.

Como havia de se esperar, embora a área de solo ocupada por cada turbina seja pequena, as condições e a resistividade dos solos variam consideravelmente em um parque com tamanhas dimensões (vários quilômetros quadrados), fazendo com que os valores das resistências de aterramento das turbinas também variem substancialmente, apresentando valores que vão de 0,2221 a 45,2240 ohms.

TABELA 6 – RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO DOS AEROGERADORES DO COMPLEXO EÓLICO SÃO BENTO DO NORTE

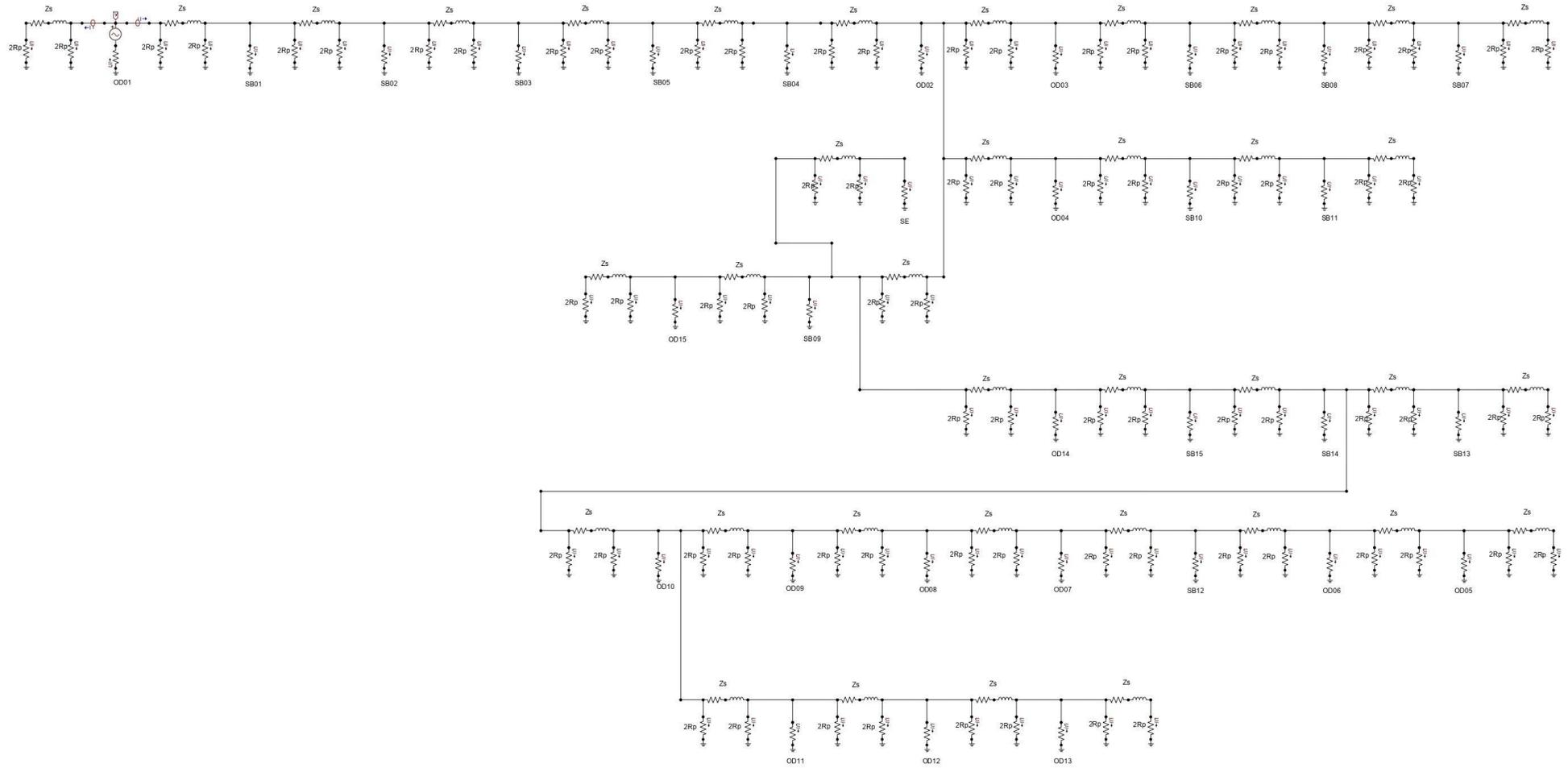
Aerogerador	R_f (Ohm)	Aerogerador	R_f (Ohm)
OD01	2,3920	OD15	3,1659
SB01	1,8808	OD14	27,6600
SB02	5,7783	SB15	0,7353
SB03	0,2221	SB14	6,4363
SB05	1,0471	SB13	1,1123
SB04	1,0138	OD10	12,1390
OD02	4,0268	OD11	12,9940
OD03	0,8332	OD12	15,4790
SB06	3,5515	OD13	0,4231
SB08	0,6498	OD09	0,3420
SB07	3,1760	OD08	1,4220
OD04	17,5980	OD07	20,5900
SB10	1,3877	SB12	4,4570
SB11	1,2352	OD06	45,2240
SB09	2,4319	OD05	3,8429

FONTE: O autor (2021)

No modelo de simulação de computador, o alicate terrômetro é representado por uma fonte de tensão senoidal constante de 0,028V de amplitude em série com a resistência de aterramento da turbina eólica sob ensaio.

A Figura 31 apresenta o circuito equivalente do sistema de aterramento do parque eólico, construído após a modelagem elétrica de todos seus elementos componentes.

FIGURA 31 - MODELO ELÉTRICO DO SISTEMA DE ATERRAMENTO DO COMPLEXO EÓLICO SÃO BENTO DO NORTE.



FONTE: O autor (2021).

5.3 MÉTODO DIRETO APLICADO AO ESTUDO DE CASO.

Nesta etapa é realizada a análise computacional do uso direto das medições obtidas com o método do alicate terrômetro para estimativa das resistências de aterramento dos aerogeradores do parque eólico São Bento do Norte.

Simulações computacionais do circuito equivalente do sistema de aterramento do parque eólico (Figura 31) são realizadas, no Atpdraw®, para analisar o comportamento do erro de medição em função das frequências de operação do instrumento em 0 Hz, 1 kHz, 1,572 kHz e 3,5 kHz.

A frequência de 0 Hz é utilizada para analisar o erro de medição na condição ideal padrão (circuito puramente resistivo), sugerido pela equação (11). Esta é uma condição de simulação hipotética usada apenas para fins de análise. A operação do alicate terrômetro na frequência de corrente contínua 0 Hz não é possível devido às características de operação de seu circuito elétrico que funciona com corrente alternada.

As frequências de 1 kHz e 3,5 kHz fornecem os valores operacionais mínimos e máximos que podem ser encontrados nos alicates terrômetros comerciais. Por outro lado, 1,572 kHz é a frequência operacional do instrumento do alicate terrômetro modelo UT-278A.

A Tabela 7 fornece uma visão geral dos valores das resistências de aterramento das turbinas eólicas organizados em ordem crescente de magnitude com os seus respectivos erros de medição obtidos com o método do alicate terrômetro nas frequências de 0 Hz, 1 kHz, 1,572 kHz e 3,5 kHz. A variável R_f corresponde às resistências de aterramento dos aerogeradores e variável R_{med} corresponde aos seus respectivos valores medidos com o uso do método direto do alicate terrômetro nas frequências de operação do instrumento. Os erros de medição são calculados de acordo com a equação (25).

TABELA 7 - RESULTADOS OBTIDOS COM O MÉTODO DIRETO DO ALICATE TERRÔMETRO.

Aerogerador	Rf (Ω)	Frequência da corrente de ensaio (Hz) - Método Direto							
		0 Hz Ⓢ		1000 Hz		1572 Hz		3500 Hz	
		Rmed (Ω)	Erro (%)	Rmed (Ω)	Erro (%)	Rmed (Ω)	Erro (%)	Rmed (Ω)	Erro (%)
SB03	0,2221	0,4878	119,6%	3,7383	1583,2%	4,7417	2035,0%	6,5109	2831,5%
OD09	0,3420	0,5653	65,3%	3,2672	855,3%	4,5089	1218,4%	7,6315	2131,4%
OD13	0,4231	0,7444	75,9%	1,4694	247,3%	1,5752	272,3%	1,8868	345,9%
SB08	0,6498	1,0110	55,6%	4,3716	572,8%	6,1276	843,0%	11,9174	1734,0%
SB15	0,7353	0,9538	29,7%	5,8412	694,4%	8,1609	1009,9%	14,3186	1847,3%
OD03	0,8332	1,0132	21,6%	4,1543	398,6%	5,6440	577,4%	10,8928	1207,3%
SB04	1,0138	1,1718	15,6%	3,7685	271,7%	5,3435	427,1%	9,3975	827,0%
SB05	1,0471	1,2074	15,3%	3,8043	263,3%	5,0679	384,0%	6,9930	567,8%
SB13	1,1123	1,3699	23,2%	8,1159	629,7%	11,2157	908,3%	19,3839	1642,7%
SB11	1,2352	1,6721	35,4%	5,0314	307,3%	6,7747	448,5%	9,7527	689,6%
SB10	1,3877	1,7560	26,5%	4,0787	193,9%	5,0955	267,2%	7,3318	428,3%
OD08	1,4220	1,6241	14,2%	4,1237	190,0%	5,6281	295,8%	9,3023	554,2%
SB01	1,8808	2,1212	12,8%	4,0816	117,0%	5,0496	168,5%	7,2595	286,0%
OD01	2,3920	2,6897	12,4%	5,9335	148,1%	7,3510	207,3%	9,6203	302,2%
SB09	2,4319	2,6465	8,8%	4,3546	79,1%	5,2582	116,2%	8,3333	242,7%
OD15	3,1659	3,4398	8,7%	7,3002	130,6%	9,2075	190,8%	13,4003	323,3%
SB07	3,1760	3,4934	10,0%	6,7389	112,2%	9,4149	196,4%	17,5659	453,1%
SB06	3,5515	3,7483	5,5%	6,1356	72,8%	8,3074	133,9%	15,7746	344,2%
OD05	3,8429	4,3277	12,6%	13,7727	258,4%	18,1641	372,7%	28,0280	629,3%
OD02	4,0268	4,1574	3,2%	5,5227	37,1%	6,7756	68,3%	10,8004	168,2%
SB12	4,4570	4,7782	7,2%	8,3807	88,0%	10,6484	138,9%	16,5046	270,3%
SB02	5,7783	5,9505	3,0%	7,1556	23,8%	8,2852	43,4%	11,7994	104,2%
SB14	6,4363	6,6038	2,6%	7,3549	14,3%	8,0680	25,4%	11,4309	77,6%
OD10	12,1390	12,2780	1,1%	13,4325	10,7%	14,4928	19,4%	17,8401	47,0%
OD11	12,9940	13,1765	1,4%	15,8865	22,3%	16,9954	30,8%	20,1439	55,0%
OD12	15,4790	15,6687	1,2%	18,2470	17,9%	19,1650	23,8%	20,9111	35,1%
OD04	17,5980	17,8857	1,6%	19,9359	13,3%	21,7138	23,4%	28,0000	59,1%
OD07	20,5900	20,8256	1,1%	22,3196	8,4%	23,2365	12,9%	26,9101	30,7%
OD14	27,6600	27,8746	0,8%	29,6610	7,2%	31,4961	13,9%	39,4089	42,5%
OD06	45,2240	45,6026	0,8%	47,3373	4,7%	47,7816	5,7%	50,1343	10,9%

FONTE: Giacomelli et al. (2021).

5.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS COM O MÉTODO DIRETO APLICADO AO ESTUDO DE CASO.

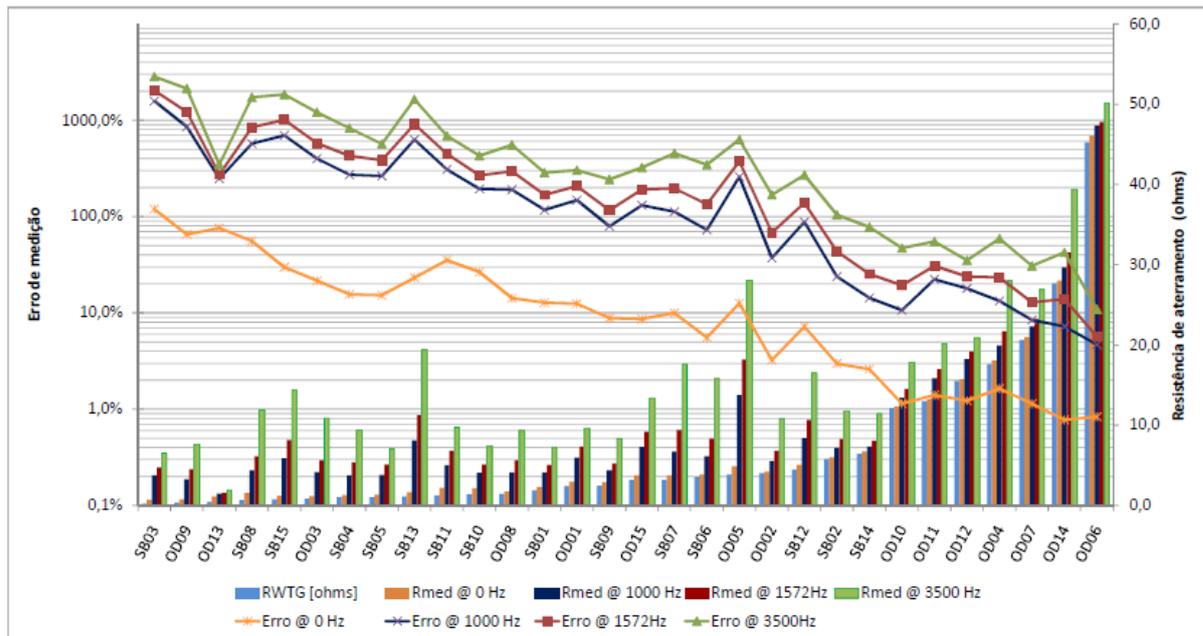
Conforme se depreende da Tabela 7, mesmo em alicates terrômetros com frequência de operação próximas à frequência industrial, o erro de medição das resistências de aterramento dos aerogeradores é elevado e sempre positivo, ou seja, o valor será lido pelo instrumento será sempre maior que o valor real.

Este erro é devido ao emprego do método de medição direto no qual a resistência de aterramento lida pelo instrumento é a soma da resistência da malha do aerogerador sob ensaio com a resistência de aterramento equivalente dos caminhos de aterramento paralelos. Neste caso, a condição de que a resistência equivalente dos caminhos paralelos seja desprezível em relação a resistência de aterramento sob ensaio, sugerida pela equação (14), não é atendida, diminuindo a exatidão da medição. (GIACOMELLI et al., 2021).

Conforme se depreende do gráfico da Figura 32, o erro de medição do método direto também é diretamente proporcional à frequência da corrente de ensaio. Isso se

deve à reatância indutiva dos longos eletrodos de aterramento horizontais instalados no parque. À medida que a reatância dos eletrodos horizontais aumenta em função da frequência da corrente de ensaio, o erro de medição também se eleva.

FIGURA 32 - ERRO DO MÉTODO DIRETO DO ALICATE TERRÔMETRO EM DIFERENTES FREQUÊNCIAS DE TESTE POR AEROGERADOR DO PARQUE SÃO BENTO DO NORTE.



FONTE: Giacomelli et al. (2021).

O erro de medição também depende da resistência de aterramento dos eletrodos horizontais imediatamente adjacentes ao aerogerador sob ensaio. Quanto maior a frequência da corrente de teste, maior será o erro de medição introduzido por este efeito. A razão para isso é que o aumento da frequência da corrente de teste aumenta a reatância do sistema, causando um efeito de desacoplamento com o restante do circuito do sistema de aterramento do parque eólico. Porém, mesmo com esse desacoplamento, o valor a ser medido pelo alicate terrômetro ainda levará em consideração a magnitude da resistência de aterramento dos eletrodos de aterramento horizontais adjacentes conectados diretamente à turbina eólica sob ensaio. Portanto quanto maior o comprimento deste eletrodo horizontal, maior será o valor da resistência medida pelo instrumento e, conseqüentemente, maior o erro de medição (GIACOMELLI et al., 2021).

Como foram encontrados erros de medição fora da faixa de tolerância de +- 10% em relação as resistências de projeto dos aerogeradores, conclui-se que o

método direto do alicate terrômetro não pode ser utilizado para medição da resistência de aterramento dos aerogeradores do parque eólico em estudo. Neste sentido, faz-se necessária a aplicação da próxima etapa do método proposto.

5.5 MÉTODO INDIRETO APLICADO AO ESTUDO DE CASO.

Nesta etapa é realizada a simulação, aplicação de metodologia numérica e análise computacional para avaliação do uso indireto das medições obtidas com o alicate terrômetro acoplado ao condutor de descida da malha de aterramento de um aerogerador e aos eletrodos horizontais que o interligam às outras componentes do sistema de aterramento do Parque Eólico São Bento do Norte, para obtenção de sua resistência de aterramento.

Simulações computacionais do circuito equivalente do parque eólico (Figura 31) são realizadas no Atpdraw®, para analisar o comportamento do erro de medição em função das frequências de operação em 0 Hz e 1,572 kHz.

Conforme já enfatizado no capítulo 5.3, a frequência de 0 Hz é utilizada para analisar o erro de medição na condição ideal padrão (circuito puramente resistivo) sendo uma condição de simulação hipotética usada apenas para fins de análise. Por outro lado, 1,572 kHz é a frequência operacional do instrumento do alicate terrômetro modelo UT-278A.

A Tabela 8 fornece uma visão geral dos valores das resistências de aterramento das turbinas eólicas organizados em ordem crescente de magnitude com os seus respectivos erros de medição obtidos com o método do alicate terrômetro nas frequências de 0 Hz e 1,572 kHz. A variável R_f corresponde às resistências de aterramento dos aerogeradores e variável R_{med} corresponde aos seu respectivos valores medidos com o uso do método indireto do alicate terrômetro nas frequências de operação do instrumento. Os erros de medição são calculados de acordo com a equação (25).

TABELA 8 – RESULTADOS OBTIDOS COM O MÉTODO INDIRETO DO ALICATE TERRÔMETRO

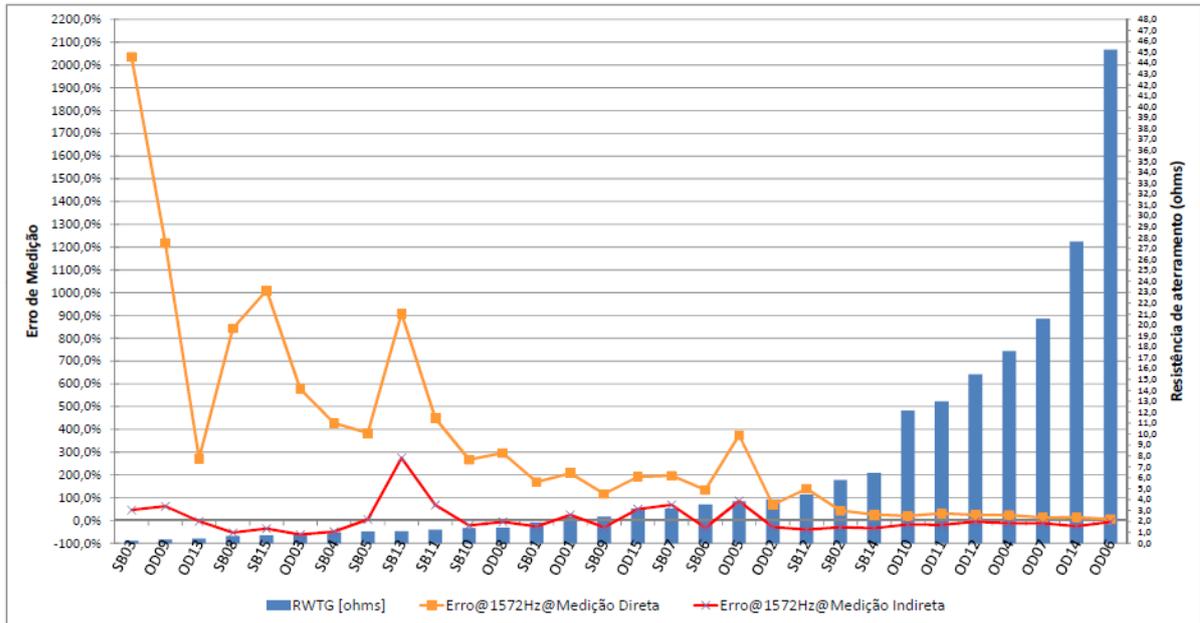
Aerogerador	Rf (Ω)	Frequência da corrente de ensaio (Hz) - Método Indireto			
		0 Hz \oplus		1572Hz	
		Rmed (Ω)	Erro (%)	Rmed (Ω)	Erro (%)
SB03	0,2221	0,2220	0,0%	0,3243	46,0%
OD09	0,3420	0,3419	0,0%	0,5555	62,4%
OD13	0,4231	0,4232	0,0%	0,4068	-3,8%
SB08	0,6498	0,6497	0,0%	0,3003	-53,8%
SB15	0,7353	0,7350	0,0%	0,4702	-36,1%
OD03	0,8332	0,8332	0,0%	0,3148	-62,2%
SB04	1,0138	1,0137	0,0%	0,5175	-49,0%
SB05	1,0471	1,0468	0,0%	1,0901	4,1%
SB13	1,1123	1,1067	-0,5%	4,1643	274,4%
SB11	1,2352	1,2235	-0,9%	2,0725	67,8%
SB10	1,3877	1,3880	0,0%	1,0845	-21,8%
OD08	1,4220	1,4217	0,0%	1,3351	-6,1%
SB01	1,8808	1,8804	0,0%	1,3827	-26,5%
OD01	2,3920	2,3876	-0,2%	2,9740	24,3%
SB09	2,4319	2,4320	0,0%	1,6935	-30,4%
OD15	3,1659	3,1645	0,0%	4,7244	49,2%
SB07	3,1760	3,1622	-0,4%	5,3544	68,6%
SB06	3,5515	3,5519	0,1%	2,3891	-32,7%
OD05	3,8429	3,8872	1,2%	7,1191	85,3%
OD02	4,0268	4,0267	0,0%	2,8494	-29,2%
SB12	4,4570	4,4585	0,1%	2,6718	-40,1%
SB02	5,7783	5,7782	0,0%	4,0266	-30,3%
SB14	6,4363	6,4362	0,0%	4,2096	-34,6%
OD10	12,1390	12,1398	0,0%	9,9898	-17,7%
OD11	12,9940	12,9855	-0,1%	10,4822	-19,3%
OD12	15,4790	15,4715	0,0%	14,5859	-5,8%
OD04	17,5980	17,5968	0,0%	15,4069	-12,5%
OD07	20,5900	20,5893	0,0%	18,0787	-12,2%
OD14	27,6600	27,7106	0,2%	20,5296	-25,8%
OD06	45,2240	45,2179	0,0%	42,2747	-6,5%

FONTE: O autor (2021).

5.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS COM O MÉTODO INDIRETO APLICADO AO ESTUDO DE CASO.

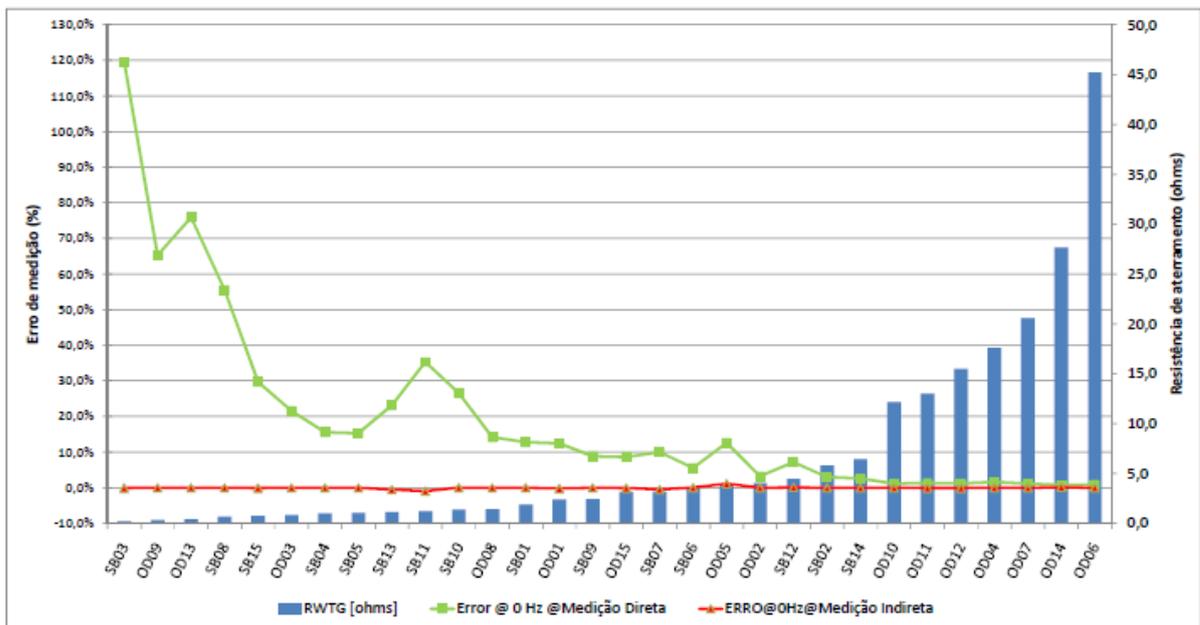
Conforme se depreende da Figura 34, o erro desta metodologia indireta independe do atendimento à condição necessária de uma resistência de aterramento do eletrodo sob ensaio R_x muito maior do que o caminho de retorno dos caminhos de aterramento paralelos sugeridos pela equação (14), sendo que, portanto, apresenta uma melhor precisão da medição em relação ao método direto. No entanto, o erro de medição aumenta à medida que a frequência da corrente de teste aumenta. Isso se deve à reatância indutiva dos longos eletrodos de aterramento horizontais, que é diretamente proporcional à frequência conforme se pode verificar na Figura 33 .

FIGURA 33 - COMPARAÇÃO ENTRE O USO DA MEDIÇÃO DIRETA E A INDIRETA DO MÉTODO DO ALICATE TERRÔMETRO NA FREQUÊNCIA DE 1572 HZ



FONTE: O autor (2021).

FIGURA 34 - COMPARAÇÃO ENTRE O USO DA MEDIÇÃO DIRETA E A INDIRETA DO MÉTODO DO ALICATE TERRÔMETRO NA FREQUÊNCIA DE 0 HZ



FONTE: O autor (2021).

Assim como no método direto, o erro de medição também depende da resistência de aterramento dos eletrodos horizontais imediatamente adjacentes ao aerogerador sob ensaio. Quanto maior a frequência da corrente de teste, maior será o erro de medição introduzido por este efeito. A razão é a mesma elencada no método

direto, ou seja, o aumento da frequência da corrente de teste aumenta a reatância do sistema, causando um efeito de desacoplamento com o restante do circuito do sistema de aterramento do parque eólico. Porém, mesmo com esse desacoplamento, o valor a ser medido pelo alicate terrômetro ainda levará em consideração a magnitude da resistência de aterramento dos eletrodos de aterramento horizontais adjacentes conectados diretamente à turbina eólica sob ensaio. Portanto quanto maior o comprimento deste eletrodo horizontal, maior será o valor da resistência medida pelo instrumento e, conseqüentemente, maior o erro de medição.

Em verdade, os erros negativos e positivos observados com o método indireto do alicate terrômetro são derivados do cômputo dos valores dos módulos das impedâncias em lugar dos valores das impedâncias dos laços de medição, visto que o alicate terrômetro apenas mensura o módulo da impedância obtida pela equação (11).

Visualiza-se neste ponto a necessidade de estudos futuros para o desenvolvimento de um alicate terrômetro que mensure o módulo da impedância e o ângulo de defasamento entre a tensão gerada e a corrente induzida no circuito de medição, desta forma medindo a impedância de aterramento do laço de medição.

Como foram encontrados erros de medição fora da faixa de tolerância de +- 10% em relação as resistências de projeto dos aerogeradores, conclui-se que o método indireto do alicate terrômetro não pode ser utilizado para medição da resistência de aterramento dos aerogeradores do parque eólico em estudo. Sendo assim, faz-se necessária a aplicação da próxima etapa do método proposto.

5.7 DESENVOLVIMENTO DE UMA SOLUÇÃO NUMÉRICA PARA O ESTUDO DE CASO.

Nesta etapa a solução numérica desenvolvida para mitigação dos erros de medição obtidos com o uso do método direto do alicate terrômetro para parques eólicos é aplicada para o sistema de aterramento do Parque Eólico de São Bento do Norte.

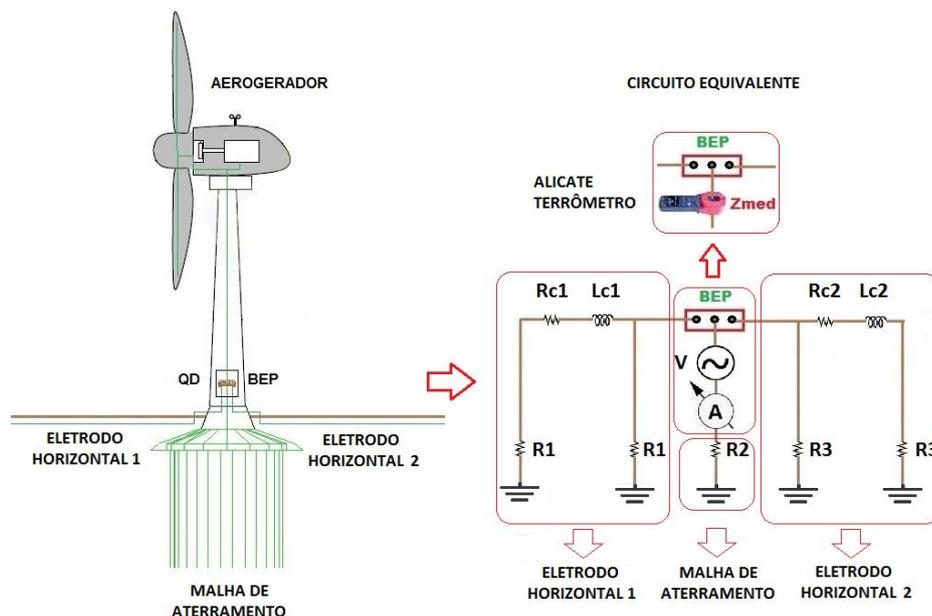
Devido às inúmeras derivações presentes no circuito equivalente do sistema de aterramento do parque, as quais dificultam a formulação do sistema de equações não lineares advindas da aplicação do método, esta etapa é aqui limitada para um

sistema de aterramento composto por uma malha de aterramento de aerogerador conectada a “n” eletrodos horizontais sendo, portanto, necessária a desconexão destes eletrodos horizontais junto aos demais aerogeradores adjacentes.

A ideia é obter o valor da resistência de aterramento do aerogerador a partir de informações advindas do projeto de aterramento do sistema de aterramento do parque eólico. Para o estudo de caso, estas informações são as características elétricas dos eletrodos horizontais como resistência série, resistência de aterramento (shunt) e indutância série dos mesmos.

A Figura 35 mostra um sistema de aterramento composto por uma malha de aterramento de aerogerador conectada a dois eletrodos horizontais. Ao lado do esquema de ligação do aterramento do aerogerador, está demonstrado o seu circuito equivalente.

FIGURA 35 – DIAGRAMA ESQUEMATICO DO SISTEMA DE ATERRAMENTO DE UM AEROGERADOR E O SEU CIRCUITO EQUIVALENTE



FONTE: O autor (2021).

A impedância de aterramento Z_{med} que será vista pelo alicate terrômetro é dada pela equação (31).

$$Z_{med} = R_2 + \left(\frac{1}{\frac{1}{R_1 + R_{c1} + j.w.L_{c1}} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3 + R_{c2} + j.w.L_{c2}} + \frac{1}{R_3}} \right) \quad (31)$$

Onde:

- R_1 : = 2 x Resistência de aterramento do eletrodo horizontal 1, em Ω .
- R_3 : = 2 x Resistência de aterramento do eletrodo horizontal 2, em Ω .
- R_2 : = Resistência de aterramento do aerogerador, em Ω .
- R_{c1} : = Resistência série do eletrodo horizontal 1, em Ω .
- R_{c2} : = Resistência série do eletrodo horizontal 2, em Ω .
- L_{c1} : = Indutância própria do eletrodo horizontal 1, em H.
- L_{c2} : = Indutância própria do eletrodo horizontal 2, em H.
- w : = frequência angular, em rad/s.
- Z_{med} : = Impedância de aterramento equivalente vista pelo alicate terrômetro, em Ω .

Sabe-se que o alicate terrômetro mensura o módulo da impedância de aterramento $|Z_{med}|$ e que esse pode ser obtido por meio da equação (32), onde R_{med} e X_{med} são os valores equivalentes da resistência e da reatância do circuito fechado de medição.

$$|Z_{med}| = \sqrt{R_{med}^2 + X_{med}^2} \quad (32)$$

Onde

$$Z_{med} = R_{med} + X_{med} \quad (33)$$

Uma vez isolada a parte real de Z_{med} na equação (31), obtêm-se R_{med} conforme equação (34).

$$R_{med} = \text{PARTE REAL} \left(R_2 + \left(\frac{1}{\frac{1}{R_1 + R_{c1} + j.w.L_{c1}} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3 + R_{c2} + j.w.L_{c2}} + \frac{1}{R_3}} \right) \right) \quad (34)$$

Isolando a parte imaginária de Z_{med} na equação (31), obtem-se X_{med} conforme equação (35).

$$X_{med} = \text{PARTE IMAG} \left(R2 + \left(\frac{1}{\frac{1}{R1+Rc1+j.w.Lc1} + \frac{1}{R1} + \frac{1}{R3+Rc2+j.w.Lc2} + \frac{1}{R3}} \right) \right) \quad (35)$$

Agora, com (34) e (35) em (32) obtêm-se $|Z_{med}|$ em (36).

$$|Z_{med}| = \sqrt{\left[\text{PARTE REAL} \left(R2 + \left(\frac{1}{\frac{1}{R1+Rc1+j.w.Lc1} + \frac{1}{R1} + \frac{1}{R3+Rc2+j.w.Lc2} + \frac{1}{R3}} \right) \right) \right]^2 + \left[\text{PARTE IMAG} \left(R2 + \left(\frac{1}{\frac{1}{R1+Rc1+j.w.Lc1} + \frac{1}{R1} + \frac{1}{R3+Rc2+j.w.Lc2} + \frac{1}{R3}} \right) \right) \right]^2} \quad (36)$$

Um algoritmo numérico baseado no método de Newton-Raphson é então desenvolvido na plataforma Matlab para se estimar o valor da resistência de aterramento $R2$ do aerogerador na equação (36) a partir do fornecimento dos valores dos parâmetros de projeto dos eletrodos horizontais a ele conectados ($Rc1$, $Rc2$, $Lc1$, $Lc2$, $R1$, $R3$) e do valor do módulo da impedância de aterramento lido pelo instrumento $|Z_{med}|$. Neste algoritmo, cada sistema de aterramento de aerogerador é tratado de forma isolada, sendo composto apenas por sua malha de aterramento e pelos eletrodos horizontais a ela conectados.

Os resultados da aplicação e validação do algoritmo podem ser visualizados na Tabela 9 onde R_f é a resistência de aterramento advinda do projeto do aerogerador, Z_{med} é o valor de leitura do instrumento, $R_{fsolução}$ é a resistência de aterramento estimada pelo algoritmo, e o erro de medição é definido pela equação (29).

TABELA 9 – RESULTADOS OBTIDOS COM O ALGORITMO NUM_SBN.M

Aerogerador	Rf (Ω)	Zmed (Ω)	Rf solução (Ω)	Erro (%)
SB03	0,2221	5,3191	0,2222	0,0319
OD09	0,3420	7,9258	0,3421	0,0285
OD13	0,4231	1,5607	0,4231	0,0053
SB08	0,6498	17,5347	0,6500	0,0232
SB15	0,7353	28,9856	0,7354	0,0124
OD03	0,8332	41,5772	0,8333	0,0129
SB04	1,0138	8,8694	1,0142	0,0386
SB05	1,0471	5,6184	1,0472	0,0103
SB13	1,1123	47,3377	1,1123	0,0022
SB11	1,2352	7,4265	1,2352	0,0025
SB10	1,3877	6,5598	1,3882	0,0385
OD08	1,4220	10,2887	1,4224	0,0301
SB01	1,8808	6,1819	1,8820	0,0621
OD01	2,3920	7,8721	2,3928	0,0334
SB09	2,4319	17,9203	2,4335	0,0652
OD15	3,1659	16,1464	3,1667	0,0254
SB07	3,1760	26,3570	3,1761	0,0043
SB06	3,5515	26,6617	3,5527	0,0345
OD05	3,8429	61,5427	3,8430	0,0019
OD02	4,0268	38,3854	4,0273	0,0121
SB12	4,4570	21,5163	4,4586	0,0348
SB02	5,7783	11,7925	5,7817	0,0594
SB14	6,4363	45,4062	6,4370	0,0108
OD10	12,1390	18,9919	12,1430	0,0326
OD11	12,9940	23,7585	12,9967	0,0204
OD12	15,4790	20,6016	15,4914	0,0801
OD04	17,5980	30,5897	17,6015	0,0196
OD07	20,5900	28,9744	20,5990	0,0435
OD14	27,6600	47,9251	27,6735	0,0489
OD06	45,2240	69,6912	45,2295	0,0122

FONTE: O autor (2021).

5.8 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS COM A SOLUÇÃO NUMÉRICA APLICADA AO ESTUDO DE CASO.

Conforme se observa na Tabela 9, o erro de medição com a adoção da solução numérica é desprezível apresentando resultado satisfatório em relação a este quesito. No entanto, a equação para obtenção do módulo de Zmed é de difícil obtenção, sendo por esta razão um fator dificultante para que a solução numérica seja extrapolada para número maior de aerogeradores interconectados com eletrodos horizontais.

Para que esta solução seja aplicada em campo, também é necessário observar o isolamento do sistema de aterramento sob ensaio das demais componentes do sistema de aterramento do parque eólico. Para um sistema de aterramento de 30 aerogeradores, como o estudo de caso, esta condição levaria à necessidade de 49

desconexões de eletrodos horizontais, gerando risco de acidentes e sobrecarga de trabalho para a equipe de manutenção, além de perdas econômicas devido à parada de geração de energia exigida para a devida execução do serviço.

Em face destas razões, este estudo prosseguirá para a próxima etapa do método proposto, investigando a possibilidade do uso de uma solução heurística que possibilite a estimativa dos valores das resistências de aterramento de aerogeradores do parque eólico, sem que haja a necessidade de tantas desconexões de eletrodos horizontais.

5.9 DESENVOLVIMENTO UMA SOLUÇÃO HEURÍSTICA PARA O ESTUDO DE CASO.

Uma solução heurística para mitigação dos erros encontrados no método direto com o alicate terrômetro é desenvolvida para o sistema de aterramento do Parque Eólico de São Bento do Norte que possui um sistema de aterramento composto por 30 malhas de aterramento de aerogeradores interconectadas em série através eletrodos horizontais.

A solução utiliza uma rede neural artificial para encontrar as resistências de aterramento dos aerogeradores a partir das leituras das impedâncias de aterramento do alicate terrômetro acoplado aos cabos de descida das malhas de aterramento dos aerogeradores.

Para criação do banco de dados que são utilizados para o treinamento da rede neural artificial, utiliza-se o algoritmo `aterrad3.m` que foi desenvolvido para simular computacionalmente a medição das impedâncias de aterramento dos aerogeradores através do método direto do alicate terrômetro.

As simulações computacionais do método direto e indireto do alicate terrômetro são realizadas com auxílio do software `Atpdraw®`. O uso desta ferramenta possui etapas distintas para a inserção dos dados de entrada, execução do programa, seleção e coleta das informações de interesse nos gráficos e cálculos para obtenção das saídas desejadas, o que despende, em média, uma vez já inseridos o esquema elétrico do circuito equivalente do parque eólico sob estudo, 5 minutos (Intel core i5 com 8GB de RAM) para a realização de cada simulação e coletas dos dados de interesse provenientes da sua execução. Tomando como exemplo o estudo de caso

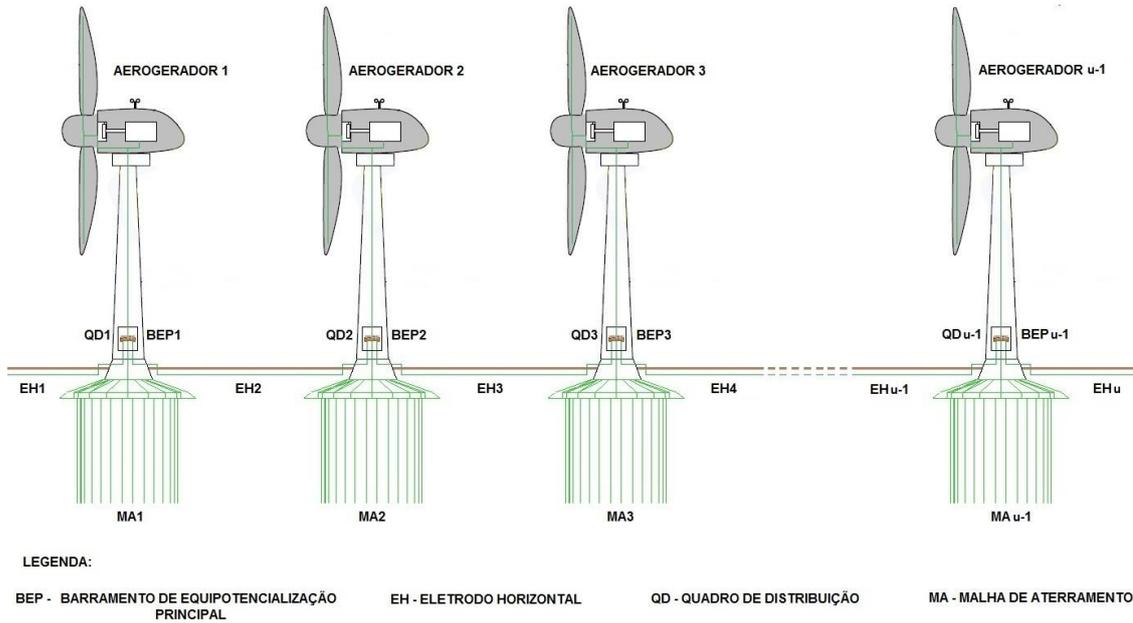
com 30 aerogeradores, seriam necessárias 30 simulações a cada conjunto de valores estipulados para as suas resistências de aterramento, demandando aproximadamente 150 minutos para a coleta dos resultados provenientes de apenas uma situação de projeto. Para um banco de dados com 100 amostras de entrada e saída, o tempo gasto com o uso desta ferramenta seria aproximadamente de 250 horas de trabalho.

Desenvolvido para otimização do tempo das etapas de inserção e extração de dados no processo de simulação computacional do método direto do alicate terrômetro no software Atpdraw®, o algoritmo aterrad3.m realiza o cálculo analítico, em ambiente Matlab®, dos valores de impedância a serem lidos pelo alicate terrômetro a partir dos dados de projeto de um determinado conjunto de aerogeradores interligados em série-cascata através eletrodos horizontais. Os parâmetros de entrada do algoritmo são os valores das impedâncias de aterramento dos aerogeradores, indutâncias, resistências séries e shunt dos eletrodos horizontais, assim como a frequência de operação e a magnitude da tensão do sinal gerado pelo alicate terrômetro. O algoritmo disponibiliza como dado de saída, os valores das impedâncias de aterramento a serem medida com o alicate terrômetro acoplado aos condutores de descida da malha de aterramento de cada aerogerador do circuito sob ensaio.

O algoritmo utiliza o método das correntes de malha para calcular analiticamente as correntes desconhecidas aplicando a Lei de Kirchhoff em cada malha do circuito obtendo um sistema, com “n” equações e “n” incógnitas, passível de resolução analítica.

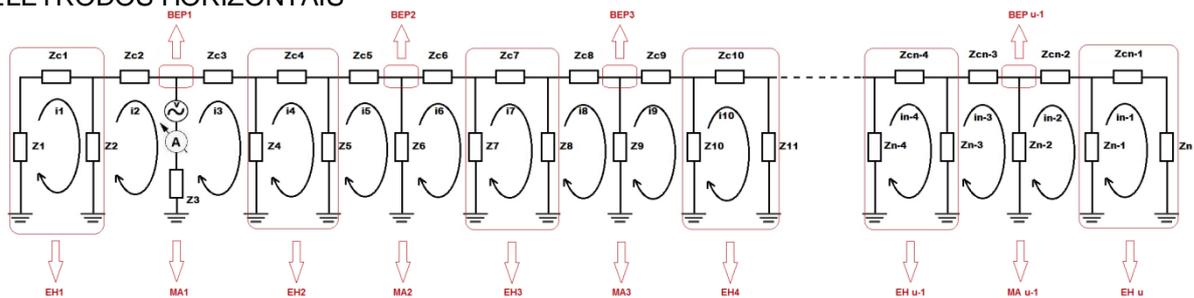
Para construção do entendimento da lógica de funcionamento do algoritmo, a Figura 37 apresenta o circuito equivalente do sistema de aterramento de um parque eólico cujas malhas de aterramento dos aerogeradores são interligadas por eletrodos horizontais. Os eletrodos horizontais foram representados por uma célula de parâmetros concentrados π . As variáveis de Z_1 à Z_n representam as impedâncias de aterramento dos aerogeradores e dos eletrodos horizontais. Já as variáveis de Z_{c1} à Z_{cn-1} representam as impedâncias série dos eletrodos horizontais, dos condutores aéreos para interconexão das malhas de aterramentos e dos condutores que interligam o eletrodo horizontal ao barramento de equipotencialização principal do aerogerador (BEP).

FIGURA 36 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO SISTEMA DE ATERRAMENTO DE UM PARQUE EÓLICO CUJAS MALHAS DE ATERRAMENTO DOS AEROGERADORES SÃO INTERLIGADAS POR ELETRODOS HORIZONTAIS



FONTE: O autor (2021).

FIGURA 37 - CIRCUITO EQUIVALENTE DO SISTEMA DE ATERRAMENTO DE UM PARQUE EÓLICO CUJAS MALHAS DE ATERRAMENTO DOS AEROGERADORES SÃO INTERLIGADAS POR ELETRODOS HORIZONTAIS



FONTE: O autor (2021).

A estrutura matricial do sistema de equações das malhas do circuito da Figura 37 é demonstrada na Figura 38.

FIGURA 38 – ESTRUTURA MATRICIAL ALGORITMO ATERRAD3.M

$$\begin{bmatrix}
 Z1+Zc1+Z2 & -Z2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\
 -Z2 & Z2+Zc2+Z3 & -Z3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\
 0 & -Z3 & Z3+Zc3+Z4 & -Z4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\
 0 & 0 & -Z4 & Z4+Zc4+Z5 & -Z5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\
 0 & 0 & 0 & -Z5 & Z5+Zc5+Z6 & -Z6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -Z6 & Z6+Zc6+Z7 & -Z7 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -Z7 & Z7+Zc7+Z8 & -Z8 & 0 & 0 & 0 & \dots \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -Z8 & Z8+Zc8+Z9 & -Z9 & 0 & 0 & \dots \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -Z9 & Z9+Zc9+Z10 & -Z10 & 0 & \dots \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -Z10 & Z10+Zc10+Z11 & -Z11 & \dots \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -Z11 & \dots & \dots \\
 \vdots & Zn-1+Zcn-1+Zn
 \end{bmatrix}
 \times
 \begin{bmatrix}
 i1 \\
 i2 \\
 i3 \\
 i4 \\
 i5 \\
 i6 \\
 i7 \\
 i8 \\
 i9 \\
 i10 \\
 \vdots \\
 in-1
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 0 \\
 -v \\
 +v \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 \vdots \\
 0
 \end{bmatrix}$$

FONTE: O autor (2021).

Uma vez inseridos os valores das variáveis de entrada, o algoritmo gera as matrizes impedância, corrente e tensão do circuito e efetua a operação de multiplicação entre a inversa da matriz impedância e a matriz tensão. O resultado desta operação é então igualado à matriz corrente, encontrando desta forma os valores das correntes de malha do circuito.

No circuito da Figura 37, a impedância que deverá ser percebida pelo alicate terrômetro quando acoplado ao cabo de descida do aterramento do aerogerador 1 é obtida pela equação (37):

$$|Zmed1| = \frac{v}{i2 - i3} \tag{37}$$

Onde:

- $|Zmed1|$ = Módulo da impedância percebida pelo alicate terrômetro quando acoplado ao cabo de descida do aterramento do aerogerador 1, em Ω .
- v = Amplitude máxima da tensão do sinal gerado no circuito pelo alicate terrômetro, em V.
- $i2, i3$ = Amplitude máxima de corrente nas malhas 2 e 3 do circuito, em A.

O algoritmo efetua uma simulação computacional a cada novo posicionamento do alicate terrômetro ao longo do circuito elétrico equivalente do parque eólico, uma para cada aerogerador. Encontrando desta forma todos os valores das impedâncias que serão percebidas pelo instrumento de medição nos diversos aerogeradores que compõe o parque eólico.

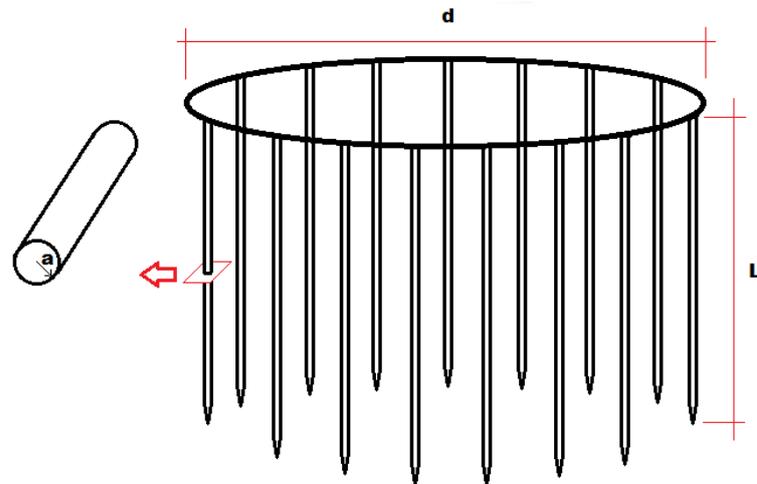
Esta metodologia analítica de simulação computacional pode ser aplicada no comissionamento ou nas rotinas de avaliação periódicas do sistema de aterramento dos parques eólico de energia. Uma vez que os valores de leitura obtidos através o método direto do alicate terrômetro sejam coletados em campo, pode-se realizar uma análise comparativa entre os valores das resistências de aterramento obtidas via `aterrad3.m` e as de projeto. Diferenças entre os valores de projeto da resistência de aterramento dos aerogeradores e seus valores reais após a execução da obra do sistema de aterramento do parque eólico podem ser indicativas de não conformidades ou de que algum processo de deterioração possa estar ocorrendo.

Uso de materiais diferentes dos especificados em projeto, alteração de quantidade e dimensão dos materiais empregados e dos valores de resistividade do solo, podem estar entre causas destas discrepâncias entre o sistema projetado e o executado.

Um estudo de sensibilidade de fatores que influenciam as resistências de aterramento dos aerogeradores foi conduzido sob o projeto de aterramento do Parque Eólico São Bento do Norte. Este estudo permitiu analisar o comportamento da resistência de aterramento diante da variação dos parâmetros mais relevantes que a influenciam. De acordo com Visacro Filho (2019), de uma forma genérica pode-se resumir todos estes fatores em geometria dos eletrodos e resistividade do solo nas adjacências dos eletrodos. Quanto a geometria dos eletrodos, pode se considerar suas dimensões, forma, número empregado, o posicionamento relativo e o espaçamento entre eles.

A Figura 39 apresenta uma configuração semelhante à malha de aterramento dos aerogeradores do parque eólico São Bento do Norte que será usado para análise de sensibilidade dos parâmetros que influenciam seu valor da resistência de aterramento.

FIGURA 39 - TIPO DE ATERRAMENTO USADO NA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE



FONTE: Adaptado de Visacro Filho (2019).

A expressão para o cálculo da resistência de aterramento para a configuração do aterramento em n hastas verticais dispostas em anel é dada pela equação (38) (VISACRO FILHO, 2019).

$$Rf = \frac{1}{n} \cdot \frac{\rho_a}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \left(Ln \frac{4 \cdot L}{a} - 1 + \frac{L}{d} \cdot Ln \frac{2 \cdot n}{\pi} \right) \quad (38)$$

Onde:

- Rf := Resistência de aterramento da configuração de aterramento, em m.
- n := Número de hastas de aterramento.
- L := Comprimento das hastas de aterramento, em m.
- ρ_a := Resistividade aparente do solo, em $\Omega \cdot m$.
- a := Raio da haste de aterramento, em m.
- d := Profundidade de sepultamento do anel de interligação das hastas, em m.

Na Tabela 10 estão contidos os valores de resistência de aterramento Rf calculados pela equação (38) para 20 (vinte) dos aerogeradores do parque São Bento do Norte.

TABELA 10 – CÁLCULO DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO DOS AEROGERADORES DO PARQUE SÃO BENTO DO NORTE.

Aerogerador	n	pa ($\Omega \cdot m$)	L (m)	a (m)	d (m)	Rf (Ω)
OD1	28	231,07	15,00	0,0055	2,80	2,08
OD2	28	325,60	15,00	0,0055	2,80	2,93
OD3	28	60,86	15,00	0,0055	2,80	0,55
OD4	28	1990,31	15,00	0,0055	2,80	17,90
OD5	28	274,08	15,00	0,0055	2,80	2,46
OD6	28	5120,00	15,00	0,0055	2,80	46,04
OD8	28	110,34	15,00	0,0055	2,80	0,99
OD9	28	28,24	15,00	0,0055	2,80	0,25
OD10	28	1119,71	15,00	0,0055	2,80	10,07
SB1	28	173,27	15,00	0,0055	2,80	1,56
SB2	28	594,48	15,00	0,0055	2,80	5,35
SB3	28	25,50	15,00	0,0055	2,80	0,23
SB4	28	76,42	15,00	0,0055	2,80	0,69
SB7	28	307,28	15,00	0,0055	2,80	2,76
SB8	28	60,00	15,00	0,0055	2,80	0,54
SB9	28	184,44	15,00	0,0055	2,80	1,66
SB10	28	94,81	15,00	0,0055	2,80	0,85
SB11	28	76,44	15,00	0,0055	2,80	0,69
SB13	28	78,12	15,00	0,0055	2,80	0,70
SB15	28	56,81	15,00	0,0055	2,80	0,51

FONTE: O autor (2021).

A Tabela 11 contém os valores mínimos e máximos das resistências de aterramento dos aerogeradores obtidos para uma condição de variação de $\pm 30\%$ de seus parâmetros.

TABELA 11 – ESTUDO DE SENSIBILIDADE DOS FATORES QUE INFLUENCIAM A RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO

Aerogerador	Variação dos parâmetros que influenciam a resistência de aterramento do aerogerador													
	n		pa ($\Omega \cdot m$)		L (m)		d (m)		a (m)		Rfvar (Ω)		Erro=(Rfvar-Rf)/Rf (%)	
	-30%	+30%	-30%	+30%	-30%	+30%	-30%	+30%	-30%	+30%	Mínimo	Máximo	Rfmínimo	Rfmáximo
OD1	19	36	161,75	300,39	10,50	19,50	1,96	3,64	0,0039	0,0072	0,92	5,19	-56%	150%
OD2	19	36	227,92	423,28	10,50	19,50	1,96	3,64	0,0039	0,0072	1,30	7,31	-56%	150%
OD3	19	36	42,60	79,12	10,50	19,50	1,96	3,64	0,0039	0,0072	0,24	1,37	-56%	150%
OD4	19	36	1393,22	2587,40	10,50	19,50	1,96	3,64	0,0039	0,0072	7,92	44,69	-56%	150%
OD5	19	36	191,85	356,30	10,50	19,50	1,96	3,64	0,0039	0,0072	1,09	6,15	-56%	150%
OD6	19	36	3584,00	6656,00	10,50	19,50	1,96	3,64	0,0039	0,0072	20,38	114,97	-56%	150%
OD8	19	36	77,24	143,45	10,50	19,50	1,96	3,64	0,0039	0,0072	0,44	2,48	-56%	150%
OD9	19	36	19,76	36,71	10,50	19,50	1,96	3,64	0,0039	0,0072	0,11	0,63	-56%	150%
OD10	19	36	783,80	1455,63	10,50	19,50	1,96	3,64	0,0039	0,0072	4,46	25,14	-56%	150%
SB1	19	36	121,29	225,25	10,50	19,50	1,96	3,64	0,0039	0,0072	0,69	3,89	-56%	150%
SB2	19	36	416,14	772,83	10,50	19,50	1,96	3,64	0,0039	0,0072	2,37	13,35	-56%	150%
SB3	19	36	17,85	33,15	10,50	19,50	1,96	3,64	0,0039	0,0072	0,10	0,57	-56%	150%
SB4	19	36	53,49	99,34	10,50	19,50	1,96	3,64	0,0039	0,0072	0,30	1,72	-56%	150%
SB7	19	36	215,10	399,47	10,50	19,50	1,96	3,64	0,0039	0,0072	1,22	6,90	-56%	150%
SB8	19	36	42,00	78,00	10,50	19,50	1,96	3,64	0,0039	0,0072	0,24	1,35	-56%	150%
SB9	19	36	129,11	239,77	10,50	19,50	1,96	3,64	0,0039	0,0072	0,73	4,14	-56%	150%
SB10	19	36	66,37	123,26	10,50	19,50	1,96	3,64	0,0039	0,0072	0,38	2,13	-56%	150%
SB11	19	36	53,51	99,37	10,50	19,50	1,96	3,64	0,0039	0,0072	0,30	1,72	-56%	150%
SB13	19	36	54,68	101,55	10,50	19,50	1,96	3,64	0,0039	0,0072	0,31	1,75	-56%	150%
SB15	19	36	39,77	73,86	10,50	19,50	1,96	3,64	0,0039	0,0072	0,23	1,28	-56%	150%

FONTE: O autor (2021).

O valor máximo para a resistência de aterramento do aerogerador $R_{f\max}$ é definido pela pior condição dos fatores que a influenciam e é dado pela equação (39).

$$Rf_{m\acute{a}x} = \frac{1}{nm\acute{a}x} \cdot \frac{\rho_a m\acute{a}x}{2 \cdot \pi \cdot Lm\acute{a}x} \cdot \left(Ln \frac{4 \cdot Lm\acute{a}x}{am\acute{a}x} - 1 + \frac{Lm\acute{a}x}{dm\acute{a}x} \cdot Ln \frac{2 \cdot nm\acute{a}x}{\pi} \right) \quad (39)$$

$$Rf_{m\acute{a}x} = \frac{1}{0,7 \cdot n} \cdot \frac{1,3 \cdot \rho_a}{2 \cdot \pi \cdot 0,7 \cdot L} \cdot \left(Ln \frac{4 \cdot 0,7 \cdot L}{0,7 \cdot a} - 1 + \frac{0,7 \cdot L}{0,7 \cdot d} \cdot Ln \frac{2 \cdot 0,7 \cdot n}{\pi} \right) \quad (40)$$

$$Rf_{m\acute{a}x} = \frac{130}{49} \cdot \frac{1}{n} \cdot \frac{\rho_a}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \left(Ln \frac{4 \cdot L}{a} - 1 + \frac{L}{d} \cdot Ln \frac{1,4 \cdot n}{\pi} \right) \quad (41)$$

O valor mínimo para a resistência de aterramento do aerogerador ($Rf_{m\acute{ı}n}$) é definido pela melhor condiao dos fatores que a influenciam e é dado pela equaao (42).

$$Rf_{m\acute{ı}n} = \frac{1}{nm\acute{a}x} \cdot \frac{\rho_a m\acute{ı}n}{2 \cdot \pi \cdot Lm\acute{a}x} \cdot \left(Ln \frac{4 \cdot Lm\acute{a}x}{am\acute{a}x} - 1 + \frac{Lm\acute{a}x}{dm\acute{a}x} \cdot Ln \frac{2 \cdot nm\acute{a}x}{\pi} \right) \quad (42)$$

$$Rf_{m\acute{ı}n} = \frac{1}{1,3 \cdot n} \cdot \frac{0,7 \cdot \rho_a}{2 \cdot \pi \cdot 1,3 \cdot L} \cdot \left(Ln \frac{4 \cdot 1,3 \cdot L}{1,3 \cdot a} - 1 + \frac{1,3 \cdot L}{1,3 \cdot d} \cdot Ln \frac{2 \cdot 1,3 \cdot n}{\pi} \right) \quad (43)$$

$$Rf_{m\acute{ı}n} = \frac{700}{169} \cdot \frac{1}{n} \cdot \frac{\rho_a}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \left(Ln \frac{4 \cdot L}{a} - 1 + \frac{L}{d} \cdot Ln \frac{2,6 \cdot n}{\pi} \right) \quad (44)$$

Conforme se depreende do estudo, a resistência de aterramento de um aerogerador pode assumir valores entre -56 e +150% do valor de projeto acaso os parâmetros que a influenciem variem em +- 30% devido às condioes já elencadas anteriormente.

Este espectro de variaao foi então tomado como condiao de contorno no desenvolvimento da soluao heurística. Destarte, o algoritmo aterr3d.m é alimentado com valores de resistências de aterramento distribuídas aleatoriamente dentro desta faixa de variaao. Os valores de leitura que serão obtidos pelo método direto do alicate terrômetro são então calculados analiticamente pelo algoritmo e armazenados em um banco de dados.

Uma rede neural artificial do tipo “feedforward backpropagation” é programada no algoritmo soluao onde quatro parâmetros são necessários para sua criaao. O primeiro parâmetro de entrada é uma matriz n por 2 de valores mínimo e máximo para cada um dos n elementos do vetor de entrada. O segundo parâmetro é um array

contendo o tamanho da primeira camada, ou seja, a quantidade de aerogeradores sob ensaio. O terceiro parâmetro de entrada define a função de transferência a ser usada na primeira camada (linear). A entrada final define o algoritmo de aprendizado backpropagation Levenberg-Marquardt como a função de treinamento utilizada.

São também definidos os parâmetros de treinamento como o número máximo de épocas, o erro quadrático médio desejado (MSE), a taxa de aprendizado e divisão do conjunto dos dados para treinamento, validação e testes da rede.

O conjunto de dados de aprendizagem da rede neural é o mesmo do banco de dados obtido pela solução analítica `aterrad3.m`, porém com a permutação de suas entradas pelas saídas. O então conjunto de dados que será utilizado pela rede neural será dividido em três porções, 70% para treinamento, 15% para validação e 15% para testes.

Realizado o treinamento e concluídas as etapas de validação e testes, a rede neural estará apta para realizar o reconhecimento do padrão de comportamento inverso da solução analítica sendo assim capaz de encontrar os valores das resistências de aterramento a partir das leituras do alicate terrômetro realizadas via método direto.

No algoritmo desenvolvido em Matlab®, é ainda executada uma verificação final para validação da rede neural com valores de medições das resistências de aterramento dos aerogeradores obtidos de forma aleatória dentro da faixa de variação estipulada pelo estudo de sensibilidade da geometria da malha de aterramento. Esta validação final faz uso do algoritmo `aterrad3.m` para criar um novo banco de dados com 10% da quantidade de amostras do banco de dados utilizado para treinamento, validação e testes da rede neural. Tal verificação realiza o cálculo do erro de cada amostra de saída da rede neural em relação à amostra aleatória de entrada da solução analítica. Se o erro de alguma amostra estiver fora da faixa de tolerância de $\pm 10\%$, o algoritmo desprezará todo o banco de dados e a rede neural que foram criados e executará um novo processo de geração de dados para o treinamento, validação e teste de uma nova rede neural. O processo só será finalizado quando todos os erros calculados na etapa final de testes (validação) estiverem dentro da faixa de tolerância de $\pm 10\%$.

A cada rede neural criada pelo algoritmo de solução heurística uma nova janela "Neural Network Training" é gerada pelo Matlab®. A cada janela, os parâmetros de treinamento da rede são mostrados, tais como números de camadas, algoritmo de

treinamento, números de épocas, tempo de simulação e outros. Além disso, é possível plotar algumas características da rede ao longo de seu treinamento, como por exemplo, o desempenho da rede que podem ser visualizados no Apêndice pertencente a este trabalho.

Para aplicação da metodologia heurística proposta, o sistema de aterramento do parque eólico São Bento do Norte foi dividido em 7 grupos de aerogeradores. Os grupos foram divididos de acordo com seu posicionamento no parque eólico como também para fins de análise do erro de acordo com o número de aerogeradores envolvidos na solução. Foram criados desta forma diversos grupos com 1, 2, 3, 7 e 11 aerogeradores. Cada grupo foi analisado de forma isolada em relação aos demais, sendo que suas conexões com o restante do parque eólico foram desconectadas.

As Tabela 12 e Tabela 13 apresentam os resultados obtidos na etapa do teste de validação do algoritmo onde $R_{projeto}$ representa o valor da resistência de aterramento do projeto do aerogerador, Z_{med} a impedância lida pelo alicate terrômetro junto ao cabo de descida da malha de seu aterramento, R_{frn} é a resistência de aterramento do aerogerador que foi estimada pela Rede Neural e R_f é a resistência de aterramento do aerogerador gerada aleatoriamente, dentro da faixa de sensibilidade do modelo de projeto da malha de aterramento, para criação do banco de dados utilizado na etapa do teste final do algoritmo.

O erro da resposta da rede neural na etapa de teste final do algoritmo foi calculado através a equação (30).

A Tabela 14 também contém um levantamento das variações mínimas e máximas R_{fmin} e R_{fmax} com as respectivas percentagens ΔR_{fmin} e ΔR_{fmax} , obtidas nas amostragens da etapa final de testes em relação ao valor de projeto da resistência de aterramento de cada aerogerador. Na última coluna da Tabela 14 é apresentado o valor do erro absoluto médio percentual (MAPE) de medição, obtido para cada um dos aerogeradores do parque eólico, pela solução heurística.

TABELA 12 - RESULTADOS DOS TESTES DA ETAPA FINAL DO ALGORITMO RB_SBN.M

Amostragem →		1				2				3				4				5				
Rede Neural	Turbinas	Rprojeto (Q)	Rf (Q)	Zmed (Q)	Rfm (Q)	Erro (%)	Rf (Q)	Zmed (Q)	Rfm (Q)	Erro (%)	Rf (Q)	Zmed (Q)	Rfm (Q)	Erro (%)	Rf (Q)	Zmed (Q)	Rfm (Q)	Erro (%)	Rf (Q)	Zmed (Q)	Rfm (Q)	Erro (%)
1	SB13	1.1123	1.3219	47.5473	1.3219	-0.0002	2.5724	48.7974	2.5724	0.0001	1.6188	47.8441	1.6188	-0.0002	0.9128	47.1382	0.9128	-0.0002	1.1531	47.3784	1.1531	-0.0002
2	OD15	3.1659	6.3916	11.7861	6.3292	-0.9750	1.5666	7.6964	1.4354	-8.3745	7.4764	13.0118	7.6336	2.1018	7.8083	13.5212	8.1035	3.7811	1.6604	7.7576	1.6862	1.5530
	SB09	2.4319	2.6709	8.7090	2.5503	-4.5143	3.0621	8.4305	2.8863	-5.7398	3.9947	9.9874	4.0041	0.2352	5.1299	11.0501	5.2997	3.3092	1.1278	7.1267	1.1796	4.5959
3	OD14	27.6600	38.6157	42.5821	38.8470	0.5989	15.8285	20.8179	15.3401	-3.0851	18.8378	23.9151	18.2140	-3.1110	41.8753	46.1995	42.2409	0.8729	25.9674	30.8675	25.9660	-1.4305
	SB15	0.7353	0.7104	4.7325	0.6448	-9.2302	2.4459	5.8434	2.5957	6.1226	3.3942	6.7680	3.6796	8.4087	1.8910	5.6359	1.7438	-7.8776	3.2897	6.7644	3.4623	5.2490
4	SB14	6.4363	0.6744	6.4031	0.7240	7.3480	2.8825	8.0934	2.9234	1.4211	3.0708	8.2875	3.2391	5.4822	1.9658	7.2898	1.9250	-2.0749	2.0829	7.4106	2.1291	2.2190
	OD04	17.5980	7.7564	13.7025	8.0337	3.5764	31.8283	38.0390	31.8026	-0.0807	7.3310	14.1471	6.9666	-4.9705	26.0691	32.3112	25.9787	-0.3467	26.8252	32.2375	27.0786	0.9447
5	SB10	1.3877	11.8663	15.1796	11.8444	-0.1845	30.8269	34.9788	30.7350	-0.2983	37.9440	41.0783	38.0243	0.2117	30.0484	34.0931	30.1229	0.2479	10.7985	14.9818	10.6879	-1.0241
	SB11	1.2352	0.8395	1.9814	0.8381	-0.1678	0.8519	1.9887	0.8533	0.1616	0.7582	1.9022	0.7594	0.1619	0.9583	2.0939	0.9600	0.1733	0.2094	1.3650	0.2086	-0.3812
6	OD11	12.9940	32.9681	44.8324	32.9493	-0.0572	49.4857	60.8040	49.2798	-0.4161	38.6807	50.3154	38.4905	-0.4917	22.9705	35.3177	23.1133	0.6214	66.4041	77.4421	66.5981	0.2921
	OD12	15.4790	1.7707	9.5604	1.7799	0.5161	0.6519	7.5221	0.6990	7.2287	1.2243	8.8007	1.2942	5.7116	1.6047	4.8402	1.5889	-0.9801	0.6725	7.3758	0.6116	-9.0627
7	OD13	0.4231	13.4457	18.1369	14.2174	5.7397	7.0748	12.1302	6.5936	-6.8029	11.6160	16.1735	11.7395	1.0628	9.2080	14.3375	9.2113	0.0354	5.8210	11.2266	5.5405	-4.8196
	OD01	12.1390	8.7380	13.1901	8.6895	-0.5551	19.9069	24.0062	19.8918	-0.0759	24.8326	28.8361	24.8711	0.1551	23.9050	27.9181	23.9372	0.1349	10.4805	14.8615	10.4457	-0.3317
8	SB01	0.3420	0.3453	4.2357	0.3576	3.5557	0.7400	4.7455	0.7579	2.4172	0.6566	4.7743	0.6695	1.9652	0.6329	4.7238	0.6189	-2.2041	0.1786	4.4939	0.6632	-2.2613
	SB02	1.4220	2.9783	6.7205	3.0036	0.8491	1.8368	5.9766	1.8519	0.8258	3.4581	7.1646	3.6462	5.4396	2.4555	6.4307	2.4813	1.0523	1.5186	5.7189	1.5665	3.3553
9	SB03	20.5900	21.5100	24.7775	21.4202	-0.4174	34.1326	36.7674	34.1168	-0.0464	26.6661	29.9438	26.5303	-0.5092	36.3307	39.2353	36.2957	-0.0962	29.1658	32.1155	29.0662	-3.1415
	SB04	4.4570	10.8030	16.1035	11.0500	2.2866	5.3170	11.5069	5.2522	-1.2186	9.9664	15.4065	10.0517	0.8557	7.9394	13.8256	7.9666	0.3810	10.4617	15.8688	10.5356	0.7072
10	SB05	45.2240	49.0013	53.1991	48.7783	-0.4550	89.4074	92.4233	89.5521	0.1619	102.5332	105.4253	102.5432	-0.0098	95.7459	99.8929	95.8172	0.0745	97.1152	99.7175	96.9782	-0.1411
	OD02	3.8429	8.3153	22.0528	8.7959	5.7801	5.5844	20.2452	5.4040	-3.2301	4.2667	19.8383	4.1392	-2.9895	9.2196	23.3869	8.9809	-2.5891	3.2863	19.1247	3.4320	4.4336
11	OD01	2.3920	4.0005	8.7551	3.9389	-1.5393	5.2614	9.9297	5.2531	-0.1586	5.7694	10.5190	5.8763	1.8532	4.4579	9.1887	4.3995	-1.3111	3.9873	8.7828	3.9120	-1.8892
	SB01	1.8808	1.7341	5.0250	1.6797	-3.1350	2.0871	5.3079	2.0754	-0.5644	4.3135	7.4557	4.4148	2.3487	2.2445	5.4758	2.2564	0.5292	2.9366	6.0416	2.8982	-0.6999
12	SB02	5.7783	10.8347	13.0046	10.8407	0.0556	11.8768	14.0447	11.9402	-0.3078	13.8617	16.0879	13.8551	-0.0476	10.3803	12.5942	10.2448	-0.8160	8.1610	11.5759	8.6962	-1.3591
	SB03	0.2221	0.3694	5.0014	0.3872	4.8438	0.4414	5.0968	0.4442	0.6245	0.2803	4.9688	0.2679	-4.3925	0.2518	4.9017	0.2609	3.6166	0.3303	4.8906	0.3532	6.9306
13	SB04	1.0471	2.5954	6.3171	2.6178	0.8617	0.8848	4.8869	0.8590	-2.9108	0.8938	4.8979	0.8680	-2.8801	0.9334	4.9657	0.9084	-2.6759	2.4081	6.1662	2.4593	2.1277
	SB05	1.0138	1.3517	5.7860	1.3231	-2.1208	2.0904	5.9719	2.1013	-3.8304	1.7358	5.3674	1.6684	-3.8821	0.8302	5.2376	0.8367	-0.0330	4.1978	6.0742	2.0403	3.1387
14	OD02	4.0268	9.9979	12.5630	10.1082	-1.1031	0.3660	6.8805	3.1552	2.9097	3.7927	7.3792	3.6707	-3.2172	4.8806	8.2410	4.5231	-7.3240	4.4066	7.9009	4.2450	-3.6670
	OD03	0.8332	1.9192	7.2602	1.8422	-4.1033	1.9131	5.9941	1.1265	-5.5869	1.4027	5.9402	1.4433	2.8934	0.0561	7.0829	2.5289	0.9805	1.3201	5.9702	1.3405	-1.5670
15	SB06	3.5515	4.2234	8.9260	3.9851	-5.6425	6.3347	10.3285	6.1433	-3.0222	3.6955	8.4959	3.3643	-8.9609	7.9031	11.8030	7.9754	0.9140	4.0004	8.2620	3.1209	-8.2203
	SB08	0.6498	1.0612	6.2854	0.9719	-8.4208	1.4031	7.0785	1.4302	1.9274	1.4651	8.2417	1.4939	2.5896	1.1437	6.7980	1.1189	-2.1646	0.3611	6.8441	0.7184	-5.8108
16	SB07	3.1760	2.8493	9.2512	2.7194	-4.5590	5.9136	11.5043	5.7826	-2.2161	7.0543	12.4389	7.0986	0.6275	5.1374	10.8150	4.9331	-3.9751	7.5859	12.5516	7.6769	1.2000

FONTE: O autor (2021).

TABELA 13 - RESULTADOS DOS TESTES DA ETAPA FINAL DO ALGORITMO RB_SBN.M (CONTINUAÇÃO)

Amostragem →		6				7				8				9				10				
Rede Neural	Turbinas	Rprojeto (Q)	Rf (Q)	Zmed (Q)	Rfm (Q)	Erro (%)	Rf (Q)	Zmed (Q)	Rfm (Q)	Erro (%)	Rf (Q)	Zmed (Q)	Rfm (Q)	Erro (%)	Rf (Q)	Zmed (Q)	Rfm (Q)	Erro (%)	Rf (Q)	Zmed (Q)	Rfm (Q)	Erro (%)
1	SB13	1.1123	2.5932	48.8183	2.5932	0.0001	0.9498	47.1753	0.9498	-0.0002	2.5305	48.7556	2.5305	0.0001	2.7808	49.0058	2.7808	0.0002	0.4894	46.7150	0.4894	0.0003
2	OD15	3.1659	2.4736	8.6496	2.3274	-5.9085	6.3241	11.9457	6.3641	0.6332	5.1579	10.6545	5.0051	-2.9621	7.9148	13.7802	8.2956	4.7119	1.3930	7.5781	1.4744	5.8414
	SB09	2.4319	5.2672	10.3251	5.1884	-1.4963	4.0321	9.8685	4.0315	-0.0152	2.4907	8.4112	2.3561	-5.4044	6.0798	11.9349	6.4066	5.3760	1.0700	7.0928	1.1662	8.9243
3	OD14	27.6600	34.5362	38.5389	34.6092	0.2113	31.0134	35.2006	30.9842	-0.0942	24.0481	28.8795	23.7293	-1.3256	43.9950	48.6818	44.2143	0.4985	7.7431	12.9405	7.8147	0.9857
	SB15	0.7353	0.6656	4.6527	0.6410	-3.7090	1.0325	4.9023	1.0189	-1.3227	2.7596	6.2674	2.8601	3.6426	3.4693	7.0668	3.5214	1.5020	0.6106	4.1782	0.5867	-3.9075
4	SB14	6.4363	0.8232	6.5158	0.8559	3.9750	0.9144	6.5284	0.8831	-3.4252	1.5455	6.9547	1.5093	-2.3424	3.0880	8.2726	3.2824	6.2968	0.5435	6.3382	0.5531	1.7721
	OD04	17.5980	22.5239	28.8431	22.3548	-0.7508	21.0783	27.5073	20.7391	-1.6094	22.1228	28.3441	22.1558	0.1490	32.4850	38.8078	32.1131	-1.1448	5.7174	11.2703	5.8862	2.9527
5	SB10	1.3877	31.6058	35.5620	31.7402	0.4254	36.2266	40.1368	36.3870	0.4427	26.4734	30.4340	26.5540	0.3042	38.6975	42.8431	38.6847	-0.0330	6.8108	10.0438	6.6775	-1.9561
	SB11	1.2352	0.7041	1.8446	0.7031	-0.1398	0.3440	1.4939	0.3427	-0.3934	0.5503	1.6944	0.5480	-0.4087	1.0578	2.1911	1.0624	0.4363	0.1862	1.3471	0.1849	-0.6699
6	OD11	12.9940	24.7459	36.9595	24.5876	-0.6398	60.7097	71.8956	61.0264	0.5217	31.3261	43.2025	31.0239	-0.9647	69.1500	80.2719	69.6790	0.7649	12.0742	25.5074	12.4495	2.8833
	OD12	15.4790	1.1404	8.3349	1.1917	4.4969	1.3367	8.8246	1.3531	1.2289	0.6479	43.2024	0.6374	-1.6232	1.8383	10.3063	1.6673	-9.3019	0.3235	6.3290	0.3077	-4.8833
7	OD13	0.4231	10.1896	14.8999	9.992																	

TABELA 14 - ESTUDO DO ESPECTRO E DO ERRO DAS AMOSTRAS DA ETAPA FINAL DE TESTES DO ALGORITMO RN_SBN.M

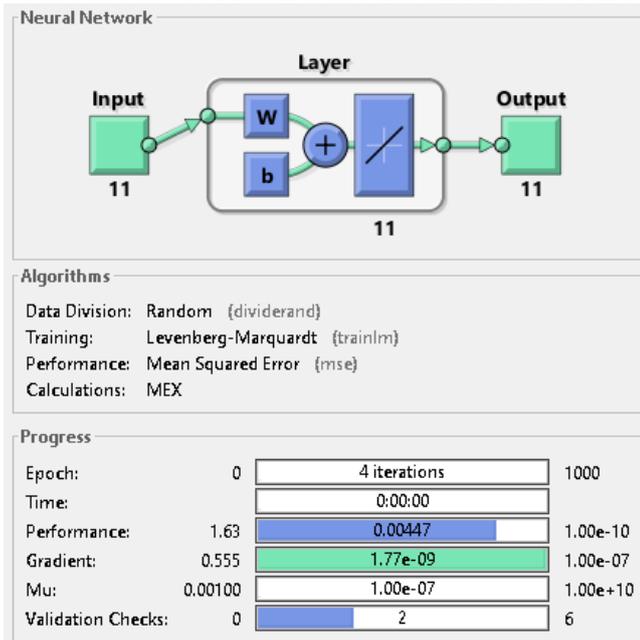
Rede Neural	Aerogerador	Rf (Ω)	Rf mín (Ω)	Δ Rf mín	Rf máx (Ω)	Δ Rf máx	MAPE (%)
1	SB13	1,1123	0,4894	-56%	2,7808	150%	0,0002
2	OD15	3,1659	1,3930	-56%	7,9148	150%	3,6942
	SB09	2,4319	1,0700	-56%	6,0798	150%	3,9672
3	OD14	27,6600	7,7431	-56%	43,9950	150%	1,2353
	SB15	0,7353	0,6106	-56%	3,4693	150%	5,0882
	SB14	6,4363	0,5435	-56%	3,0880	150%	3,6357
4	OD04	17,5980	5,7174	-56%	32,4850	150%	1,6526
	SB10	1,3877	6,8108	-56%	38,6975	150%	0,5128
	SB11	1,2352	0,1862	-56%	1,0578	150%	0,3094
5	OD11	12,9940	12,1704	-56%	69,1500	150%	0,7063
	OD12	15,4790	0,3235	-56%	1,8383	150%	4,5033
	OD13	0,4231	2,8320	-56%	16,0908	150%	4,2407
6	OD01	12,1390	8,4973	-30%	30,3475	150%	0,3534
	SB01	0,3420	0,2394	-30%	0,8550	150%	4,8130
	SB02	1,4220	0,9954	-30%	3,5550	150%	2,8098
	SB03	20,5900	14,4130	-30%	51,4750	150%	0,2075
	SB05	4,4570	3,1199	-30%	11,1425	150%	1,1844
	SB04	45,2240	31,6568	-30%	113,0600	150%	0,1200
	OD02	3,8429	2,6900	-30%	9,6073	150%	4,1057
7	OD01	2,3920	1,6744	-30%	5,9800	150%	1,3852
	SB01	1,8808	1,3166	-30%	4,7020	150%	1,2910
	SB02	5,7783	4,0448	-30%	14,4458	150%	0,9850
	SB03	0,2221	0,1555	-30%	0,5553	150%	4,3622
	SB05	1,0471	0,7330	-30%	2,6178	150%	1,9802
	SB04	1,0138	0,7097	-30%	2,5345	150%	2,7162
	OD02	4,0268	2,8188	-30%	10,0670	150%	3,2273
	OD03	0,8332	0,5832	-30%	2,0830	150%	6,0192
	SB06	3,5515	2,4861	-30%	8,8788	150%	4,3747
	SB08	0,6498	0,4549	-30%	1,6245	150%	4,1448
	SB07	3,1760	2,2232	-30%	7,9400	150%	2,8852

FONTE: O autor (2021).

5.10 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS COM A SOLUÇÃO HEURÍSTICA APLICADA AO ESTUDO DE CASO.

A Figura 40 mostra a janela de treinamento da rede neural 7, que é exibida pelo software Matlab® durante a execução do algoritmo da solução heurística, nela se observa o progresso do treinamento ao longo do tempo assim como a evolução de seus parâmetros. Tais parâmetros possuem valores limites, sendo que o treinamento é finalizado quando algum desses valores é atingido. No caso da rede neural 7, o treinamento finalizou quando o limite mínimo estipulado para o gradiente de descida foi atingido.

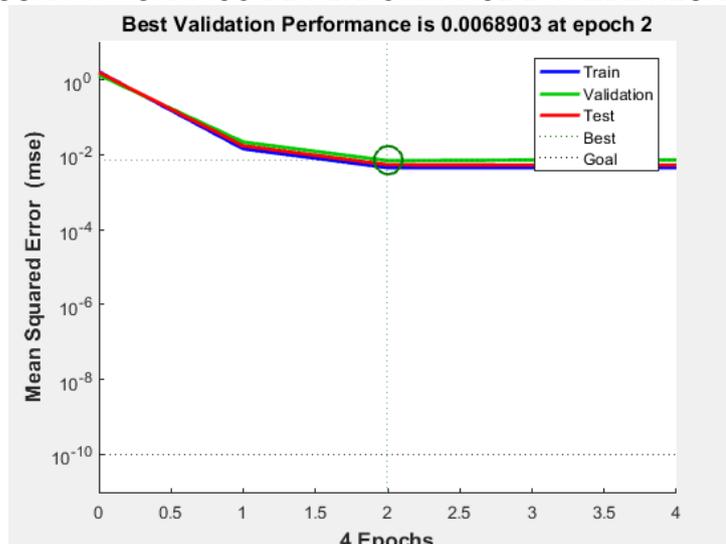
FIGURA 40 - PARÂMETROS DA REDE NEURAL 7



FONTE: Neural Network Training - Matlab® (2021).

Nesta janela de treinamento do Matlab® pode ser visualizado o gráfico de performance da Figura 41 onde se observa a evolução do erro quadrático médio em cada uma das etapas de treinamento, validação e testes da rede neural 7, conseguindo-se ao fim do treinamento um erro quadrático bastante baixo para esta rede, assim como para todas as demais redes neurais criadas pela solução heurística cujos gráficos de performance encontram-se colecionados no Apêndice deste documento.

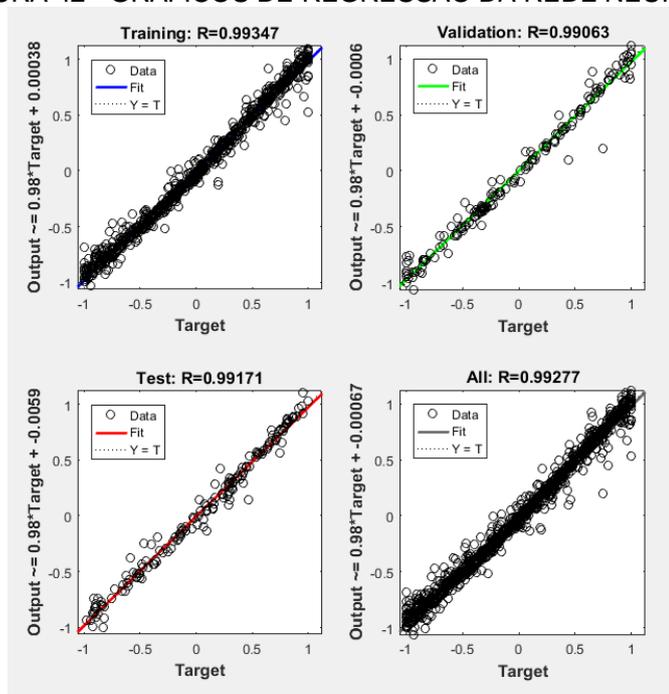
FIGURA 41 - GRÁFICO DE PERFORMANCE DA REDE NEURAL 7



FONTE: Neural Network Training - Matlab® (2021).

A Figura 42 mostra os gráficos de regressão do Matlab® onde é possível se comparar a saída desejada (linha contínua) com a saída da rede neural 7 (círculos) durante as etapas de treinamento, validação e testes da rede neural 7.

FIGURA 42 - GRÁFICOS DE REGRESSÃO DA REDE NEURAL 7.



FONTE: Neural Network Training - Matlab® (2021).

Conforme se depreende dos gráficos de regressão da rede neural 7 - Figura 42, e dos gráficos de regressão colecionados no Apêndice deste documento, a saída da rede ficou muito próxima à saída desejada, indicando um excelente desempenho das redes neurais artificiais criadas pelo algoritmo solução.

Na etapa final de testes é identificado que, para os grupos com 1, 2 e 3 aerogeradores, o algoritmo solução cria redes neurais que apresentam resultados satisfatórios ($|\text{Erro de medição}| \leq 10\%$) para variações da resistência de aterramento executada (real) que estejam entre -56% a 150% do valor de projeto. Para os grupos com 7 e 11 aerogeradores esta faixa de variação fica entre -30% e 150%.

Conforme se depreende das Tabelas 12, 13 e 14, todas as amostras da última etapa de teste das redes neurais apresentam erros de medição percentuais dentro da faixa tolerância de $\pm 10\%$ em relação às resistências de projeto dos aerogeradores do parque eólico.

A Tabela 15 apresenta uma planilha comparativa dos erros de medição obtidos para cada aerogerador do parque, em cada uma das etapas de aplicação do método proposto. Na última linha da Tabela 15 pode-se observar o valor do erro absoluto médio percentual (MAPE) de medição, calculado para cada das etapas.

TABELA 15 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DAS METODOLOGIAS.

Aerogerador	Rf (Ω)	Medição Direta		Medição Indireta		Solução Numérica		Solução Heurística	
		Rmed (Ω)	Erro (%)	Rmed (Ω)	Erro (%)	Rmed (Ω)	Erro (%)	Rmed (Ω)	Erro (%)
SB03	0,2221	4,7417	2034,96%	0,3243	46,03%	0,2222	0,03%	0,2171	-2,24%
OD09	0,3420	4,5089	1218,38%	0,5555	62,43%	0,3421	0,03%	0,3525	3,06%
OD13	0,4231	1,5752	272,31%	0,4068	-3,84%	0,4231	0,01%	0,4198	-0,77%
SB08	0,6498	6,1276	843,00%	0,3003	-53,78%	0,6500	0,02%	0,6618	1,85%
SB15	0,7353	8,1609	1009,87%	0,4702	-36,06%	0,7354	0,01%	0,7500	1,99%
OD03	0,8332	5,6440	577,39%	0,3148	-62,22%	0,8333	0,01%	0,8483	1,81%
SB04	1,0138	5,3435	427,08%	0,5175	-48,95%	1,0142	0,04%	0,9746	-3,87%
SB05	1,0471	5,0679	383,99%	1,0901	4,10%	1,0472	0,01%	1,0148	-3,08%
SB13	1,1123	11,2157	908,33%	4,1643	274,39%	1,1123	0,00%	1,1123	0,00%
SB11	1,2352	6,7747	448,47%	2,0725	67,79%	1,2352	0,00%	1,2142	-1,70%
SB10	1,3877	5,0955	267,19%	1,0845	-21,85%	1,3882	0,04%	1,4140	1,89%
OD08	1,4220	5,6281	295,79%	1,3351	-6,11%	1,4224	0,03%	1,4606	2,72%
SB01	1,8808	5,0496	168,48%	1,3827	-26,48%	1,8820	0,06%	1,9011	1,08%
OD01	2,3920	7,3510	207,32%	2,9740	24,33%	2,3928	0,03%	2,3521	-1,67%
SB09	2,4319	5,2582	116,22%	1,6935	-30,36%	2,4335	0,07%	2,3864	-1,87%
OD15	3,1659	9,2075	190,83%	4,7244	49,23%	3,1667	0,03%	3,1025	-2,00%
SB07	3,1760	9,4149	196,44%	5,3544	68,59%	3,1761	0,00%	3,1093	-2,10%
SB06	3,5515	8,3074	133,91%	2,3891	-32,73%	3,5527	0,03%	3,4927	-1,66%
OD05	3,8429	18,1641	372,67%	7,1191	85,25%	3,8430	0,00%	3,9305	2,28%
OD02	4,0268	6,7756	68,26%	2,8494	-29,24%	4,0273	0,01%	3,8969	-3,22%
SB12	4,4570	10,6484	138,91%	2,6718	-40,05%	4,4586	0,03%	4,5500	2,09%
SB02	5,7783	8,2852	43,39%	4,0266	-30,31%	5,7817	0,06%	5,5937	-3,20%
SB14	6,4363	8,0680	25,35%	4,2096	-34,60%	6,4370	0,01%	6,3247	-1,73%
OD10	12,1390	14,4928	19,39%	9,9898	-17,70%	12,1430	0,03%	12,0422	-0,80%
OD11	12,9940	16,9954	30,79%	10,4822	-19,33%	12,9967	0,02%	13,1612	1,29%
OD12	15,4790	19,1650	23,81%	14,5859	-5,77%	15,4914	0,08%	15,5744	0,62%
OD04	17,5980	21,7138	23,39%	15,4069	-12,45%	17,6015	0,02%	17,2336	-2,07%
OD07	20,5900	23,2365	12,85%	18,0787	-12,20%	20,5990	0,04%	20,5250	-0,32%
OD14	27,6600	31,4961	13,87%	20,5296	-25,78%	27,6735	0,05%	27,0264	-2,29%
OD06	45,2240	47,7816	5,66%	42,2747	-6,52%	45,2295	0,01%	45,1056	-0,26%
MAPE (%)			349,28%		41,28%		0,03%		1,85%

FONTE: O autor (2021).

Conforme se observa da Tabela 15, a aplicação do método heurístico reduziu significativamente do erro de medição apresentado com o uso direto das medições obtidas com o método do alicate terrômetro em parques eólicos. Em relação à solução numérica, sua exatidão é menor, no entanto a metodologia heurística conseguiu trabalhar satisfatoriamente com um maior número de aerogeradores interconectados, necessitando de uma quantidade menor de desconexões das componentes de aterramento do parque eólico, diminuindo os riscos de acidentes elétricos, tempo de serviço da equipe de manutenção como também o tempo de parada de fornecimento de energia do parque, se apresentando como uma proposta alternativa para medição de resistência de aterramento em complexos eólicos em atividades de inspeção durante as manutenções preventivas periódicas.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Primeiramente este trabalho buscou compreender os efeitos da frequência de operação do alicate terrômetro na medição da resistência de aterramento dos aerogeradores quando suas malhas de aterramento estão interligadas por eletrodos horizontais. O estudo foi direcionado aos projetos de aterramento dos parques eólicos São Bento do Norte e Olho d'Água disponibilizados pelo Departamento de Energia Eólica da Copel. Este primeiro estudo, foi sintetizado em um artigo apresentado e publicado no Congresso Internacional GROUND2020/21 & 9th LPE, sendo essencial para a análise do problema de estudo (GIACOMELLI et.al., 2021).

Foi concluído que, em geral, as medições tomadas com o uso do método direto do alicate terrômetro, não podem ser utilizadas diretamente para a estimativa das resistências de aterramento de aerogeradores dos parques eólicos. Como o aumento da frequência da corrente de ensaio, causa o aumento da reatância dos eletrodos horizontais presentes no sistema de aterramento do parque, uma leitura à maior é realizada pelo instrumento que opera na faixa de 1 a 3,5 kHz causando com isso um erro de medição. Quanto maior a frequência de operação do alicate terrômetro maior é o erro de medição introduzido por este fator.

Ainda no tocante ao uso direto das medições obtidas com o método do alicate terrômetro, o erro de medição também é dependente da resistência de aterramento dos eletrodos horizontais imediatamente adjacentes ao aerogerador sob ensaio, quanto maior a magnitude deste parâmetro, maior o erro introduzido.

É importante ressaltar que conforme se compreendeu da análise dos resultados obtidos em simulação computacional, o uso do método direto do alicate terrômetro com frequência de operação de 1 kHz é uma alternativa para a medição de resistências de aterramento de aerogeradores, do parque de estudo, com valores acima de 25 Ω .

Em um segundo momento, esta pesquisa buscou avaliar o método indireto do alicate terrômetro em um parque eólico de energia. Concluiu-se que, de um modo geral, os resultados das medições de aterramento obtidos pelo método indireto do alicate terrômetro no parque eólico do estudo não podem ser usados diretamente para medir a resistência de aterramento do aerogerador pois, mesmo apresentando melhores resultados em comparação a metodologia direta, o erro de medição

introduzido pela metodologia ainda continua dependente da reatância dos eletrodos horizontais à medida que a frequência da corrente de teste se eleva.

A análise dos resultados obtidos nestes estudos foi essencial para o desenvolvimento de soluções alternativas que consideram a leitura direta do medidor de aterramento e estratégias de cálculo para mitigação dos erros de medição apresentados na aplicação do método do alicate terrômetro em sistema de aterramento dos parques eólicos.

A primeira proposta desenvolvida é dependente da formulação e solução de um sistema de equações não-lineares a partir da modelagem do circuito equivalente do sistema de aterramento do parque eólico considerando o efeito das reatâncias de suas componentes.

Em face à complexidade da formulação do sistema de equações não lineares provenientes de sua aplicação em sistemas de aterramento com vários aerogeradores interconectados por eletrodos horizontais, sua aplicação para o estudo de caso foi conduzida de forma particionada sob cada um dos 30 (trinta) sub-sistemas de aterramento presentes no parque, formados por apenas um aerogerador.

A metodologia conseguiu estimar as resistências de aterramento dos aerogeradores com um erro de medição muito baixo, no entanto devida a necessidade de muitas desconexões de eletrodos horizontais, o uso desta solução acarreta em maiores riscos de acidentes e sobrecarga de trabalho para a equipe de manutenção, além de perdas econômicas devido à parada de geração de energia da usina. Destarte, passou-se a considerar a próxima etapa do método proposto.

Solução final para o método proposto, a solução heurística obteve uma redução significativa do erro de medição do método direto criando redes neurais que conseguem estimar os valores das resistências de aterramento dos aerogeradores a partir das de suas respectivas leituras tomadas com o alicate terrômetro, reduzindo o erro absoluto médio percentual do método direto de 349,28 % para 1,85 %.

Para a aplicação desta solução são necessárias apenas 5 desconexões de eletrodos horizontais em todo o parque, em face às 49 desconexões necessárias para a execução da solução numérica, oferecendo uma significativa otimização do tempo de execução de ensaio, redução de custos financeiros e de risco de choque elétrico. Estima-se que para o parque eólico São Bento do Norte, o tempo de duração do ensaio duraria 3 dias, bem inferior aos 10 dias de trabalho quando realizado com as metodologias baseadas no método de queda de potencial.

As duas soluções propostas neste estudo, foram desenvolvidas sob a premissa do conhecimento prévio dos dados de projeto do sistema de aterramento do parque eólico sob estudo. No entanto nem sempre o projeto elétrico do aterramento do parque está disponível ou atualizado. Urge neste sentido a necessidade de um estudo para busca de novas metodologias de medição da resistência de aterramento de aerogeradores que não necessitem do conhecimento das características elétricas das componentes do sistema de aterramento do parque eólico, porém que possuam as vantagens elencadas do uso do método do alicate terrômetro tais como segurança e menor necessidade de desconexão de componentes do sistema de aterramento. Neste sentido visualiza-se como um estudo futuro o desenvolvimento de um alicate terrômetro medidor de impedância de aterramento para estimativa da resistência de aterramento de um aerogerador através de uma metodologia numérica aplicada ao método indireto do capítulo 5.6.

No tocante à solução heurística, estudos futuros poderiam desenvolver um algoritmo para simulação computacional de sistemas de aterramento com configurações mais complexas. Este algoritmo seria utilizado para a criação do banco de dados de aprendizagem das redes neurais artificiais sem que haja a necessidade de desconexão de quaisquer componentes do sistema de aterramento do parque eólico.

A presente dissertação foi baseada em simulações computacionais do circuito equivalente dos parques eólicos, sendo que estudos futuros poderiam avaliar o uso da metodologia na prática, onde ensaios em campo fossem conduzidos. Nesta abordagem, um estudo pode ser conduzido para a identificação e caracterização das correntes espúrias que circulam pelo sistema de aterramento de um parque eólico e da sensibilidade do alicate terrômetro frente às mesmas.

REFERÊNCIAS

ABB PSGS. “Projeto Galvão Parque Eólico Parque Olho D`Água - Aterramento dos Aerogeradores”, ABB PSGS, Brasil, 2012.

ABB PSGS. “Projeto Galvão Parque Eólico Parque São Bento do Norte - Aterramento dos Aerogeradores”, ABB PSGS, Brasil, 2012.

ANEEL. Sistema de Informações de Geração da ANEEL – SIGA. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/siga>>. Acesso em 15 de agosto de 2021.

ARAÚJO, E. Métodos numéricos para simulação na engenharia. 2017. Disponível em: <https://www.esss.co/blog/metodos-numericos-para-simulacao-na-engenharia/> . Acesso em 06 de maio de 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15749: 2009. Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5419-3: 2015. Proteção contra descargas atmosféricas. Parte 3: Danos físicos a estruturas e perigos à vida. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7117-1: 2020. Parâmetros do solo para projetos de aterramentos elétricos Parte 1: Medição da resistividade e modelagem geométrica. Rio de Janeiro, 2020.

BASHEER, I; HAJMEER, M. N. Artificial Neural Networks: Fundamentals, Computing, Design, and Application. 2001. January 2001. Journal of Microbiological Methods 43 (1):3-31

BARBOSA, I.J. Fundamentos de Proteção de Sistemas Elétricos. São José da Barra, MG. 2009.

BRASIL, Ministério do Trabalho e do Emprego. NR-10 Segurança em instalações e serviços em eletricidade. Brasília, 2004. Disponível em: <http://www.mtps.gov.br/images/Documentos/SST/NR/NR10.pdf>. Acesso em 28/06/2020.

BRITISH STANDARD. BS 7430. Code of practice for Earthing. London, 1998.

BURTON, T.; JENKINS, N.; SHARPE, D; BOSSANYI, E. Wind Energy Handbook. Segunda edição. Ed. John Wiley & Sons: London, 2011.

COSTANZO, A.; VILLARREAL, M.; FREIRE, P. E.; LIMA, M. A.; PANE, E.; DOMINGUES, S. Parque Eólico Água Doce Medições de Resistividade do Solo e de Resistências de Aterramento. In: Conference & Exhibition Windpower. Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <http://www.paiolengenharia.com.br/site/download/trabalho7.pdf>. Acesso em 27 de maio de 2020.

CSANYI, Edvard. The easiest way to measure ground resistance using clamp meter. Electrical Engineering Portal. EUA, 2017. Disponível em: <https://electrical-engineering-portal.com/measure-ground-resistance-clamp-meter>. Acesso em: 19 de maio de 2020.

CTGÁS-ER. Engenharia Elétrica na Construção de Parques Eólicos. Especialização Técnica em Energia Eólica. Natal, 2012. Disponível em :< [http://ead2.ctgas.com.br/a_rquivos/aperfeicoamento/SistemasEletricosAplicadosParquesEolicos/sistemas_eletricos/engenharia_eletrica/APOSTILA%20-%20ENGENHARIA%20EL%20C3%89TRICANA%20CONSTRU%20C3%87%20C3%83O%20DO%20PARQUE%20E%20C3%93LICO\(%2007-05-12\).pdf](http://ead2.ctgas.com.br/a_rquivos/aperfeicoamento/SistemasEletricosAplicadosParquesEolicos/sistemas_eletricos/engenharia_eletrica/APOSTILA%20-%20ENGENHARIA%20EL%20C3%89TRICANA%20CONSTRU%20C3%87%20C3%83O%20DO%20PARQUE%20E%20C3%93LICO(%2007-05-12).pdf)>. Acesso em 18/04/2021.

DEHN. Earth-termination system for onshore wind turbines. 2018. Disponível em :< <https://www.dehn-international.com/sites/default/files/media/files/earth-termination-onshore-wind-turbines-wpx024-e.pdf>>. Acesso em 16 de agosto de 2020.

DIEFENTHÄLER, A.T. Modelagem Matemática de Linhas de Transmissão Baseada em Dados Reais da Rede de Distribuição Primária de Energia Elétrica. INIJUÍ – RS. Dissertação de Mestrado, 2019.

ELETRICITY ASSOCIATION SERVICES LIMITED, Engineering Recommendation S34-1986, “A guide for assessing the rise of earth potential at substation sites”, London, U.K., 2003.

FORTIVE INDUSTRIAL INSTRUMENTATION TECHNOLOGIES R&D CO., LTD. Qiqiang, L.; Zhengping W. Clamp meter. Patent application publication US 2018/0210014A1. Data da publicação: 16 de julho de 2018.

FLUKE CORPORATION. Resistência de aterramento, princípios, métodos de teste e aplicações. EUA; 2017. Disponível em :< https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/9902792_POZ_C_W.PDF>. Acesso em 22 de maio de 2020.

FREIRE, P. E.; PANE, E.; GUARALDO, N. Sistemas de aterramento de parques eólicos. In: Conference & Exhibition Brazil WindPower. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <http://www.paiolengenharia.com.br/site/download/trabalho5.pdf>. Acesso em 27 de maio de 2020.

FREIRE, P. E.; BUENO, R. B.; PANE, E.; FRANKLIN, W.; BOTELHO, R. Desempenho de aterramento de torres de aerogeradores. In: Conference & Exhibition Brazil WindPower. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em :<<http://www.faw7.com.br/wp-content/uploads/2019/04/PaperWP2014-AterramentosAerogeradores.pdf>>. Acesso em 27 de maio de 2020.

FURTADO, M. I. V. Redes neurais artificiais: uma abordagem para sala de aula. Ponta Grossa /PR: Atena Editora, 2019.

GAMBOA, L. R. A.; RAVAGLIO, M. A.; ARAÚJO, R. L.; ANUNCIAÇÃO, S. M.; SCHULTZ, D.; ZANIN, W. R. Guia de compatibilidade eletromagnética para usinas eólicas. Curitiba: Ed. Lactec, 2018.

GIACOMELLI, A. L.; LÓPEZ-SALAMANCA, H. L.; MARCILIO, D. C.; ALFARO-GAMBOA, R.; LOURENÇO A.P.; RUFATO JUNIOR, E. Clamp-on earth ground meter for measurement of ground resistance in onshore wind farm - part I: preliminary assessment. International Conference on Grounding and Earthing & 9 th International Conference on Lightning Physics and Effects. Belo Horizonte, 2021.

GOREE, A. T. Grounding design for personal safety os a large-scale wind power plant. Thesis (Master of Science - Electrical Engineering). Faculty and the Board of Trustees of the Colorado School of Mines. Golden, 2020. Disponível em: <https://mountainscholar.org/bitstream/handle/11124/170417/Goree_mines_0052N_11072.pdf?sequence=1>. Acesso em 21 de maio de 2020.

GRUBLER, M. Entendendo o funcionamento de uma rede neural artificial. 2018. Disponível em: <<https://medium.com/brasil-ai/entendendo-o-funcionamento-de-uma-rede-neural-artificial-4463fcf44dd0>>. Acesso em 05/04/2021.

HAGAN, M. T.; MENHAJ M. B. Training feedforward networks with the Marquardt algorithm. *IEEE Transactions on Neural Networks*, v. 5, n. 6, 1994. p. 989-993.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMISSION. IEC-TR61400-24 Wind Turbine Generator Systems - Part 24: Lightning Protection. Londres, 2019.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. IEEE 81, 2012. Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System. Piscataway, New Jersey, EUA, 2012.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. IEEE Std. 81.2. 1991, 1992. Guide for measurement of impedance and safety characteristics of large, extended or interconnected grounding systems. Piscataway, New Jersey, EUA, 1992.

JENKINS, N.; VAUDIN A., "Earthing of Wind Farms", in IEEE Conference on "Renewable Energy - Clean Power 2001", London, U.K., 17-19 Nov. 1993.

KINDERMANN, G; CAMPAGNOLO, J.M. Aterramento Elétrico. 3ª Edição. Porto Alegre: Sagra-D.C. Luzzatto, 1995.

KYORITSU. A guide to earth / ground resistance test. 2019. Kyoritsu KEW India Instruments Pvt. Ltd. India, 2019. Disponível em: <<https://www.kew-ltd.co.in/2019/05/02/a-guide-to-earthground-resistance-test/>>. Acesso em 22 de setembro de 2020.

KOKSOY, O., YALCINOZ, T. "Mean square error criteria to multiresponse process optimization by a new genetic algorithm". 2006. Appl. Math. Comput., n. 175, p. 1657-1674.

KOZAKEVICH, D. N. Sistemas não-lineares da física e da engenharia. 1995. 94f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica, Campinas, SP. Disponível em: <<http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/307435>>. Acesso em: 21 jul. 2020.

LIU, J.; DAWALIBI, F. P. Wind turbine farm network grounding design using integrated simulation methods and techniques. 2010 International Conference on Future Power and Energy Engineering. Shenzhen, China, 2010. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5663355>>. Acesso em 20 de maio de 2020.

MCCULLOCH, W. S.; PITTS, W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. The bulletin of mathematical biophysics, 5(4):115–133, 1943.

MEGGER CORPORATION. Getting down to earth. A practical guide to earth resistance testing. Disponível em :<<https://megger.com/support/technical-library/technical-guides/getting-down-to-earth-a-practical-guide-to-earth>>. Acesso em: 19 de maio de 2020.

MEGGER CORPORATION. Guide to clamp-on grounding testing. Disponível em :<<https://megger.com/support/technical-library/technical-guides/guide-to-clamp-on-grounding-testing>>. Acesso em: 19 de maio de 2020.

MODENA J.; SUETA, H. Métodos normalizados para medição de resistência de aterramento - Capítulo VI. O Setor Elétrico, edição 65 de junho de 2011. Disponível em :< http://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/documentos/fasciculos/Ed65_fasc_aterramentos_cap6.pdf>. Acesso em 12 de janeiro de 2021.

NETO, T.V. Investigação de metodologias para avaliação da resposta de aterramento de linhas de transmissão. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

NOCEDAL, J.; WRIGHT, S. J. Numerical optimization. 2ª edição. Nova Iorque: Springer, 2006.

LEITE, T. M. Redes Neurais, Perceptron Multicamadas e o Algoritmo Backpropagation. 2018. Disponível em:< <https://medium.com/ensina-ai/redes-neurais-perceptron-multicamadas-e-o-algoritmo-backpropagation-eaf89778f5b8>>. Acesso em 07 de abril de 2021.

LEVENBERG, K. "A Method for the Solution of Certain Non-Linear Problems in Least Squares". The Quarterly of Applied Mathematics, 2: 164-168, 1944.

MARQUARDT, D.W. "An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters," Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, 11(2):431-441, 1963.

LÓPEZ-SALAMANCA, H.; DAHLKE, D.; DOMINGUES, H. L.; SOTILLE, C. A.; ALFARO-GAMBOA, L.; KOWALSKI, E. L.; SHIONO, O. M.; RIBAS, R. M. Inspection of ground system connections in energized substation. International Conference on Grounding and Earthing & 5th International Conference on Lightning Physics and Effects. Bonito, 2012.

LÓPEZ-SALAMANCA, H.; ALFARO-GAMBOA, L.; AQUINO, T. F.; BEÊ, R. T.; DAHLKE, D.; SONODA, E. K.; MOGNON, V. R.; BLOCK P. A. B.; SHIONO, O. M.; COSTA, A. A. Método alternativo para medição da resistência de aterramento de torres em linhas de transmissão de 69 a 500 kV energizadas, empregando a corrente residual do sistema. XXII Seminário Nacional de distribuição de Energia Elétrica. Curitiba, 2016.

LÓPEZ-SALAMANCA, H.; DAHLKE, D.; ALFARO-GAMBOA, L.; SHIONO, O. M.; BLOCK, P.; COSTA, A.; SONODA, E. K.; BEE, R. T. Residual current method of grounding resistance measurement in transmissions towers with earth wire - Part 1: Study of residual current in transmittiontowersProceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference, 2016. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?partnerID=HzOxMe3b&scp=84991383770&origin=inward>>.

PALMIERE, S. E. Rede perceptron de uma única camada. 2016. Disponível em: <https://www.embarcados.com.br/rede-perceptron-de-uma-unica-camada/>. Acesso em 06 de maio de 2021.

PANICALI A.R.; BARBOSA C.F. Criteria for using 25 khz grounding meters to measure grounding grids. International Conference on Grounding and Earthing & 9 th International Conference on Lightning Physics and Effects. Belo Horizonte, 2021.

ROGERS, S.K.; COLOMBI, J.; MARTIN, C.; GAINEY, J.C. Automatic target recognition using neural networks. 1995. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering.

ROSENBLATT, F. The perceptron, a perceiving and recognizing automaton Project Para. Cornell Aeronautical Laboratory, 1957.

RUGGIERO, M. A. G.; LOPES, V. L. R. Cálculo numérico - Aspectos teóricos e computacionais. 2ª edição. São Paulo: Editora Pearson, 1997.

RUMELHART, D. E.; HINTON, G. E.; WILLIAMS, R. J. Learning representations by back-propagating errors. *Nature*, 1986.

SANA, A. Wind turbine foundation grounding considerations. EUA: 2020. Disponível em :<<https://www.ieee-pes.org/presentations/td2014/td2014p-000652.pdf>>. Acesso em 21/05/2020. Acesso em 01 de maio de 2020.

VISACRO FILHO, S. Conceitos básicos técnicas de medição e instrumentação filosofias de aterramento. São Paulo:Editora Artliber, 2019.

SOTILLE, C. A.; BELTANI, J. M.; NONATO, G. A. C. Protótipo de medição de malha de terra em subestações energizadas, Programa anual de Pesquisa e Desenvolvimento Ciclo 2003/2005, Empresa Energética de Mato Grosso do Sul S.A. e Fundação Paulista de Tecnologia e Educação, Campo Grande, 2005.

TURBOSQUID. Gerador Eólico Modelo 002 3D. Disponível em: <https://www.turbosquid.com/pt_br/3d-models/3d-wind-turbine-model/755190>. Acesso em 30 de junho de 2021.

WANG, J.; NI, Y.; LI, Z.; ZHANG, P. An improved method for measuring grounding resistance of transport tower. *Proceedings - 2018 International Conference on Sensor Networks and Signal Processing, SNSP 2018*, p. 49–54, 2019.

WANG, Y.; SHU, N.; LI, S.; KONG, Q. New method for measuring grounding resistance of transmission line towers and error analysis. Ed. Wuhan University: Wuhan, 2006.

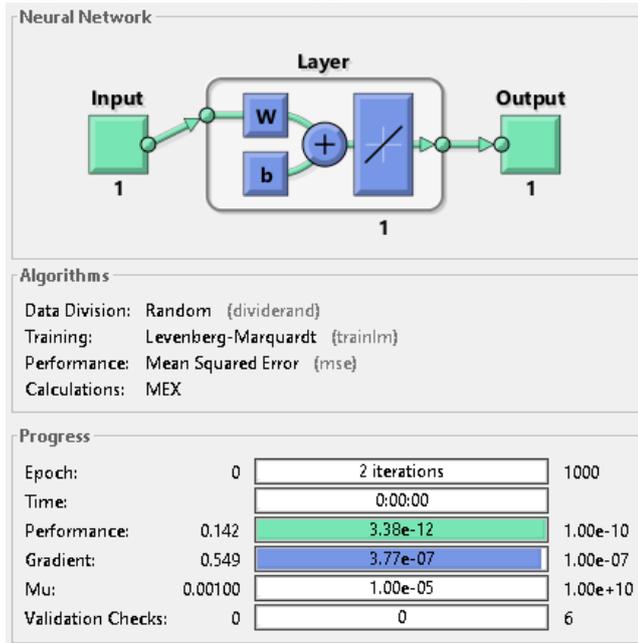
U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. The inside of Wind turbine. Wind Energy Technologies Office. Estados Unidos, 2021. Disponível em <https://www.energy.gov/eere/wind/inside-wind-turbine>. Acesso em 18/04/2021.

ZHANG, G.; WANG M.; WANG X.; ZHAO L.; ZHAO J. An on-line monitoring method for monitoring earth grounding resistance based on a hybrid genetic algorithm. Changchun, China, 2019. Disponível em :<<https://core.ac.uk/download/pdf/187118435.pdf>>. Acesso em 19 de maio de 2020.

APÊNDICE - PARÂMETROS E CARACTERÍSTICAS DAS REDES NEURAIS CRIADAS PELO ALGORITMO RN_SBN.M.

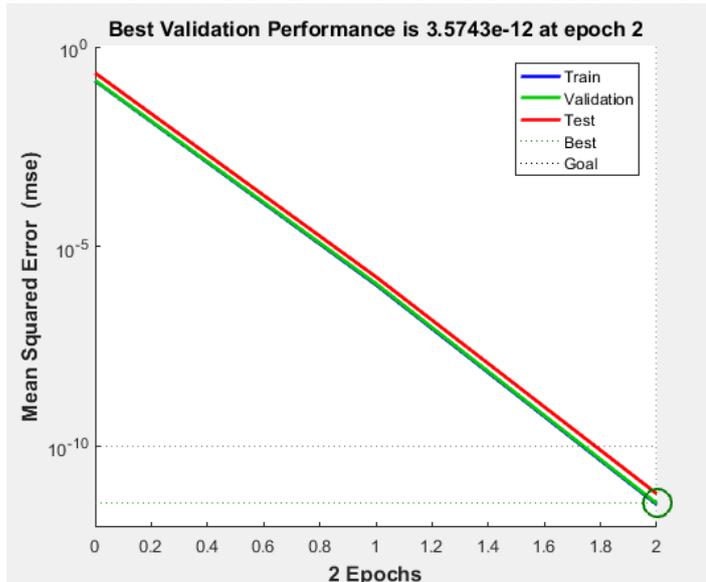
Rede Neural Aerogerador SB13

FIGURA 43 - PARÂMETROS DA REDE NEURAL SB13



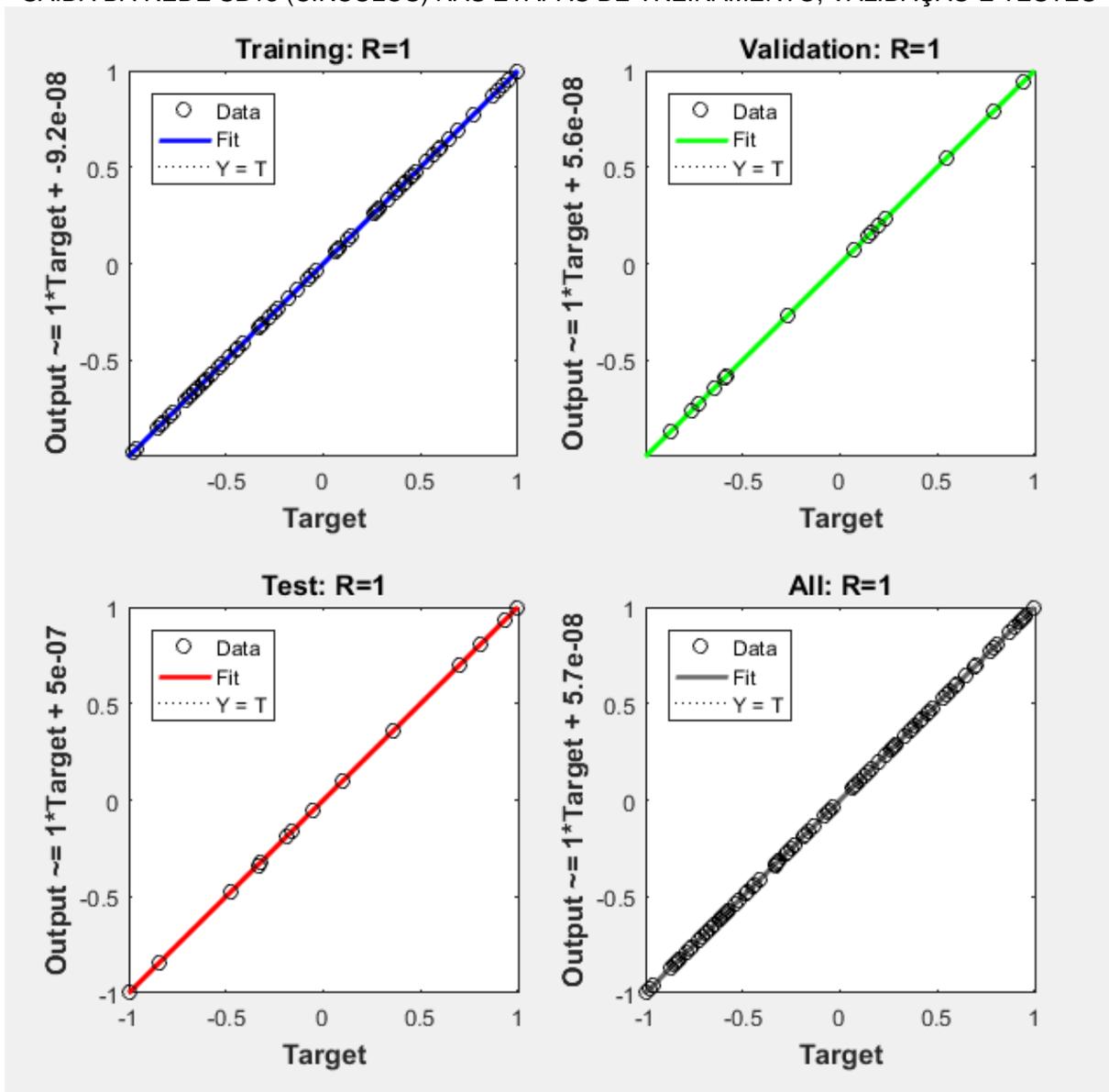
FONTE: Neural Network Training - Matlab® (2021).

FIGURA 44 - GRÁFICO DE PERFORMANCE DA REDE NEURAL SB13



FONTE: Neural Network Training - Matlab® (2021)

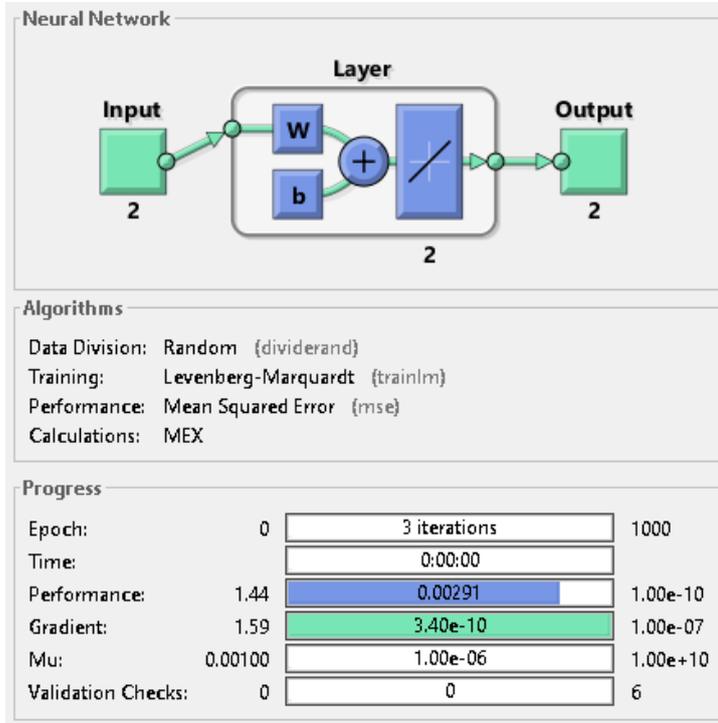
FIGURA 45 - GRÁFICOS DE COMPARAÇÃO ENTRE A SAÍDA DESEJADA (LINHA CONTÍNUA) E A SAÍDA DA REDE SB13 (CÍRCULOS) NAS ETAPAS DE TREINAMENTO, VALIDAÇÃO E TESTES



FONTE: Neural Network Training - Matlab® (2021).

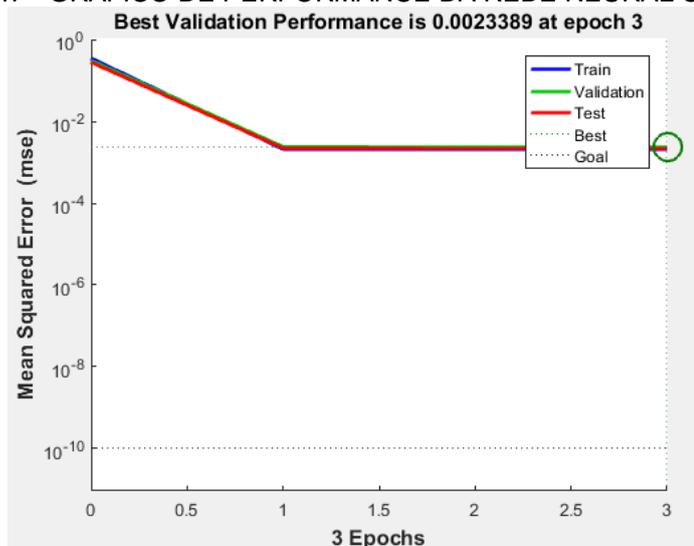
Rede Neural Aerogeradores OD15 e SB09

FIGURA 46 - PARÂMETROS DA REDE NEURAL OD15-SB09



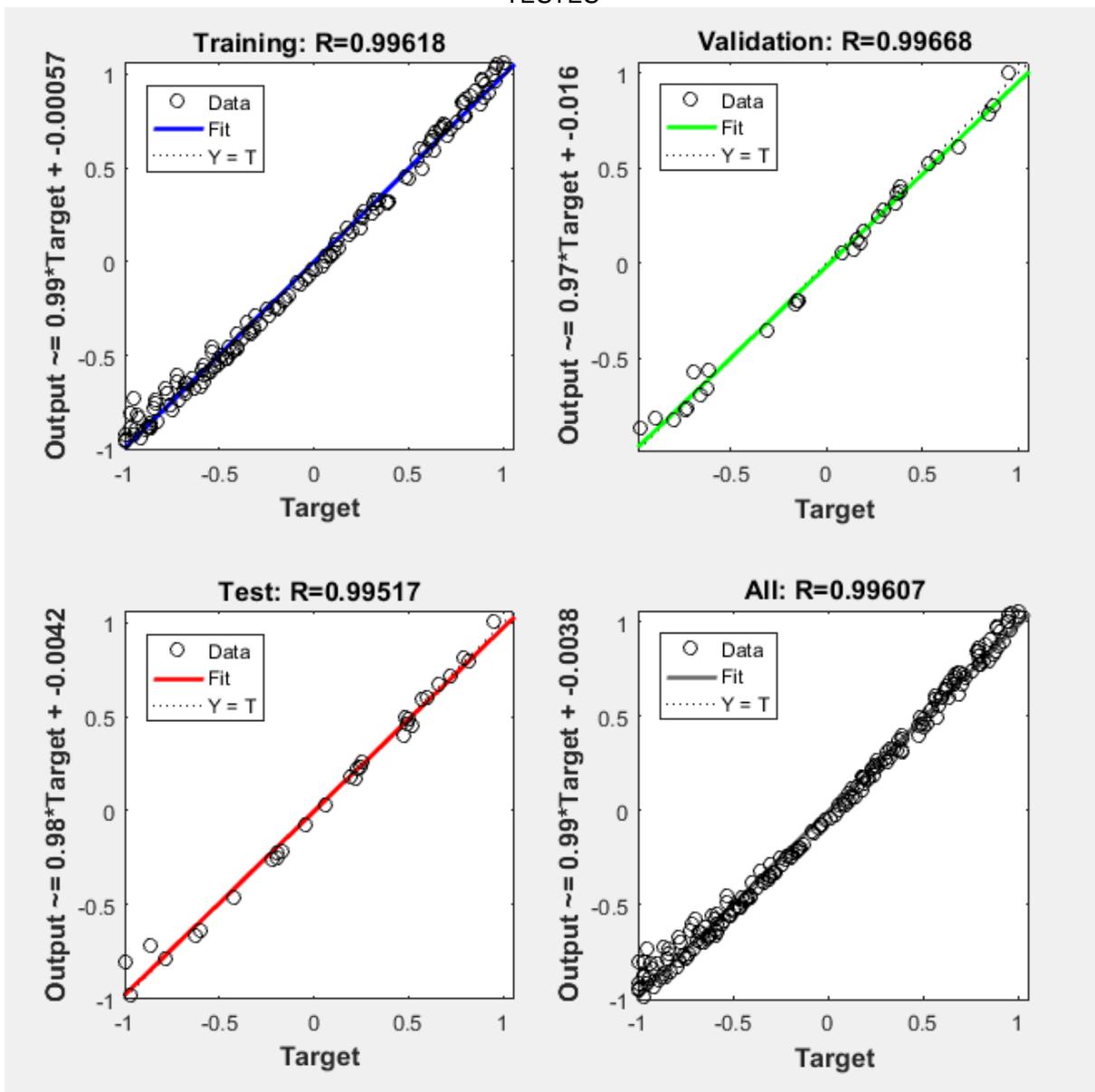
FONTE: Neural Network Training - Matlab® (2021).

FIGURA 47 - GRÁFICO DE PERFORMANCE DA REDE NEURAL OD15-SB09



FONTE: Neural Network Training - Matlab® (2021).

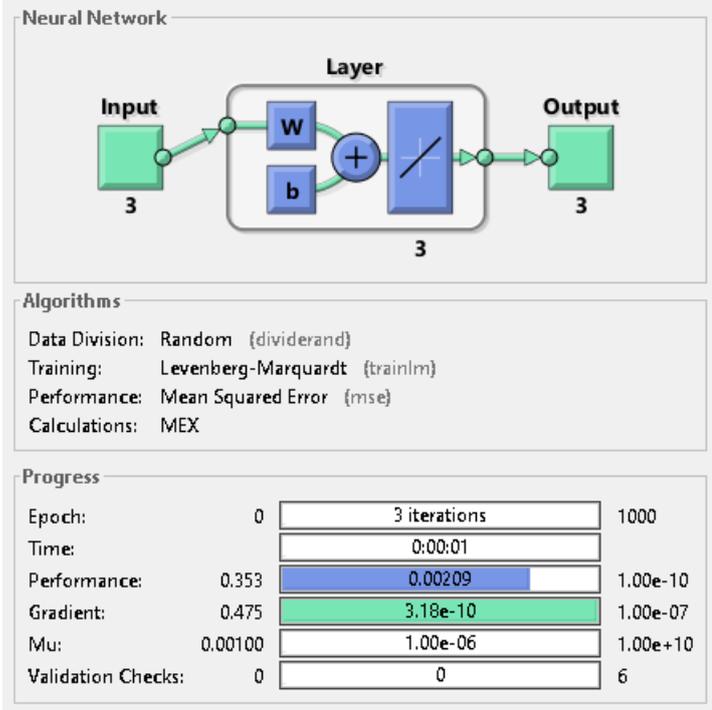
FIGURA 48 - GRÁFICOS DE COMPARAÇÃO ENTRE A SAÍDA DESEJADA (LINHA CONTÍNUA) E A SAÍDA DA REDE OD15-SB09 (CÍRCULOS) NAS ETAPAS DE TREINAMENTO, VALIDAÇÃO E TESTES



FONTE: Neural Network Training - Matlab® (2021).

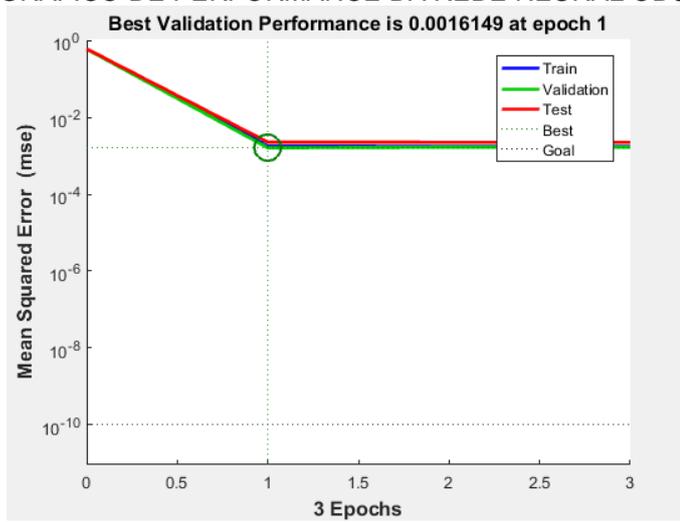
Rede Neural Aerogeradores OD04, SB10 e SB11

FIGURA 49 - PARÂMETROS DA REDE NEURAL OD04-SB10-SB11



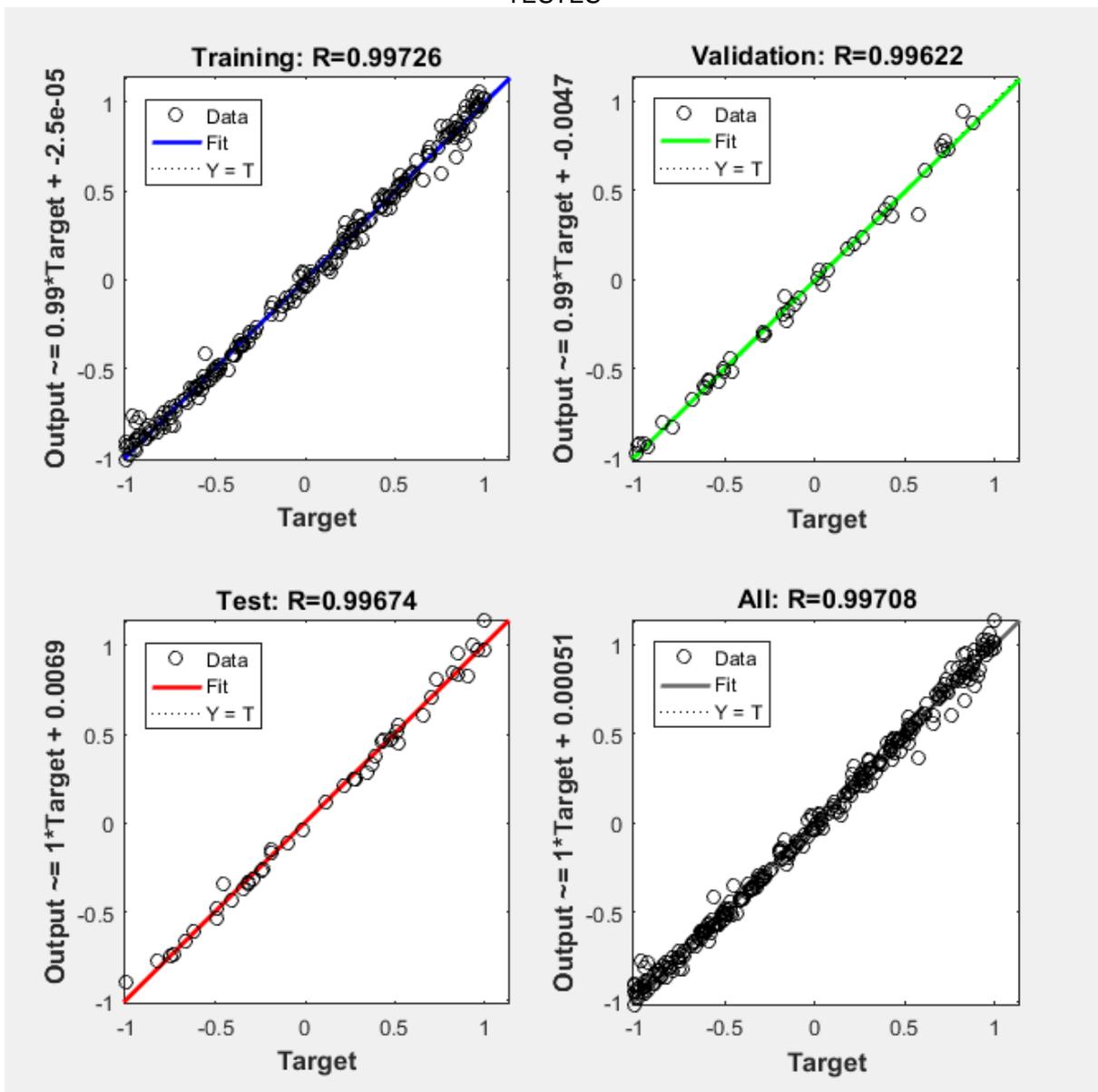
FONTE: Neural Network Training - Matlab® (2021).

FIGURA 50 - GRÁFICO DE PERFORMANCE DA REDE NEURAL OD04-SB10-SB11



FONTE: Neural Network Training - Matlab® (2021).

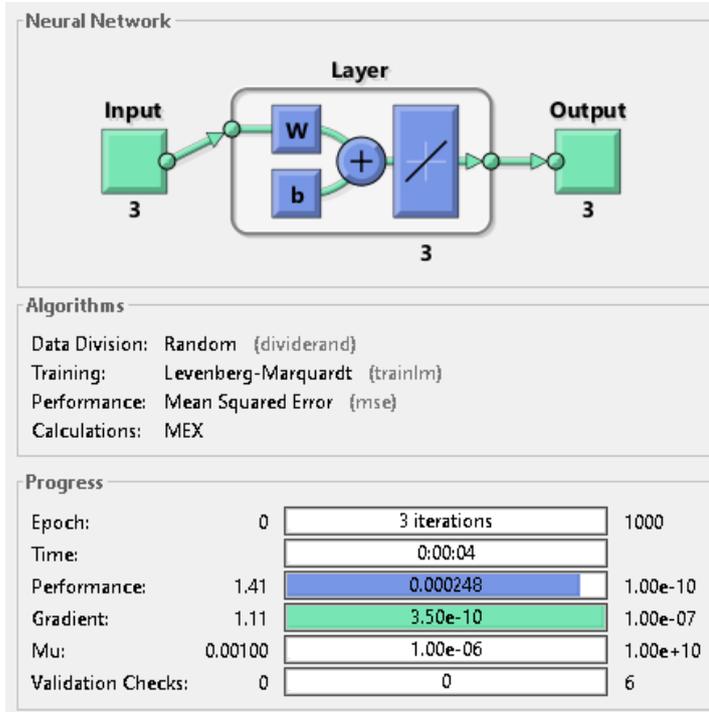
FIGURA 51 - GRÁFICOS DE COMPARAÇÃO ENTRE A SAÍDA DESEJADA (LINHA CONTÍNUA) E A SAÍDA DA REDE OD04-SB10-SB11 (CÍRCULOS) NAS ETAPAS DE TREINAMENTO, VALIDAÇÃO E TESTES



FONTE: Neural Network Training - Matlab® (2021).

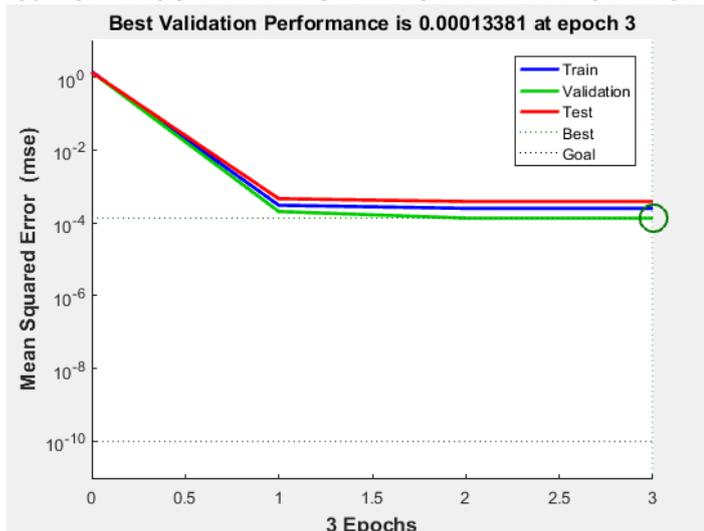
Rede Neural Aerogeradores OD11, OD12 e OD13

FIGURA 52 - PARÂMETROS DA REDE NEURAL OD11-OD12-OD13



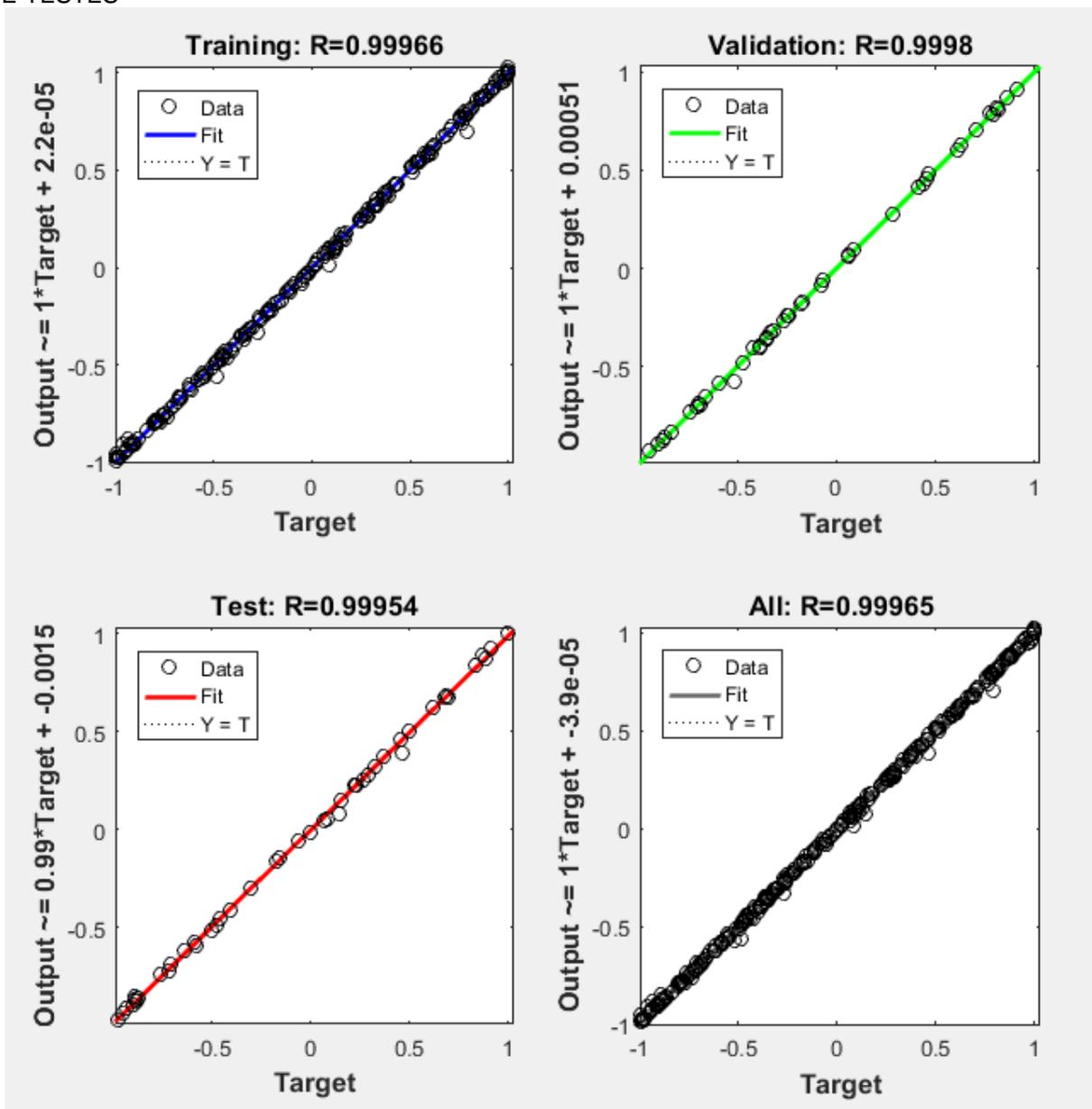
FONTE: Neural Network Training - Matlab® (2021).

FIGURA 53 - GRÁFICO DE PERFORMANCE DA REDE OD11-OD12-OD13



FONTE: Neural Network Training - Matlab® (2021).

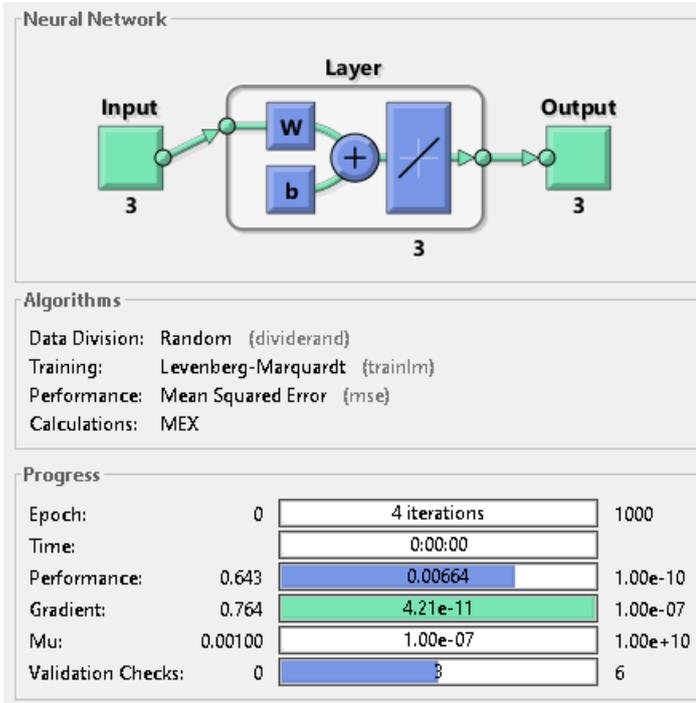
FIGURA 54 - GRÁFICOS DE COMPARAÇÃO ENTRE A SAÍDA DESEJADA (LINHA CONTÍNUA) E A SAÍDA DA REDE OD11-OD12-OD13 (CÍRCULOS) NAS ETAPAS DE TREINAMENTO, VALIDAÇÃO E TESTES



FONTE: Neural Network Training - Matlab® (2021).

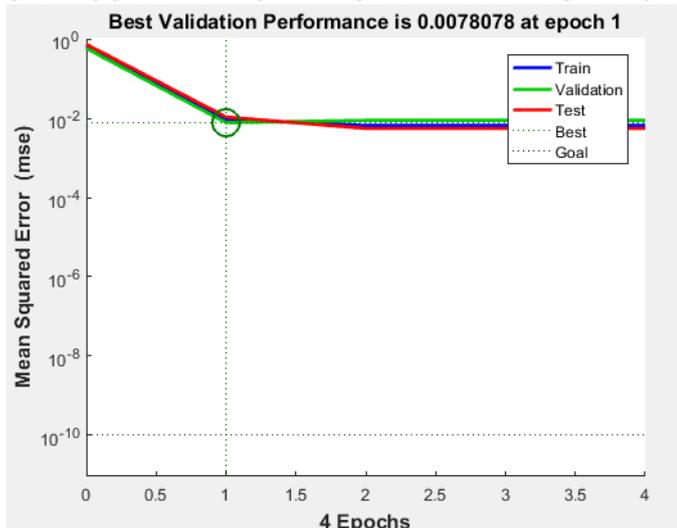
Rede Neural Aerogeradores OD14, SB15 e SB14

FIGURA 55 - PARÂMETROS DA REDE NEURAL OD14-SB15-SB14



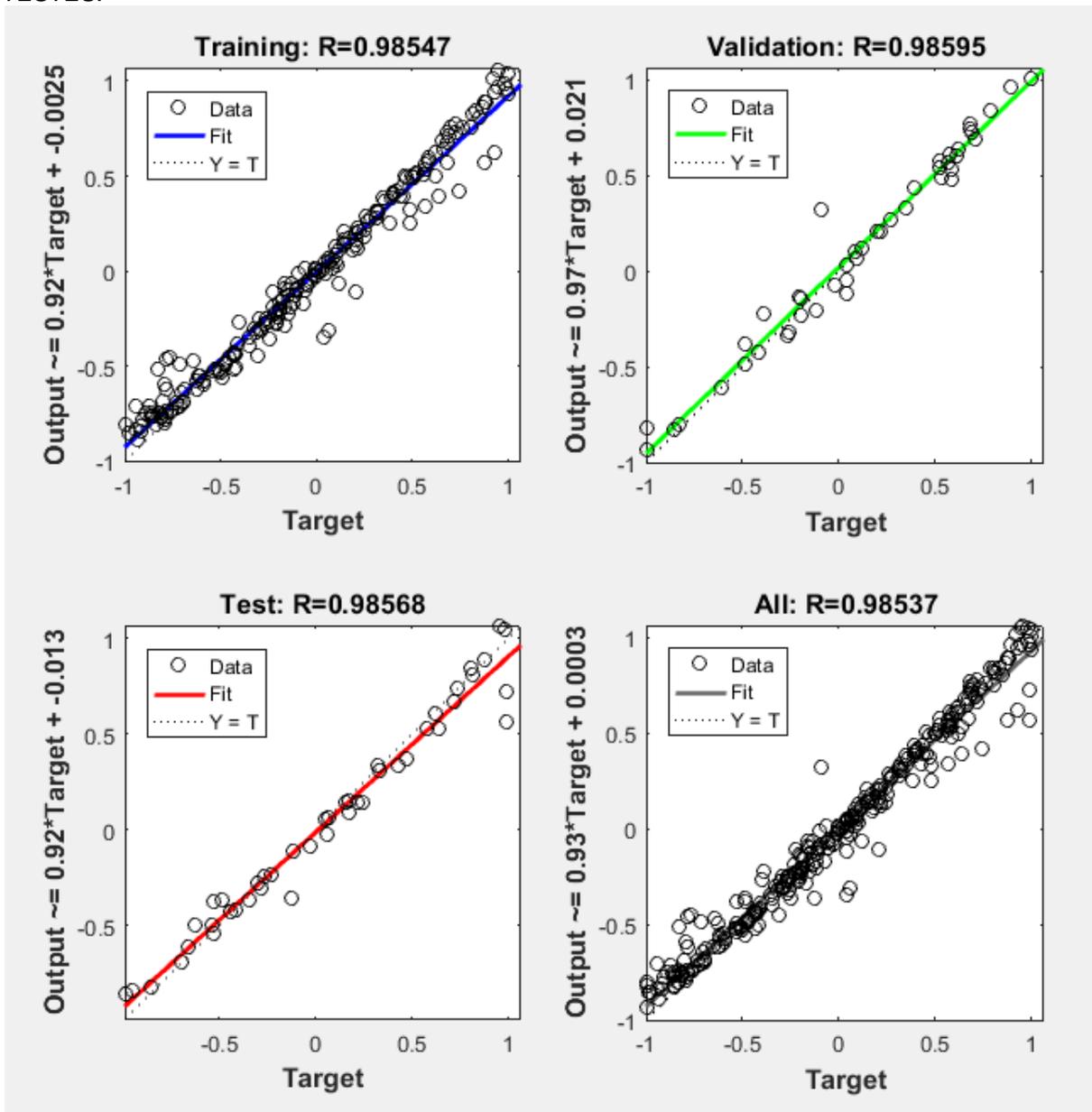
FONTE: Neural Network Training - Matlab® (2021).

FIGURA 56 - GRÁFICO DE PERFORMANCE DA REDE NEURAL OD14-SB15-SB14



FONTE: Neural Network Training - Matlab® (2021).

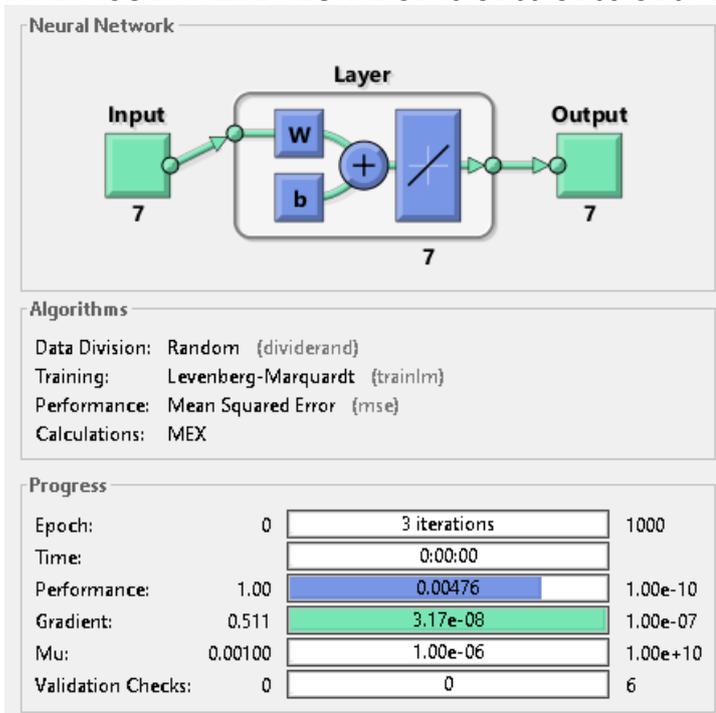
FIGURA 57 - RÁFICOS DE COMPARAÇÃO ENTRE A SAÍDA DESEJADA (LINHA CONTÍNUA) E A SAÍDA DA REDE OD14-SB15-SB14 (CÍRCULOS) NAS ETAPAS DE TREINAMENTO, VALIDAÇÃO E TESTES.



FONTE: Neural Network Training - Matlab® (2021).

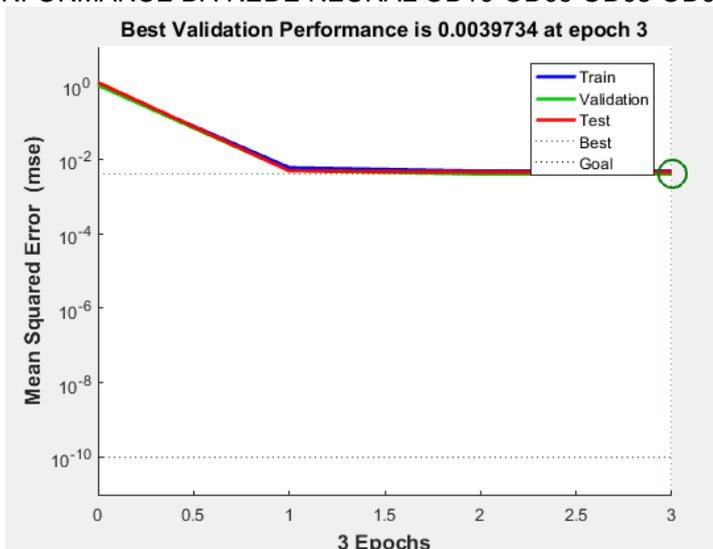
Rede Neural Aerogeradores OD10, OD09, OD08, OD07, SB12, OD06 e OD05

FIGURA 58 - PARÂMETROS DA REDE NEURAL OD10-OD09-OD08-OD07-SB12-OD06- OD05



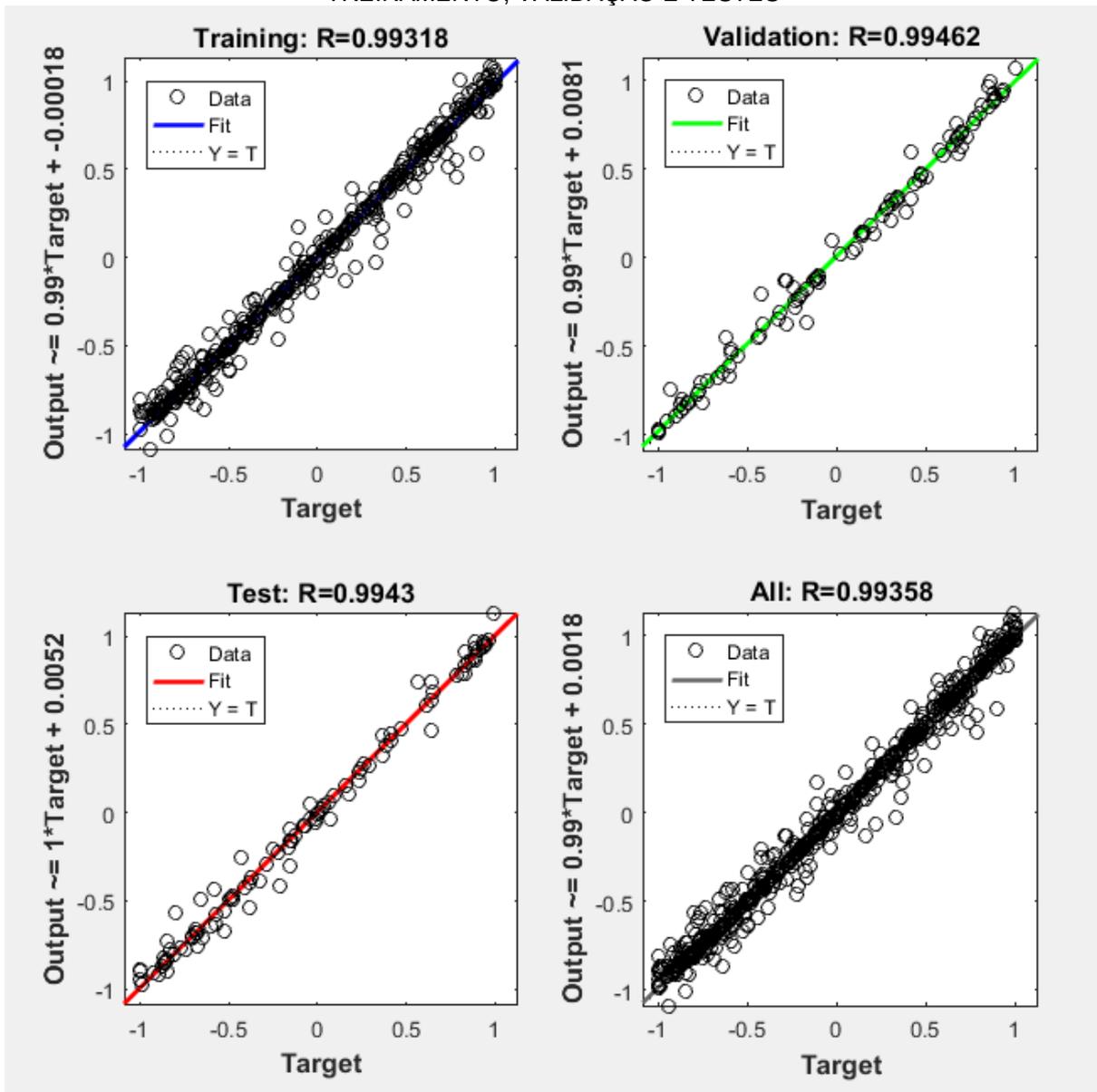
FONTE: Neural Network Training - Matlab® (2021).

FIGURA 59 - DE PERFORMANCE DA REDE NEURAL OD10-OD09-OD08-OD07-SB12-OD06- OD05



FONTE: Neural Network Training - Matlab® (2021).

FIGURA 60 - GRÁFICOS DE COMPARAÇÃO ENTRE A SAÍDA DESEJADA (LINHA CONTÍNUA) E A SAÍDA DA REDE OD10-OD09-OD08-OD07-SB12-OD06- OD05 (CÍRCULOS) NAS ETAPAS DE TREINAMENTO, VALIDAÇÃO E TESTES



FONTE: Neural Network Training - Matlab® (2021).