



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE ANGICOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

EDIGAR PERMINIO LEITE

**CONTROLE ESTATÍSTICO DA QUALIDADE NA CONSTRUÇÃO DE LINHAS DE
TRANSMISSÃO: APLICAÇÃO DO CEP PARA ANÁLISE DA CAPABILIDADE DO
PROCESSO DE MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA DOS ATERRAMENTOS.**

ANGICOS

2022

EDIGAR PERMINIO LEITE

**CONTROLE ESTATÍSTICO DA QUALIDADE NA CONSTRUÇÃO DE LINHAS DE
TRANSMISSÃO: APLICAÇÃO DO CEP PARA ANÁLISE DA CAPABILIDADE DO
PROCESSO DE MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA DOS ATERRAMENTOS.**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Ambrósio Bezerra de Oliveira.

ANGICOS

2022

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

L533c Leite, Edigar Perminio.
Controle Estatístico da Qualidade na construção
de Linhas de Transmissão: aplicação do CEP para
análise da Capabilidade do processo de medição de
resistência dos aterramentos / Edigar Perminio
Leite. - 2022.
55 f. : il.

Orientador: Lucas Ambrósio Bezerra de Oliveira.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia de
Produção, 2022.

1. Controle Estatístico do Processo. 2. Gestão
da Qualidade. 3. Gráficos de Controle. 4. Linhas
de Transmissão. 5. Capabilidade. I. Oliveira,
Lucas Ambrósio Bezerra de , orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo autor(a).

Biblioteca Campus Angicos
Bibliotecário: Helder Romero Maia Duarte
CRB: 15/673

EDIGAR PERMINIO LEITE

**CONTROLE ESTATÍSTICO DA QUALIDADE NA CONSTRUÇÃO DE LINHAS DE
TRANSMISSÃO: APLICAÇÃO DO CEP PARA ANÁLISE DA CAPABILIDADE DO
PROCESSO DE MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA DOS ATERRAMENTOS.**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Ambrósio Bezerra de Oliveira.

Defendida em: **25 de novembro de 2022.**

BANCA EXAMINADORA

Lucas Ambrósio Bezerra de Oliveira, Dr. (UFERSA)
Presidente

André Luiz Sena Rocha, Prof. Me. (UFERSA)
Membro Examinador

Flávia Priscila Dantas, Profa. M.a. (UFERSA)
Membro Examinador

Letícia Soares Teixeira de Souza, Profa. (UFERSA)
Membro Examinador

A EUNISIO PERMÍNIO LEITE (*in
memorian*), e **IVONE MORAIS DE
LUCENA**, meus pais, que nunca duvidaram de
mim e foram os principais responsáveis para
que eu pudesse chegar nesta etapa da minha
vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e pela proteção divina a mim concedida, pois sempre esteve presente nos momentos difíceis me conduzindo rumo aos meus objetivos e não me deixando desviar dos princípios morais e éticos.

A minha mãe, Ivone Morais de Lucena, pois nunca mediu esforços para me dar uma boa educação. Obrigado por tudo.

A minha tia, Irani Morais de Lucena, que desde a minha infância esteve presente e me apoiou em todos os momentos.

A Lúcia de Fátima Batista Dantas, que tenho como uma segunda mãe, pois sempre me ajudou e cuidou de mim.

A Evandro Batista Dantas de Medeiros, meu companheiro, por todo amor e cuidado para comigo, pois sempre esteve me apoiando e ajudando a superar meus obstáculos da melhor forma possível.

Ao Dr. Lucas Ambrósio Bezerra de Oliveira, meu orientador, por ter aceitado a missão de me orientar, onde até eu desacreditei. Agradeço também por toda paciência, atenção e pelo conhecimento repassado durante a construção do trabalho. Sem você, a finalização desta etapa acadêmica estaria longe de se concretizar.

A banca examinadora desta pesquisa pelas considerações que agregaram ainda mais valor e guiaram a execução do trabalho.

A UFERSA, por contribuir de forma significativa no meu processo de crescimento tanto pessoal quanto profissional.

Aos professores, que foram os pilares e a base do conhecimento que adquirido.

A empresa que me forneceu os dados e contribuiu significativamente para a concretização deste trabalho.

Por fim, a todos que contribuíram de alguma forma, direta ou indiretamente nesta minha trajetória, deixo aqui minha gratidão.

RESUMO

Em um cenário de crescente demanda e dependência por energia elétrica, a utilização de fontes renováveis para geração de energia mais limpa e sustentável já é realidade em diversos países. Neste sentido, as linhas de transmissão, projetos de grande complexidade que compõem o circuito de transmissão de energia elétrica, são essenciais e requerem um alto nível de qualidade exigido pelo cliente, pois são estruturas que transmitem energia elétrica de forma contínua e o seu mal funcionamento acarreta em prejuízo financeiro para as concessionárias. Diante disso, o trabalho será desenvolvido no intuito de analisar a capacidade do processo de medição de resistência dos aterramentos em uma linha de transmissão por meio do Controle Estatístico do Processo (CEP). A pesquisa consiste em um estudo de caso de caráter exploratório e quantitativo em uma obra de linha de transmissão de 230kv situada no nordeste do Brasil, onde foram disponibilizados os dados de medição de resistência dos aterramentos em 72 estruturas. A partir dos resultados encontrados foi possível verificar que o processo não estava sob controle mediante aplicação dos gráficos de controle para variáveis, tendo em vista que altas resistências nos aterramentos podem resultar em futuros desligamentos da linha e não são aceitáveis pela cliente. Logo, analisando a capacidade, o processo não é capaz de atender as especificações da cliente nestas condições. Com base nisso foram propostas melhorias para reduzir as resistências nos aterramentos, e consequentemente tornar o processo capaz de atender as especificações da cliente.

Palavras-chave: Controle Estatístico do Processo. Gestão da Qualidade. Gráficos de Controle. Linhas de Transmissão. Capacidade.

ABSTRACT

In a scenario of growing demand and dependence on electricity, the use of renewable sources to generate cleaner and more sustainable energy is already a reality in several countries. In this sense, transmission lines, projects of great complexity that make up the electrical energy transmission circuit, are essential and require a high level of quality required by the customer, as they are structures that transmit electrical energy continuously and their malfunction entails financial losses for concessionaires. In view of this, the work will be developed in order to analyze the capability of the process of measuring resistance of groundings in a transmission line through Statistical Process Control (CEP). The research consists of an exploratory and quantitative case study in a 230kv transmission line project located in the northeast of Brazil, where grounding resistance measurement data were made available in 72 structures. From the results found, it was possible to verify that the process was not under control by applying the control charts for variables, considering that high resistances in the grounds can result in future disconnections of the line and are not acceptable by the customer. Therefore, analyzing the capability, the process is not able to meet the customer's specifications under these conditions. Based on this, improvements were proposed to reduce grounding resistance, and consequently make the process capable of meeting the customer's specifications.

Keywords: Statistical Process Control. Quality Management. Control Charts. Transmission lines. Capability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	–	Gráfico de Controle Típico.....	20
Figura 2	–	Classificação da metodologia.....	26
Figura 3	–	Método de Queda de Potencial.....	29
Figura 4	–	Esquema de ligação para medição com terrômetro.....	29
Figura 5	–	Realização do procedimento de medição de resistência dos aterramentos.....	30
Figura 6	–	Curva característica da resistência de aterramento de um eletrodo.....	32

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	–	Gráfico de Controle para Amplitude Móvel.....	40
Gráfico 2	–	Gráfico de Controle para Valores Individuais.....	43
Gráfico 3	–	Gráfico de Controle recalculado para Amplitude Móvel.....	45
Gráfico 4	–	Gráfico de Controle recalculado para Valores Individuais.....	45
Gráfico 5	–	Gráfico de Controle de Soma Acumulada.....	47
Gráfico 6	–	Gráfico de Controle recalculado para Soma Acumulada.....	48

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	–	Medição de resistência dos aterramentos.....	30
Quadro 2	–	Variação das medições de resistência M_1 e M_2	33
Quadro 3	–	Razão das variações P_1 e P_2 em relação ao valor central.....	34
Quadro 4	–	Resistência Média dos aterramentos das estruturas.....	35
Quadro 5	–	Amplitude Móvel da Resistência Média nos aterramentos das estruturas.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Regras Sensibilizantes para Gráficos de Controle.....	20
Tabela 2	–	Fatores para construção de Gráficos de Controle para variáveis.....	23
Tabela 3	–	Pontos fora de controle mediante as regras sensibilizantes.....	44

SUMÁRIO

RESUMO.....	7
1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 PROBLEMÁTICA	15
1.2 OBJETIVOS	16
1.2.1 Objetivo Geral	16
1.2.2 Objetivos Específicos	16
1.3 JUSTIFICATIVA	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1 CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSO	19
2.2 GRÁFICOS DE CONTROLE	19
2.2.1 Gráficos de Controle para Variáveis com Medidas Individuais	21
2.2.1.1 Gráfico de Controle para Amplitude Móvel ou Gráfico MR	22
2.2.2 Gráfico de Controle da Soma Cumulativa	24
2.3 CAPABILIDADE.....	24
3 METODOLOGIA.....	26
3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	26
3.2 ETAPAS DA PESQUISA	27
4 RESULTADOS E DISCURSÕES.....	28
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA.....	28
4.2 COLETA E TABULAÇÃO DAS MEDIÇÕES DE RESISTÊNCIA DOS ATERRAMENTOS.....	28
4.3 APLICAÇÃO DO CONTROLE ESTATÍSTICO DO PROCESSO (CEP).....	37
4.3.1 Gráfico de Controle	37
4.3.2 Capabilidade do processo.....	49
5 CONCLUSÃO	52
REFERÊNCIAS	55

1 INTRODUÇÃO

A utilização de fontes renováveis para geração de energia mais limpa e sustentável vem crescendo nos últimos anos, além de ser uma preocupação dos tempos atuais. Segundo os estudos e perspectivas feitas pelo *International Renewable Energy Agency* (IRENA) em 2020, a matriz elétrica mundial poderá chegar a 2050 com 86% de sua geração oriunda de energias renováveis.

Com base no Ministério de Minas e Energia (2020), o Brasil se destaca pelo crescente aumento na utilização de energias renováveis. Atualmente com 83% de sua matriz elétrica oriunda de fontes renováveis, a geração a partir da energia eólica já é a segunda maior com percentual de 9,3%.

No cenário atual de crescente investimento em energia renovável, as linhas de transmissão (LTs) tornam-se cada vez mais necessárias, pois as LTs são responsáveis por transportar a energia elétrica gerada. Jolandek (2009) afirma que, as linhas de transmissão têm a finalidade de distribuir a energia produzida nas usinas até os consumidores e utilizam-se das subestações para reduzir ou elevar a tensão de transmissão conforme a necessidade.

Segundo Dinsmore (2004) projeto é um empreendimento único que deve ser temporário, com início e fim definidos, e que, conduzido por pessoas possa atingir seus objetivos considerando os parâmetros de custo, tempo e qualidade. Diante disso, podemos afirmar que uma linha de transmissão é sim um projeto. Uma vez que possui prazo determinado, é único e deve ser conduzido obedecendo a parâmetros de custo, tempo e qualidade previamente estabelecidos.

Para Jolandek (2009), é na etapa de execução e controle de um projeto que acontece as atividades construtivas, bem como as de gerenciamento de prazo, recursos financeiros, insumos e qualidade. Nesta etapa ocorre a maior parte dos riscos e por isso deve ser rigorosamente controlado tanto os prazos, quanto os custos e a qualidade. Então, em projetos de construção de linhas de transmissão, devido sua complexidade, certo nível de qualidade é exigido por parte da cliente (empresa responsável pela distribuição da energia) e para isso faz-se necessário o cumprimento de normas e monitoramento de parâmetros. Inúmeros processos precisam ser controlados, e dentre eles a medição de resistência dos aterramentos.

Considerando as definições de qualidade, para Montgomery (2017), a tradicional diz respeito apenas à adequação ao uso, enquanto a moderna traz a qualidade como algo inversamente proporcional à variabilidade, e quanto maior esta variação em uma determinada

característica/parâmetro, menor será a qualidade. Sendo assim, a melhoria na qualidade pode ser obtida através da redução na variabilidade dos parâmetros.

Com esta finalidade, a engenharia da qualidade compõe um conjunto de atividades operacionais, de gerenciamento e de engenharia utilizadas para garantir que as características estejam no nível exigido e a variabilidade seja mínima. Dentre essas, destaca-se os métodos estatísticos como cerne da análise e melhoria. (MONTGOMERY, 2017)

Segundo Civardi (2017) o CEP possibilita um monitoramento eficaz de um processo. Já para Lima et al. (2006), o CEP é uma poderosa metodologia desenvolvida que auxilia no controle eficaz da qualidade.

Ou seja, uma forma de monitorar e controlar a variabilidade dos parâmetros é utilizando o Controle Estatístico de Processos (CEP). Visto que, são necessários métodos estatísticos para classificação e análise dos dados. Uma vez que, para Ramos et al. (2013), a análise e interpretação dos dados é a etapa mais importante e delicada.

Deste modo objetiva-se aplicar o CEP para analisar o parâmetro de medição de resistência dos sistemas de aterramentos em uma obra de linha de transmissão situada no Nordeste Brasileiro.

1.1 PROBLEMÁTICA

O Brasil se destaca cada vez mais na utilização energias renováveis. O setor está em alta e já vem ganhando destaque na geração através da energia eólica, especificamente no Nordeste, região com o maior potencial de crescimento (MME, 2020). Neste sentido, tanto os parques eólicos como as de linhas de transmissão, responsáveis pela distribuição da energia, já se disseminaram por vários Estados brasileiros, em especial na Região Nordeste.

Segundo Jolandek (2009), o projeto básico de uma linha de transmissão é composto por diversos estudos desenvolvidos por uma série de técnicos especializados e que é utilizado como norte para os demais projetos da LT. O contrapeso (aterramento) que considera características, material, método e critérios de dimensionamento é apenas um dentre os diversos parâmetros considerados na construção de linhas.

A finalidade do aterramento é transferir para o solo as correntes oriundas de descargas atmosféricas e devem ter uma impedância menor que a do circuito da LT (CARVALHO, 2021). Uma vez que as linhas de transmissão possuem uma grande extensão, além de serem formadas por estruturas metálicas, o que as tornam suscetíveis a descargas atmosféricas (CARDOSO,

2017). Deste modo, resistência elevada dos aterramentos, pode resultar em desligamentos da linha de transmissão mediante descargas atmosféricas.

Segundo o Relatório de Análise de Desligamentos Forçados em Sistemas de Transmissão fornecido pela ANEEL (2018), houve 2848 desligamentos forçados em linhas de transmissão no ano de 2018. Destes desligamentos, as causas indeterminadas, descargas atmosféricas e falhas humanas foram responsáveis por 48% das ocorrências. O que é um valor elevado de desligamentos e resulta em prejuízo não só para as concessionárias, mas também para a população em geral. Uma vez que interrompe o fornecimento de energia elétrica.

Neste sentido, as empresas executantes das obras de linhas de transmissão necessitam cada vez mais, realizar o controle de qualidade dos parâmetros. Já que a entrega da obra está condicionada ao atendimento das condições de qualidade exigidos pela cliente e especificados no projeto. (JOLANDEK, 2009). Além de garantir um melhor funcionamento das LTs e prevenir possíveis desligamentos forçados.

Diante do exposto, esta pesquisa traz a seguinte problemática: **a resistência dos sistemas de aterramentos em uma obra de LT no Nordeste é capaz atender as especificações?**

1.2 OBJETIVOS

O Presente trabalho será desenvolvido com intuito de alcançar os seguintes objetivos:

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar a capacidade do processo de medição de resistência dos aterramentos em uma linha de transmissão por meio do controle estatístico do processo (CEP).

1.2.2 Objetivos Específicos

- Cálculo dos limites de controle e construção dos gráficos de controle;
- Diagnóstico das possíveis causas especiais detectadas pelos gráficos de controle;
- Cálculo do C_p , C_{pk} e C_{pm} ;

- Proposição de melhorias para os problemas encontrados.

1.3 JUSTIFICATIVA

São inúmeros os parâmetros monitorados pela fiscalização da cliente em projetos de construção de linhas de transmissão, seja na etapa de obra civil, montagem de estrutura ou lançamento de cabo, além dos altos riscos envolvidos.

Dentre as atividades de obra civil que fazem parte do escopo da construção de linhas de transmissão, tem-se a medição de resistência dos aterramentos, a qual é recomendada pela **ABNT NBR 15749** (Norma Brasileira de Medição de Resistência de Aterramento e de Potenciais na Superfície do Solo em Sistemas de Aterramento) que, por sua vez, norteia os projetos executivos mesmo com nuances nas especificações técnicas a depender da cliente.

Tratando-se de estruturas que irão transmitir energia elétrica de forma contínua, reduzir a resistência do sistema de aterramento é crucial não só para a aceitação da cliente na entrega do projeto, mas também para o bom funcionamento das Linhas de Transmissão, evitando assim prejuízo financeiro tanto na substituição de componentes quanto no fornecimento de energia elétrica por parte das concessionárias. Segundo Caetano et al. (2018), a redução na resistência do aterramento é importante para melhorar o desempenho das LTs no Brasil.

Com base no Relatório de Análise de Desligamentos Forçados emitido pela ANEEL em 2018, os desligamentos de linhas de transmissão causados por descargas elétricas são a segunda maior causa de desligamentos na rede de fornecimento de energia.

Altos índices de resistência dos aterramentos podem resultar no desligamento da linha de transmissão devido à alta incidências de raios nas estruturas ou próximo a elas. Segundo Warmi e Michishita (2016) investigações na Indonésia apontam que o número de desligamentos em LTs com alta incidência de raios está associado com os valores da resistência dos sistemas de aterramento.

Neste sentido, o trabalho em questão se justifica e é relevante mediante o alto nível de qualidade exigido pelo cliente na entrega de projetos como o de linhas de transmissão (LTs). Além de necessário para o contexto acadêmico, pois servirá de base para pesquisas futuras. Também viável no quesito financeiro, uma vez que projetos bem executados e controlados evitam retrabalhos e consequentemente prejuízo financeiro. Deste modo, uma forma de analisar e monitorar os parâmetros de qualidade exigidos pelo cliente é por meio do Controle Estatístico

do Processo que será aplicado para verificar a capacidade do processo de medição de resistência dos aterramentos em uma linha de transmissão situada na região nordeste.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção possui a estrutura teórica que norteia a pesquisa. Nela retrata o controle estatístico de processo (CEP) e suas ferramentas. Detalha ainda acerca das cartas de controle, especificamente àquelas para variáveis individuais. Além da capacidade, sua importância e indicadores C_p , C_{pk} e C_{pm} .

2.1 CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSO

O Controle Estatístico de processo é um conjunto de ferramentas de resolução de problemas que objetivam a obtenção da estabilidade do processo e melhoria na capacidade por meio da redução da variabilidade. (MONTGOMERY, 2017)

O CEP pode ser aplicado em qualquer processo, são sete ferramentas estatísticas e, para o estudo em questão, foi abordado apenas os Gráficos de Controle.

Segundo Tonini e Oliveira (2007), qualquer processo apresenta algum tipo de variabilidade, são diversas as causas e estas por sua vez estão classificadas em dois grupos. No primeiro estão as causas comuns que podem caracterizar um processo estável e sob controle, enquanto que no segundo estão as causas especiais que representam um processo instável e não controlado. Neste caso é necessário identificá-las e corrigi-las o mais rápido possível para que o processo fique estável e controlado.

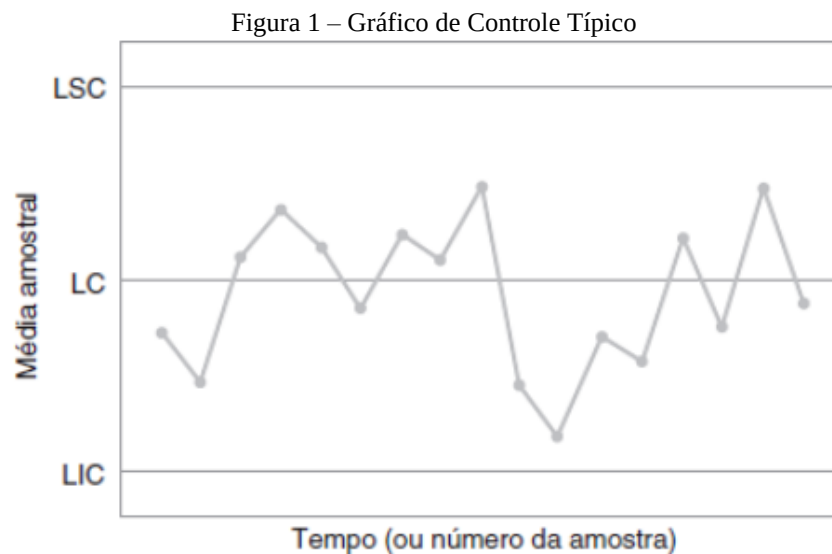
Vale ressaltar que as causas especiais podem ser em sua maioria erros na realização de determinada atividade. Seja na utilização de matéria-prima não conforme, equipamento de medição descalibrado, dentre outras.

2.2 GRÁFICOS DE CONTROLE

Para Montgomery (2017), as cartas de controle são uma das técnicas principais do controle estatístico de processo (CEP) e surgiram por volta de 1920 quando Dr. Walter desenvolveu e utilizou pela primeira vez o que conhecemos hoje por Gráficos ou Cartas de Controle. Afirma Werkema (1995), os gráficos de controle são ferramentas utilizadas para analisar e controlar a estabilidade de um processo ou variável.

Na Figura 1 está representado um gráfico de controle. Nele é possível observar as médias das medidas de uma característica da qualidade ao longo do tempo. O gráfico é

composto por uma linha central (LC), limite superior de controle (LSC) e limite inferior de controle (LIC).



Fonte: Montgomery (2017).

A Linha central representa o valor médio da característica, ou seja, o “valor ideal” caso não houvesse variabilidade. Já os limites de controle, tanto o inferior quanto o superior são utilizados para delimitar a variabilidade das amostras. Se todos os pontos do gráfico estão dentro dos limites de controle, as causas são comuns e pode indicar que o processo é estável e está sob controle se não houver tendências. Entretanto, caso algum ponto esteja fora dos limites de controle, as causas são tidas como especiais e requer uma ação corretiva.

Neste contexto, causas especiais não são as únicas responsáveis por deixar o processo fora de controle. Segundo Montgomery (2017), as regras de zonas são usadas para aumentar a sensibilidade dos gráficos de controle. Estes, por sua vez, são critérios suplementares e podem indicar que o processo está fora de controle. São 10 critérios, os quais estão representados na Tabela 1:

Tabela 1 – Regras Sensibilizantes para Gráficos de Controle

1. Um ou mais pontos fora dos limites de controle.
2. Dois ou três pontos consecutivos fora dos limites de alerta dois sigma, mais ainda dentro dos limites de controle.
3. Quatro ou cinco pontos consecutivos além dos limites de um sigma.
4. Uma sequência de oito pontos consecutivos de um mesmo lado da linha central.
5. Seis pontos em uma sequência sempre crescente ou decrescente.

6. Quinze pontos em sequência na zona (acima ou abaixo da linha central).

7. Quatorze pontos em sequência alternada para cima e para baixo.

8. Oito pontos em sequência de ambos os lados da linha central com nenhum na zona C.

9. Um padrão não usual ou não aleatório nos dados.

10. Um ou mais pontos perto de um limite de alerta ou de controle.

Fonte: Adaptada de Montgomery (2017).

Logo, ao ser detectado 2 ou mais destes critérios, presentes na Tabela 1, pode indicar que o processo está fora de controle.

Os Gráficos de Controle são classificados em dois tipos gerais, gráficos por variáveis ou gráficos por atributos. O primeiro se aplica em características da qualidade que podem ser expressas em um número por escala contínua, ou seja, uma variável (largura, temperatura, volume etc). Já o segundo se aplica em características que não são contínuas ou não podem ser representadas em uma escala quantitativa. (MONTGOMERY, 2017)

Para Ramos et al. (2013), os gráficos de controle por variável objetivam analisar e monitorar a variável da qualidade em dois quesitos, tanto no quesito centralidade quanto na medida de dispersão, e para cada finalidade existem gráficos específicos. Deste modo, o usual é monitorar o processo por um par de gráficos, um destinado a cada finalidade.

Deste modo, como o campo empírico a ser estudado trata-se de uma variável com medida individual, as demais cartas de controle não foram detalhadas.

2.2.1 Gráficos de Controle para Variáveis com Medidas Individuais

São gráficos de Controle para variáveis em que o tamanho da amostra é igual a 1. Utiliza-se em casos que as medidas de um parâmetro diferem muito pouco e produzem um desvio padrão pequeno. (RAMOS et al., 2013)

Para Montgomery (2017), as medidas individuais são comuns em processos de negócios, transações ou serviços. Em alguns casos o grande intervalo de tempo entre as observações causa problema na formação de subgrupos racionais. Nestas situações, gráficos de controle para medidas individuais são úteis.

Logo, será utilizado este tipo de gráfico de controle para a análise da medição de resistência dos aterramentos, pois são valores individuais para cada uma das 72 torres e em caso de coletas com curto intervalo de tempo as medidas oscilam muito pouco.

2.2.1.1 Gráfico de Controle para Amplitude Móvel ou Gráfico MR

O gráfico das amplitudes móveis ou gráfico MR é utilizado para controlar e monitorar a dispersão e para estimar essa variabilidade utiliza-se a amplitude móvel de duas observações consecutivas. (MONTGOMERY, 2017).

A amplitude móvel é definida por meio da Equação (1).

$$MR_j = |X_j - X_{j-1}| \quad (1)$$

Posteriormente, a média das amplitudes móveis pode ser calculada através da Equação (2).

$$\overline{MR} = \frac{1}{m-1} \sum_{j=h}^m MR_j \quad (2)$$

Em que:

- h sendo o tamanho da amplitude móvel;
- m é o tamanho amostral;
- $\overline{MR}$ é a média das amplitudes móveis;
- MR_j a j-ésima amplitude móvel.

Após o cálculo da média das amplitudes móveis, faz-se necessário o cálculo dos limites de controles para a construção do gráfico. Para calcular o limite superior de controle (LSC), bem como o limite inferior de controle (LIC), utiliza-se as Equações (3) e (5) respectivamente. Já para a linha central (LC), utiliza-se a Equação (4).

$$LSC = D_4 \overline{MR} \quad (3)$$

$$LC = \overline{MR} \quad (4)$$

$$LIC = D_3 \overline{MR} \quad (5)$$

As variáveis D_3 e D_4 são fatores para o limite de controle e variam conforme o tamanho amostral. Seus respectivos valores podem ser consultados por meio da Tabela 2.

Tabela 2 – Fatores para construção de Gráficos de Controle para variáveis
Fatores para os limites de controle

n	d_2	d_3	d_4	D_3	D_4
2	1,128	0,853	0,450	0	3,267
3	1,693	0,858	0,435	0	2,575
4	2,059	0,880	0,445	0	2,282
5	2,326	0,864	0,457	0	2,115
6	2,534	0,848	0,468	0	2,004

Fonte: Adaptada de Ramos et al. (2013).

2.2.1.2 Gráfico de Controle para Observações Individuais ou Gráfico X

Bastante semelhante ao Gráfico MR, porém o Gráfico de Controle para Observações Individuais monitora o nível de centralidade do processo. Segundo Montgomery (2017), a média amostral pode ser encontrada por meio da Equação (6).

$$\bar{X} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_j \quad (6)$$

Em que:

- m é o tamanho amostral.

Também se faz necessário o cálculo dos limites de controles para a construção do gráfico. Para calcular o LSC, bem como o LIC utiliza-se as Equações (7) e (9) respectivamente.

$$LSC = \bar{X} + \frac{3\overline{MR}}{d_2} \quad (7)$$

$$LC = \bar{X} \quad (8)$$

$$LIC = \bar{X} - \frac{3\overline{MR}}{d_2} \quad (9)$$

Onde $\bar{X}$ e $\overline{MR}$ são dados pelas Equações (6) e (2), respectivamente. Já o fator d_2 varia conforme o tamanho amostral e pode ser consultado na Tabela 2.

Após o cálculo dos limites de controle, serão construídos os gráficos de controle e posteriormente será feita a análise das medidas se estão dentro dos limites de controle.

2.2.2 Gráfico de Controle da Soma Cumulativa

Também denominado CUSUM, este tipo de gráfico de controle é utilizado quando se faz necessário analisar pequenas variações, ou ainda, analisar a sequência de pontos. Pois, incorpora toda a sequência dos valores da amostra e plota as somas cumulativas dos desvios dos valores em relação a um valor alvo. (MONTGOMERY, 2017).

O CUSUM pode ser aplicado tanto para valores individuais quanto para amostras. No caso dos valores individuais, a estatística usada é o desvio em relação a um valor alvo (H_0) e no caso de amostras com ($n > 1$) será usada a estatística do desvio em relação a média amostral. Dentre os tipos de CUSUM, tem-se o tabular, onde é utilizado as somas acumuladas dos desvios acima do valor alvo, C^+ , ou abaixo do valor alvo, C^- . Semelhante aos demais gráficos de controle, caso os desvios acumulados estejam dentro dos limites de especificação, significa que o processo apresenta variação em relação ao valor normal, porém está sob controle. Em contrapartida, valores de C^+ e C^- além dos limites de especificação, indica que o processo está deslocado acima ou abaixo do valor alvo e está fora de controle (ALVES, 2003).

2.3 CAPABILIDADE

É outra ferramenta de controle estatístico do processo bastante utilizada no meio industrial devido sua simplicidade na aplicação (RAMOS et al, 2013). O estudo da capacidade ou capacidade analisa se o processo consegue atender as especificações ou não. Schissatti (1998) afirma que para realizar esta análise não pode haver causas especiais na amostra que será utilizada.

Segundo Montgomery (2017), existem quatro índices que permitem a quantificação do desempenho do processo e denominam-se índices de capacidade, são eles: C_p , C_{pk} , C_{pm} , C_{pmk} . Neste estudo será aplicado três destes índices o C_p , C_{pk} , C_{pm} .

Para o cálculo do C_p e C_{pk} serão utilizadas as Equações (10) e (11) respectivamente.

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6\sigma} \quad (10)$$

Em que:

- σ é o desvio padrão a partir das amostras;
- LSE é o limite superior de especificação;
- LIE é o limite inferior de especificação.

Quanto > for o C_p menor será a probabilidade de o produto estar fora das especificações.

$$C_{pk} = \min\left(\frac{LSE - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LIE}{3\sigma}\right) \quad (11)$$

Em que:

- μ é a média do processo;
- σ é o desvio-padrão do processo;
- LSE e LIE são os limites de especificação.

Se $C_p = C_{pk}$ significa que o processo está centrado no valor nominal das especificações.

Diferente dos índices anteriores, o C_{pm} considera variação, distância e média em relação ao valor nominal. O cálculo se dá por meio da Equação (12).

$$C_{pm} = \frac{LSE - LIE}{6\sqrt{\sigma^2 + (\mu - T)^2}} \quad (12)$$

Em que:

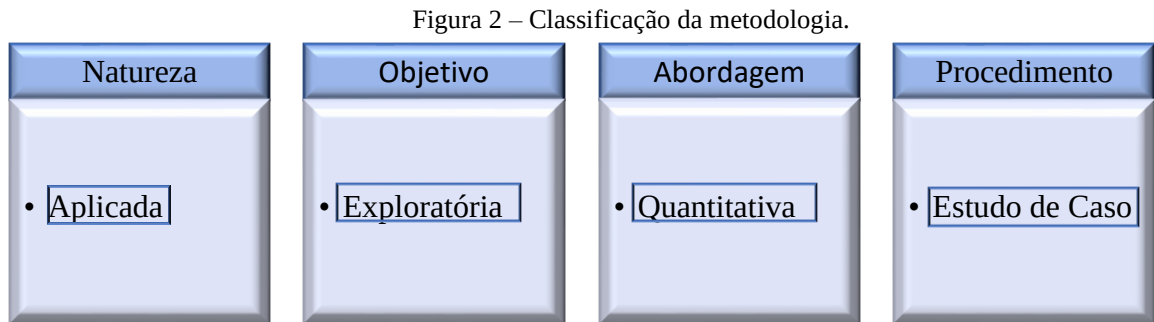
- μ é a média do processo;
- T é o valor nominal da especificação;
- σ é o desvio padrão do processo.

3 METODOLOGIA

Nesse capítulo serão apresentadas as definições metodológicas da pesquisa e dos procedimentos para coleta e análise de dados. Destaca-se ainda a existência da carta de anuência.

3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

A metodologia da pesquisa pode ser classificada quanto a sua natureza, objetivos, abordagem e procedimentos, conforme exposto na Figura 2.



Fonte: Autoria Própria (2022).

A natureza da pesquisa é aplicada, pois segundo Gerhardt e Silveira (2009) a pesquisa aplicada tem como intuito a obtenção de conhecimento que será utilizado para resolução de problemas aplicado a uma situação específica.

No que diz respeito aos objetivos, podemos classificá-la como exploratória, uma vez que seu propósito é familiarizar-se com o problema. Gil (2022) afirma que a pesquisa exploratória é flexível e considera os mais variados aspectos relacionados ao fenômeno estudado e que a coleta de dados pode ocorrer de diversas formas, mas geralmente envolve pesquisa bibliográfica ou estudo de caso.

Em relação a abordagem e ao procedimento da pesquisa, podemos defini-los, respectivamente, em quantitativa e estudo de caso, pois o estudo será aplicado em uma obra de linha de transmissão e irá analisar a variável medição de resistência do sistema de aterramento por meio de ferramentas estatísticas do CEP. Já que, segundo Gil (2022), o estudo de caso analisa de forma profunda um ou poucos casos, investigando um fenômeno dentro do contexto real e a abordagem quantitativa apresenta os resultados em termos numéricos.

3.2 ETAPAS DA PESQUISA

Inicialmente fez-se uma pesquisa bibliográfica para fundamentação teórica do estudo em questão. Posteriormente, após estabelecido contato com a empresa executante do projeto, tanto via e-mail como através de whatsapp. O gerente de projetos foi informado acerca do estudo proposto e autorizou o uso dos dados para a realização deste trabalho, mediante carta de anuência previamente assinada, a qual encontra-se em posse e guarda do autor e orientador deste trabalho.

Após isso, disponibilizou os dados das medições de resistência nas 72 torres, da T71 a T136, através dos formulários de coleta das medições de resistências, os quais foram acessados por meio de uma pasta no drive. Tanto as coletas como o preenchimento dos formulários de medição de resistência dos aterramentos foram realizados pela empresa executante da obra. Neste contexto, vale ressaltar que apenas os dados referentes a medição de resistência dos aterramentos foram disponibilizados, a qual foi a variável analisada.

No que diz respeito as coletas dos dados, conforme mencionado pela empresa, todo o procedimento de medição de resistência dos aterramentos foi realizado seguindo as recomendações da ABNT NBR 15749 (Norma Brasileira de Medição de Resistência de Aterramento e de Potenciais na Superfície do Solo em Sistemas de Aterramento).

Posteriormente, os dados foram validados, considerando a referida norma, e tabulados. A partir destas informações, calculou-se os limites de controle e por meio do *software* Excel os Gráficos de Controle para medidas individuais foram construídos, tanto da amplitude móvel quanto da média. Com base nos gráficos, analisou-se o surgimento de causas especiais e verificou a estabilidade do processo. Além dos Gráficos de Controle para Medidas Individuais, utilizou-se o CUSUM para analisar a sequência de pontos e os desvios acumulados. Para a construção do Gráfico CUSUM foi utilizado o *software* Excel com o complemento QIMacros.

Diante disso, após garantida a estabilidade do processo, fez-se a análise da capacidade por meio dos índices C_p , C_{pk} e C_{pm} a fim de verificar se o processo é capaz de atender as especificações. Por fim, foram sugeridas melhorias com o intuito de reduzir a variabilidade do processo, aumentar a capacidade e, conseqüentemente, melhorar a qualidade.

4 RESULTADOS E DISCURSÕES

Nesse capítulo serão apresentados os resultados oriundos da aplicação dos algoritmos vinculados ao controle estatístico do processo e análise da capacidade.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA

A Empresa localizada em Fortaleza/CE possui mais de 20 anos no mercado e atua com prestação de serviços na área de engenharia elétrica. São mais de 500 projetos realizados em todo o Brasil entre pequeno, médio e grande porte. Seu portfólio abrange desde instalações elétricas industriais, até a construção de subestações e linhas de transmissão, além da locação de máquinas e equipamentos pesados como caminhão munck, puller e freio etc.

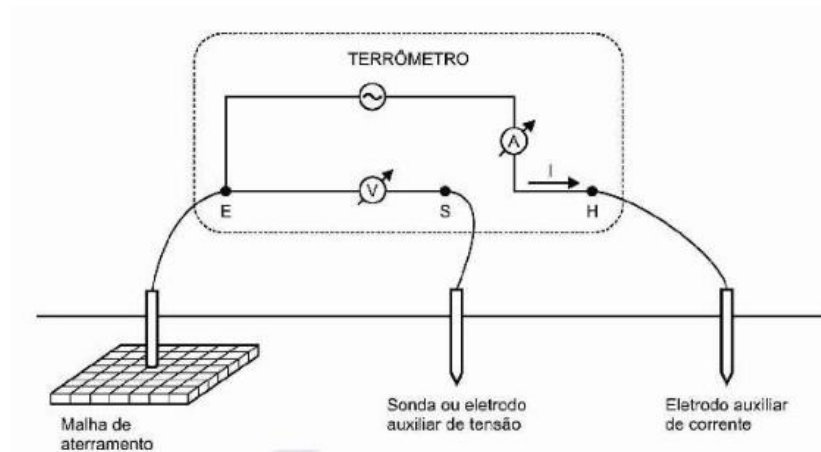
O campo empírico trata-se de uma linha de transmissão de 230 KV situada no Nordeste brasileiro com 30 km de extensão e um total de 72 estruturas.

4.2 COLETA E TABULAÇÃO DAS MEDIÇÕES DE RESISTÊNCIA DOS ATERRAMENTOS

Para que pudesse ser feita a análise em questão, a empresa realizou a medição de resistividade do solo na área em que as 72 estruturas seriam instaladas. O procedimento escolhido foi o “método de queda de potencial” segundo a NBR 15749 (2009), e para execução seguiu projeto específico com esta finalidade, no qual alinha-se às recomendações da referida norma, com certas particularidades.

A medição de resistência através do método de queda de potencial, conforme ilustrado na Figura 3, consiste em: “[...]fazer circular uma corrente através da malha de aterramento sob ensaio por intermédio de um eletrodo auxiliar de corrente e medir a tensão entre a malha de aterramento e o terra de referência (terra remoto) por meio de uma sonda [...]” (NBR 15749, 2009, p.5)

Figura 3 – Método de Queda de Potencial.



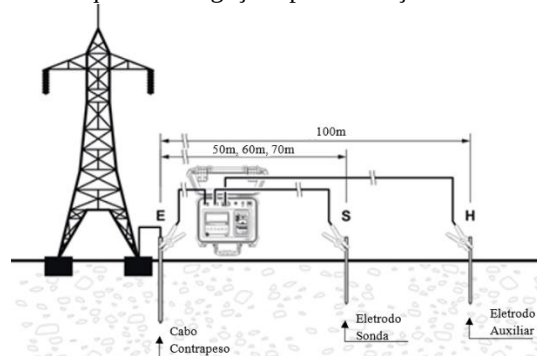
Fonte: ABNT NBR 15749 (2009).

Na Figura 3 é possível observar que são utilizados três eletrodos, os quais estão ligados a um terrômetro, equipamento específico para medir a resistência do solo em receber descargas elétricas, em três terminais. O terminal E está ligado à malha de aterramento, o H ao eletrodo auxiliar de corrente e o S à sonda. O terrômetro injeta corrente, mede a tensão na haste da sonda e encontra a resistência do aterramento por meio da Lei de Ohm.

A medição foi realizada por um profissional especializado, colaborador da empresa, e seguindo todas as orientações de segurança, além de equipamento calibrado e certificado. Nas medições, o solo estava seco e sem incidência de chuva por no mínimo 7 dias que antecederam o dia da realização. Foram feitas cerca de 8 medições por dia.

Durante o procedimento, no solo de cada estrutura, adotou-se uma distância EH de 100 m para o eletrodo auxiliar de corrente e foram feitas três medições com variações na posição do eletrodo sonda a 50 m, 60 m e 70 m conforme esquema da Figura 4:

Figura 4 - Esquema de ligações para medição com terrômetro.



Fonte: Adaptado da página da FAW-7¹ (2022)

¹ Disponível em <https://faw7.com.br/sem-categoria/medicao-de-resistencia-com-terrometro-de-alta-frequecia>. Acesso em 30 de out. 2022

Por se tratar de uma Linha de Transmissão com aterramento horizontal, para a aferição da resistividade conectou-se o ponto E ao cabo de aterramento, popularmente conhecido por contrapeso. Segundo a NBR 5422 (1985) que regulamenta os projetos de linhas de transmissão, no subtópico 9.3 deixa claro que está a critério do proprietário da linha qual será o método de aterramento utilizado considerando os fatores técnicos e econômicos envolvidos.

Deste modo, a Figura 5 ilustra a realização da medição de resistência do aterramento em uma estrutura da linha. É possível observar que os pontos de cravação dos eletrodos foram cravados transversalmente a linha de transmissão, conforme projeto executivo interno aprovado pela cliente.

Figura 5 – Realização do procedimento de medição de resistência dos aterramentos



Fonte: Autoria Própria² (2022)

Os dados das medições em todas as 72 estruturas da linha foram fornecidos pela empresa para a realização deste estudo. Para cada torre há 3 medições, com a sonda a 50m, 60m e 70m conforme representado no Quadro 1:

Quadro 1 - Medição de resistência dos aterramentos

Estrutura Nº	Medição de Resistência (Ω)			Estrutura Nº	Medição de Resistência (Ω)		
	50 m	60 m	70 m		50 m	60 m	70 m
71	11,87	12,44	12,99	105	4,85	4,94	5,37

² Foto tirada durante estágio na empresa e autorizada a utilização no estudo.

Estrutura Nº	Medição de Resistência (Ω)			Estrutura Nº	Medição de Resistência (Ω)		
	50 m	60 m	70 m		50 m	60 m	70 m
72	5,65	5,89	6,03	106	5,48	5,59	5,88
73	3,64	3,99	4,03	106A	5,84	6,14	6,43
74	3,30	3,37	3,54	106B	5,35	5,89	6,28
75	4,74	4,8	5,06	107	11,71	11,95	12,2
76	6,52	6,58	7,07	107A	10,09	10,31	10,65
77	12,86	13,79	13,86	107B	6,46	6,57	6,73
78	15,87	16,19	16,43	108	13,12	13,21	14,06
79	11,81	12,15	12,53	109	7,05	7,24	7,45
80	15,43	16,1	16,41	110	7,65	7,98	8,45
81	14,06	14,24	14,55	111	4,55	4,66	4,89
82	13,06	13,51	13,99	112	3,61	3,83	3,92
82A	13,17	13,89	14,19	113	7,43	7,88	8,39
82B	12,70	12,9	13,29	114	3,50	3,84	3,86
83	12,64	12,73	12,9	115	5,49	5,74	5,79
84	14,19	14,21	14,39	116	12,19	12,21	12,64
85	8,07	8,31	8,65	117	4,47	4,62	4,79
86	12,98	13,37	13,65	118	3,81	3,99	4,33
87	12,89	13,17	13,51	119	5,80	6,30	6,51
88	13,91	14,34	14,61	120	10,13	10,24	10,34
89	13,03	13,27	13,65	121	5,13	5,54	5,81
90	13,41	13,57	13,72	122	4,46	4,59	4,66
91	13,74	13,91	14,05	123	3,98	4,18	4,57
92	13,09	13,48	13,61	124	5,75	5,87	5,98
93	11,08	11,83	12,27	125	4,23	4,43	4,8
94	14,95	15,13	15,15	126	8,54	8,6	8,72
95	11,08	11,65	11,95	127	6,47	6,52	6,71
96	12,74	12,84	13,36	128	4,69	4,7	4,94
97	6,83	7,15	7,24	129	6,74	6,84	7,44
98	12,77	12,96	13,48	130	5,12	5,18	5,5
99	7,84	8,01	8,33	131	9,67	10,1	10,59
100	6,89	7,58	8,16	132	6,08	6,29	6,58
101	12,59	12,87	13,42	133	7,86	7,91	8,43

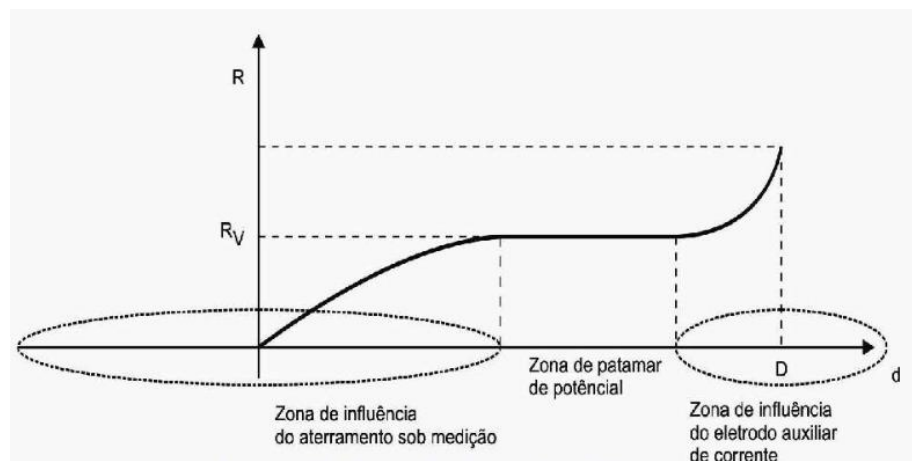
Estrutura Nº	Medição de Resistência (Ω)			Estrutura Nº	Medição de Resistência (Ω)		
	50 m	60 m	70 m		50 m	60 m	70 m
102	10,53	10,81	11,25	134	7,50	7,65	8,13
103	11,65	12,49	12,58	135	7,02	7,32	7,84
104	6,94	7,63	8,38	136	13,80	13,95	14,87

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

Observa-se que os valores das medições dispostos no Quadro 1 variam bastante entre as 72 torres. A menor resistência coletada foi de $3,30\Omega$ com a sonda a 50 metros da estrutura de nº 73, enquanto que o maior valor foi de $16,43\Omega$ com a sonda a uma distância de 70 metros da estrutura de nº 78. Ainda é visível que as resistências dos aterramentos têm uma redução à medida que a sonda se aproxima da estrutura ou aumentam à medida que a sonda se distancia da torre. Esse fenômeno se aplica as medições em todas as estruturas, entretanto a variação é bem pequena.

Segundo a NBR 15749 (2009, p.7), em teoria, existe uma curva característica da medição de resistência dos aterramentos. Logo, se as medições de resistência em função da distância da sonda seguem esse comportamento, significa que o procedimento foi realizado de forma correta e as medições são aceitas. A curva característica da medição de resistência está representada na Figura 6.

Figura 6 – Curva característica da resistência de aterramento de um eletrodo



Fonte: ABNT NBR 15749 (2009).

Conforme ilustrado na Figura 6, a curva característica representa a resistência dos aterramentos em função da distância da sonda. O gráfico é composto por duas zonas de influência em que os valores da resistência são exponencialmente superiores ou inferiores,

respectivamente, à medida que a distância D da sonda aumenta ou diminui. Bem como, uma zona de potencial que está a uma certa distância d , em que a resistência R_v não sofre influência em sua medição e representa o valor verdadeiro da resistência do aterramento.

Diante do exposto, pode-se afirmar que os valores coletados e representados no Quadro 1 estão seguindo o comportamento da curva característica ilustrado na Figura 6, entretanto para garantir que os valores coletados não estão na zona de influência, conforme a NBR 15749 (2009, p.8), é necessário que a diferença entre os valores medidos com o eletrodo a maior e a menor distância em relação ao valor central não ultrapasse 10%.

Deste modo, será aplicado a regra em todos os valores coletados, os quais estão representados no Quadro 1. Com isso, M_1 será a diferença entre as medições a 60m e 50m. Já M_2 será a diferença entre os valores coletados a 70m e 60m. Todos os valores de M_1 e M_2 estão representados no Quadro 2:

Quadro 2 – Variação das medições de resistência M_1 e M_2

Estrutura Nº	Variação das Medições		Estrutura Nº	Variação das Medições	
	M_1	M_2		M_1	M_2
71	0,57	0,55	105	0,09	0,43
72	0,24	0,14	106	0,11	0,29
73	0,35	0,04	106A	0,30	0,29
74	0,07	0,17	106B	0,54	0,39
75	0,06	0,26	107	0,24	0,25
76	0,06	0,49	107A	0,22	0,34
77	0,93	0,07	107B	0,11	0,16
78	0,32	0,24	108	0,09	0,85
79	0,34	0,38	109	0,19	0,21
80	0,67	0,31	110	0,33	0,47
81	0,18	0,31	111	0,11	0,23
82	0,45	0,48	112	0,22	0,09
82A	0,72	0,30	113	0,45	0,51
82B	0,20	0,39	114	0,34	0,02
83	0,09	0,17	115	0,25	0,05
84	0,02	0,18	116	0,02	0,43
85	0,24	0,34	117	0,15	0,17
86	0,39	0,28	118	0,18	0,34
87	0,28	0,34	119	0,50	0,21
88	0,43	0,27	120	0,11	0,10
89	0,24	0,38	121	0,41	0,27
90	0,16	0,15	122	0,13	0,07
91	0,17	0,14	123	0,20	0,39
92	0,39	0,13	124	0,12	0,11
93	0,75	0,44	125	0,20	0,37

Estrutura Nº	Variação das Medições		Estrutura Nº	Variação das Medições	
	M₁	M₂		M₁	M₂
94	0,18	0,02	126	0,06	0,12
95	0,57	0,30	127	0,05	0,19
96	0,10	0,52	128	0,01	0,24
97	0,32	0,09	129	0,10	0,60
98	0,19	0,52	130	0,06	0,32
99	0,17	0,32	131	0,43	0,49
100	0,69	0,58	132	0,21	0,29
101	0,28	0,55	133	0,05	0,52
102	0,28	0,44	134	0,15	0,48
103	0,84	0,09	135	0,30	0,52
104	0,69	0,75	136	0,15	0,92

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

Após o cálculo de M_1 e M_2 , os quais representam a variação de resistência das medições com sonda a 50m e 70m em relação ao valor central, eletrodo a 60m. É necessário verificar se essas variações, representadas no Quadro 2, apresentam valor inferior a 10% do valor central.

Por meio de uma razão de M_1 e M_2 em relação a medição a 60m, calculou-se P_1 e P_2 que representam, respectivamente, a razão das variações M_1 e M_2 em relação ao valor central, em percentual. Os valores de P_1 e P_2 para cada torre estão representados no Quadro 3:

Quadro 3 – Razão das variações P_1 e P_2 em relação ao valor central

Estrutura Nº	% das Variações		Estrutura Nº	% das Variações	
	P₁	P₂		P₁	P₂
71	4,6%	4,4%	105	1,8%	8,7%
72	4,1%	2,4%	106	2,0%	5,2%
73	8,8%	1,0%	106A	4,9%	4,7%
74	2,1%	5,0%	106B	9,2%	6,6%
75	1,2%	5,4%	107	2,0%	2,1%
76	0,9%	7,4%	107A	2,1%	3,3%
77	6,7%	0,5%	107B	1,7%	2,4%
78	2,0%	1,5%	108	0,7%	6,4%
79	2,8%	3,1%	109	2,6%	2,9%
80	4,2%	1,9%	110	4,1%	5,9%
81	1,3%	2,2%	111	2,4%	4,9%
82	3,3%	3,6%	112	5,7%	2,3%
82A	5,2%	2,2%	113	5,7%	6,5%
82B	1,6%	3,0%	114	8,9%	0,5%
83	0,7%	1,3%	115	4,4%	0,9%
84	0,1%	1,3%	116	0,2%	3,5%
85	2,9%	4,1%	117	3,2%	3,7%
86	2,9%	2,1%	118	4,5%	8,5%

Estrutura Nº	% das Variações		Estrutura Nº	% das Variações	
	P ₁	P ₂		P ₁	P ₂
87	2,1%	2,6%	119	7,9%	3,3%
88	3,0%	1,9%	120	1,1%	1,0%
89	1,8%	2,9%	121	7,4%	4,9%
90	1,2%	1,1%	122	2,8%	1,5%
91	1,2%	1,0%	123	4,8%	9,3%
92	2,9%	1,0%	124	2,0%	1,9%
93	6,3%	3,7%	125	4,5%	8,4%
94	1,2%	0,1%	126	0,7%	1,4%
95	4,9%	2,6%	127	0,8%	2,9%
96	0,8%	4,0%	128	0,2%	5,1%
97	4,5%	1,3%	129	1,5%	8,8%
98	1,5%	4,0%	130	1,2%	6,2%
99	2,1%	4,0%	131	4,3%	4,9%
100	9,1%	7,7%	132	3,3%	4,6%
101	2,2%	4,3%	133	0,6%	6,6%
102	2,6%	4,1%	134	2,0%	6,3%
103	6,7%	0,7%	135	4,1%	7,1%
104	9,0%	9,8%	136	1,1%	6,6%

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

Ao analisar os percentuais de P₁ e P₂ representados no Quadro 3, observa-se que os valores estão variando de modo que nenhum possui percentual superior a 10%. Ou seja, significa que os valores das medições dos aterramentos coletados para as distâncias de 50m, 60m e 70 m estão dentro da zona de potencial representada na Figura 6 quase de forma linear.

Deste modo, através do método de queda de potencial e seguindo as orientações do projeto executivo, a resistência do aterramento das estruturas será a média aritmética das três medições apresentadas no Quadro 1, conforme representado no Quadro 4:

Quadro 4 – Resistência Média dos aterramentos das estruturas

Estrutura Nº	Nº da amostra (i)	Resistência Média dos aterramentos (Ω)	Estrutura Nº	Nº da amostra (i)	Resistência Média dos aterramentos (Ω)
71	1	12,43	105	37	5,05
72	2	5,86	106	38	5,65
73	3	3,89	106A	39	6,14
74	4	3,40	106B	40	5,84
75	5	4,87	107	41	11,95
76	6	6,72	107A	42	10,35

Estrutura Nº	Nº da amostra (i)	Resistência Média dos aterramentos (Ω)	Estrutura Nº	Nº da amostra (i)	Resistência Média dos aterramentos (Ω)
77	7	13,50	107B	43	6,59
78	8	16,16	108	44	13,46
79	9	12,16	109	45	7,25
80	10	15,98	110	46	8,03
81	11	14,28	111	47	4,70
82	12	13,52	112	48	3,79
82A	13	13,75	113	49	7,90
82B	14	12,96	114	50	3,73
83	15	12,76	115	51	5,67
84	16	14,26	116	52	12,35
85	17	8,34	117	53	4,63
86	18	13,33	118	54	4,04
87	19	13,19	119	55	6,20
88	20	14,29	120	56	10,24
89	21	13,32	121	57	5,49
90	22	13,57	122	58	4,57
91	23	13,90	123	59	4,24
92	24	13,39	124	60	5,87
93	25	11,73	125	61	4,49
94	26	15,08	126	62	8,62
95	27	11,56	127	63	6,57
96	28	12,98	128	64	4,78
97	29	7,07	129	65	7,01
98	30	13,07	130	66	5,27
99	31	8,06	131	67	10,12
100	32	7,54	132	68	6,32
101	33	12,96	133	69	8,07
102	34	10,86	134	70	7,76
103	35	12,24	135	71	7,39
104	36	7,65	136	72	14,21

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

A partir das Resistências Médias apresentadas no Quadro 4, foi aplicado o Controle Estatístico do Processo a fim de verificar se o processo estava controlado, e posteriormente sua capacidade.

4.3 APLICAÇÃO DO CONTROLE ESTATÍSTICO DO PROCESSO (CEP)

Após a tabulação e validação dos dados coletados nas medições de resistência em todas as 72 estruturas, foi aplicado o Gráfico de controle como ferramenta do CEP.

4.3.1 Gráfico de Controle

Dentre os tipos de gráficos, a carta de controle por variáveis é a mais adequado já que a característica da qualidade a ser analisada é uma variável classificada como quantitativa contínua (MONTGOMERY, 2017).

Como os valores das resistências dos aterramentos são amostras únicas, ou seja, um único valor para cada torre, Ramos et al. (2013) recomenda os gráficos de controle para medidas individuais. Neste caso, com base em Montgomery (2017), será aplicado o Gráfico MR para monitorar dispersão e Gráfico X para analisar a centralidade do processo.

Montgomery (2017) afirma que, para o Gráfico MR, o primeiro passo é estimar a variabilidade e, neste caso, utiliza-se a amplitude móvel de duas observações consecutivas definida pela Equação 1:

$$MR_j = |X_j - X_{j-1}|$$

Onde o valor da primeira amostra é a resistência média na estrutura de nº 71, enquanto a última é resistência na estrutura de nº 136, dados apresentados no Quadro 4.

Para exemplificar, tem-se o cálculo da amplitude móvel para a segunda amostra:

$$MR_2 = |X_2 - X_1| = |5,86 - 12,46|$$

$$MR_2 = 6,58$$

O mesmo se aplica para o cálculo das demais amplitudes móveis, com exceção de MR_1 que será nulo, pois não há valor que o antecede, conforme mostra o Quadro 5:

Quadro 5 – Amplitude Móvel da Resistência Média nos aterramentos das estruturas

Nº da amostra (j)	Amplitude Móvel – (MR _j)	Nº da amostra (j)	Amplitude Móvel – (MR _j)
1	-	37	2,60
2	6,58	38	0,60
3	1,97	39	0,49
4	0,48	40	0,30
5	1,46	41	6,11
6	1,86	42	1,60
7	6,78	43	3,76
8	2,66	44	6,88
9	4,00	45	6,22
10	3,82	46	0,78
11	1,70	47	3,33
12	0,76	48	0,91
13	0,23	49	4,11
14	0,79	50	4,17
15	0,21	51	1,94
16	1,51	52	6,67
17	5,92	53	7,72
18	4,99	54	0,58
19	0,14	55	2,16
20	1,10	56	4,03
21	0,97	57	4,74
22	0,25	58	0,92
23	0,33	59	0,33
24	0,51	60	1,62
25	1,67	61	1,38
26	3,35	62	4,13
27	3,52	63	2,05
28	1,42	64	1,79
29	5,91	65	2,23
30	6,00	66	1,74

Nº da amostra (j)	Amplitude Móvel – (MR _j)	Nº da amostra (j)	Amplitude Móvel – (MR _j)
31	5,01	67	4,85
32	0,52	68	3,80
33	5,42	69	1,75
34	2,10	70	0,31
35	1,38	71	0,37
36	4,59	72	6,81

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

Em seguida calcula-se $\overline{MR}$, a média das amplitudes móveis por meio da Eq. 2:

$$\overline{MR} = \frac{1}{m-1} \sum_{j=h}^m MR_j$$

$$\overline{MR} = \frac{1}{72-1} \sum_1^{72} MR_2 + MR_3 + MR_4 + MR_5 + MR_6 + \dots + MR_{72}$$

Como não existe valor para MR₁, este, por sua vez, não entra para o cálculo da média das amplitudes móveis.

Assim, substituindo os valores de MR₂ a MR₇₂ tem-se:

$$\overline{MR} = \frac{1}{71} \sum_1^{72} 6,58 + 1,97 + 0,48 + 1,46 + 1,86 + \dots + 6,81$$

$$\overline{MR} = 2,73 \, \Omega$$

Após isso, utiliza-se a Eq. 4 para o cálculo da linha central (LC):

$$LC = \overline{MR}$$

Obtendo-se, então:

$$LC = 2,73 \, \Omega$$

Posteriormente, o limite superior de controle (LSC) é calculado utilizando a Eq. 3:

$$LSC = D_4 \overline{MR}$$

Para isso, foi adotado o tamanho amostral de $n = 2$ por se tratar de valores sucessivos e com base Tabela 2, adaptada de Ramos et al. (2013), tem-se o fator $D_4 = 3,267$.

Logo, substituindo os valores na equação, tem-se:

$$LSC = 3,267 * 2,73$$

$$LSC = 8,91 \Omega$$

Já para o cálculo do limite inferior de controle, utiliza-se a Eq. 5 :

$$LIC = D_3 \overline{MR}$$

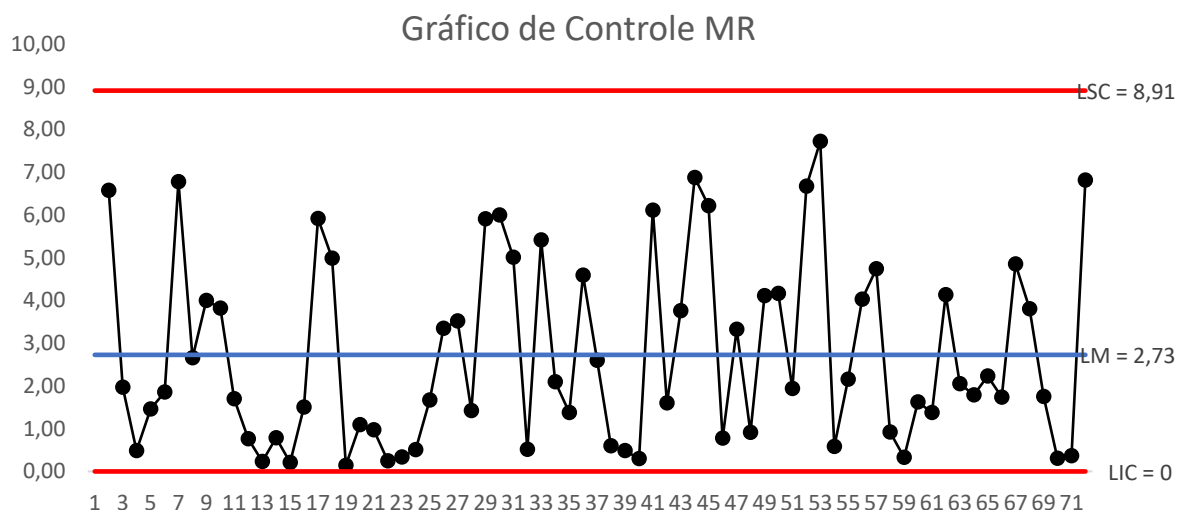
Ainda considerando $n = 2$, tem-se $D_3 = 0$, com base na Tabela 2, utilizada para consulta dos fatores na construção do gráfico. Deste modo, substituindo os valores na equação, tem-se:

$$LIC = 0 * 2,73$$

$$LIC = 0 \Omega$$

Após os cálculos dos limites de controle e da linha central, utilizou-se o *software* Excel eletrônica para a construção do gráfico de controle MR, onde foram plotados todos as médias móveis das 72 amostras coletadas conforme ilustra o Gráfico 1:

Gráfico 1 – Gráfico de Controle para Amplitude móvel



Fonte: Dados da pesquisa (2022).

A partir da análise do gráfico é possível observar que as 72 amostras encontram-se delimitadas entre os limites de controle. Ou seja, todos os valores são menores que o $LSC = 8,91 \Omega$, bem como maiores que o $LIC = 0 \Omega$. Entretanto apenas isso não é suficiente para definir a

estabilidade do processo. É necessário que não haja padrões, ou seja, que os pontos estejam distribuídos aleatoriamente.

Ainda no Gráfico 1, é possível perceber uma sequência decrescente entre os pontos 9, 10, 11, 12 e 13 com valores de 4, 3,82 , 1,70 e 0,76 Ω , respectivamente. Também observa-se uma sequência crescente entre os pontos 21, 22, 23, 24, 25, 26 e 27. Além dessas tendências, outras são observadas, o que pode ser um fator preocupante, pois talvez indique que o processo está fora de controle mesmo não havendo causas especiais.

Apesar de atendidos alguns destes critérios no gráfico da amplitude móvel, podendo indicar instabilidade, cuidados devem ser tomados, pois Montgomery (2017) afirma que as amplitudes móveis são correlacionadas e podem induzir a tendência ou ciclos em seu gráfico. Deste modo, faz-se necessário a utilização do gráfico X para verificar a centralidade do processo de medição de resistência dos aterramentos, uma vez que o gráfico MR não fornece uma informação útil a cerca do deslocamento na variabilidade do processo.

Foi construído o gráfico X, para medidas individuais, com base nas resistências dos aterramentos das 72 amostras, representadas no Quadro 4, e para isso faz-se necessário encontrar os limites de controle, bem como a linha central. Para estes cálculos foram utilizadas as equações 7, 8 e 9.

Iniciando pela linha central, por meio da Equação 8, seu valor é obtido através da média amostral. Com isso, para o calculo da média amostral, utiliza-se a equação 6:

$$\bar{X} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_j$$

Na qual , seu resultado é obtido por meio da média de todas as amostras representadas no Quadro 4 em que $m = 72$, pois representa o total de amostra coletadas.

Substituindo os valores na equação, tem-se:

$$\begin{aligned}\bar{X} &= \frac{1}{72} \sum_{j=1}^{72} x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + \dots + x_{72} \\ \bar{X} &= \frac{1}{72} \sum_{j=1}^{72} 12,43 + 5,86 + 3,89 + 3,40 + 4,87 + 6,72 + \dots + 14,21 \\ \bar{X} &= 9,24 \Omega\end{aligned}$$

A partir daí, encontra-se o valor da linha central por meio da Eq. 8:

$$LC = \bar{X}$$

Sendo possível afirmar que:

$$LC = 9,24 \, \Omega$$

Já para os limites inferior e superior de controle utilizou-se $n = 2$. Deste modo, a variável $d_2 = 1,128$ considerando a Tabela 2 adaptada de Ramos et al. (2013).

Aplicando a Eq. 7 para o cálculo do limite superior de controle, tem-se:

$$LSC = \bar{X} + \frac{3\overline{MR}}{d_2}$$

Substituindo d_2 e a média das amplitudes móveis, obtêm-se:

$$LSC = 9,24 + \frac{3 * 2,73}{1,128}$$

$$LSC = 16,49 \, \Omega$$

Agora, aplicando a Eq. 9 para calcular o limite inferior de controle:

$$LIC = \bar{X} - \frac{3\overline{MR}}{d_2}$$

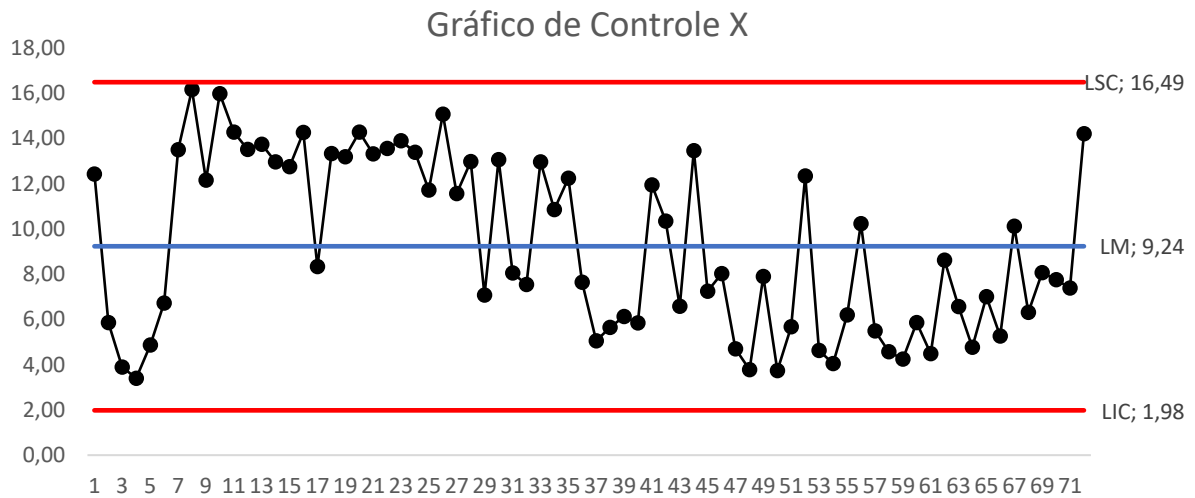
Substituindo d_2 e a média das amplitudes móveis, obtêm-se:

$$LIC = 9,24 - \frac{3 * 2,73}{1,128}$$

$$LIC = 1,98 \, \Omega$$

Da mesma forma que no Gráfico MR, após o cálculo da LC e dos LIC e LSC, foi usado o *software* Excel na construção do Gráfico de Controle X para medidas individuais. Nele, foram plotadas todas as resistências dos aterramentos conforme ilustra o Gráfico 2:

Gráfico 2 – Gráfico de Controle para valores individuais



A partir do Gráfico 2, é possível verificar que todos os pontos se encontram entre os limites de controle, LIC e LSC respectivamente 1,98 e 16,49 Ω . Ainda é possível visualizar uma tendência abaixo da linha média, onde quase todas as amostras, da 46 a 71, são inferiores a 9,24 Ω . Apenas os pontos 52, 56 e 67 possuem valores acima. Neste caso, pode-se considerar como uma “tendência boa” tendo em vista que valores de resistência menores, implicam em um bom funcionamento da Linha de Transmissão e são um dos principais critérios de aceitação da cliente na entrega da obra.

Em contrapartida, observa-se também, ainda no Gráfico 2, que há uma grande concentração de pontos acima da linha média. A partir do ponto 7 até o 28, todos possuem valor superior a 9,24 Ω , o qual representa a linha média, com exceção da amostra 17 = 8,34 Ω (Torre 83). Estas amostras representam as torres de nº 77 até a 96 com altos valores de resistência dos aterramentos. Principalmente os pontos 8, 10 e 26 com resistência acima de 15 Ω , amostras referentes as torres de nº 78, 80 e 94, respectivamente.

Nestes pontos em que as resistências dos aterramentos foram elevadas, apesar de não serem considerados causas especiais, são valores preocupantes. Considerando que não houve erros de medição, requer uma reavaliação e melhoria dos sistemas de aterramento. Instalações de novas fases de contrapeso, seria uma alternativa, pois significa que as fases de aterramento instaladas não são suficientes para uma redução significativa na resistência e isso pode causar futuros desligamentos na linha causados por incidência de raio. (CARVALHO, 2021)

Sendo assim, com base apenas na análise das cartas de controle representadas nos Gráficos 1 e 2, não se pode dizer com certeza que o processo está sob controle estatístico, uma

vez que os gráficos de controle não são sensíveis a pequenas variações, além de ignorar informações acerca da sequência de pontos (MONTGOMERY, 2017). Entretanto, com base nas regras sensibilizantes, pode-se afirmar que o processo não está controlado, uma vez que atende pelo menos 2 critérios da Tabela 1.

Deste modo, os pontos que estão fora de controle serão removidos considerando as regras sensibilizantes da Tabela 1 e os Gráficos 1 e 2 serão recalculados. Na Tabela 3 estão elencados os pontos que serão removidos, bem como o critério adotado considerando as regras sensibilizantes.

Tabela 3 – Pontos fora de controle mediante as regras sensibilizantes

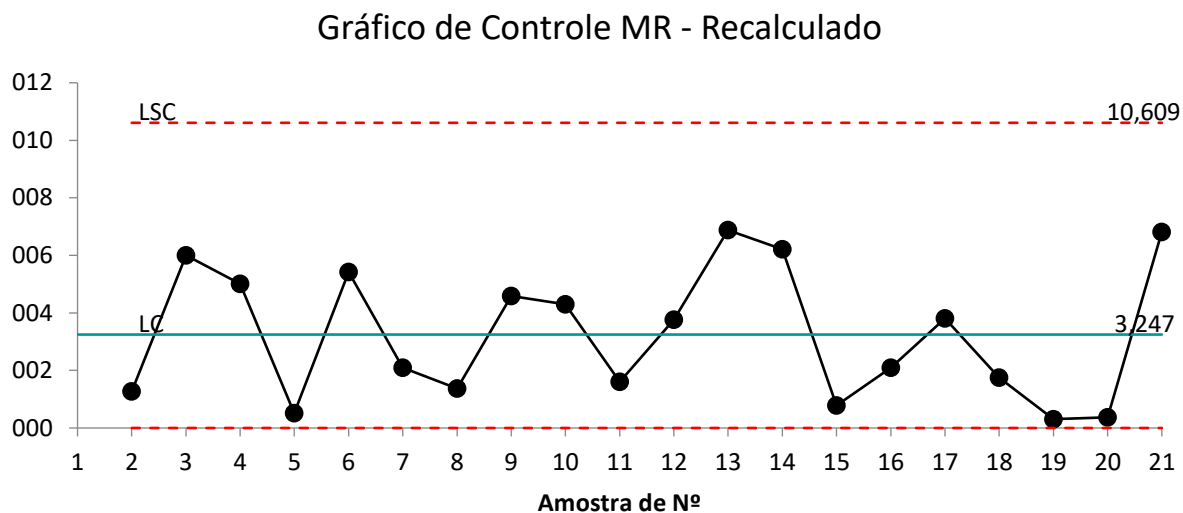
Pontos Removidos	Critério Adotado
1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8.	Oito pontos em sequência de ambos os lados da linha central com nenhum na zona C (entre 8 e 10).
9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 e 16.	Oito pontos em sequência de ambos os lados da linha central com nenhum na zona C (entre 8 e 10).
18, 19, 20, 21, 22, 23, 24 e 25.	Oito pontos consecutivos além dos limites de um sigma (maiores que 11,65).
21, 22, 23, 24, 25, 26, 27 e 28.	Uma sequência de oito pontos consecutivos de um mesmo lado da linha central.
37, 38, 39 e 40.	Quatro ou cinco pontos consecutivos além dos limites de um sigma (menores que 6,82).
47, 48, 49, 50, 51, 52, 53 e 54.	Oito pontos em sequência de ambos os lados da linha central com nenhum na zona C (entre 8 e 10).
54, 55, 56, 57, 58, 59, 60 e 61.	Oito pontos em sequência de ambos os lados da linha central com nenhum na zona C (entre 8 e 10).
59, 60, 61, 62, 63, 64, 65 e 66.	Uma sequência de oito pontos consecutivos de um mesmo lado da linha central (menores que 9,24).

Fonte: Dados da pesquisa (2022).

A partir da análise de sensibilização e remoção dos pontos apresentados na Tabela 3, os gráficos de controle para medidas individuais foram calculados utilizando as mesmas equações e sequência lógica apresentada nos Gráficos 1 e 2.

Com isso, obteve-se o Gráfico de controle recalculado para as amplitudes móveis. O qual está representado no Gráfico 3.

Gráfico 3: Gráfico de Controle recalculado para Amplitude Móvel

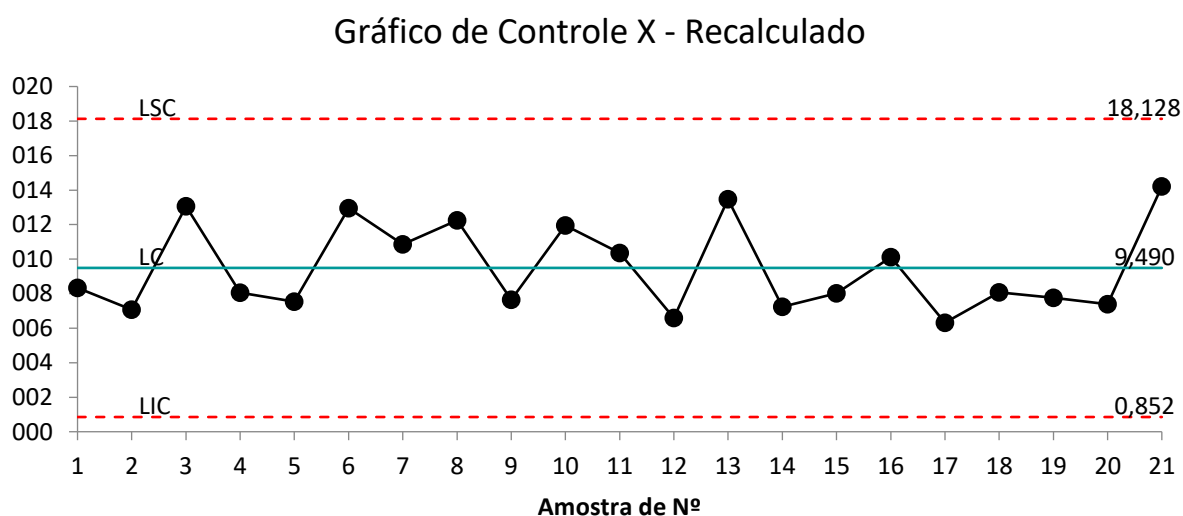


Fonte: Dados da pesquisa (2022).

No Gráfico de Controle MR recalculado, representado pelo Gráfico 3, os LSC e LIC são respectivamente 10,609 e zero. A LC é 3,247 e todas as 21 amostras estão distribuídas aleatoriamente entre os limites de controle.

Com isso, o Gráfico de controle X também foi recalculado conforme representado no Gráfico 4.

Gráfico 4: Gráfico de Controle recalculado para valores individuais



Fonte: Dados da pesquisa (2022).

Ao observar o gráfico de controle X recalculado, representado pelo Gráfico 4, todos os pontos também estão distribuídos aleatoriamente entre o LSC = 18,128 Ω e o LIC = 0,852 Ω . A linha central é 9,49 Ω e os pontos não apresentam tendências. Deste modo, pode-se afirmar que o processo está sob controle após a remoção das tendências.

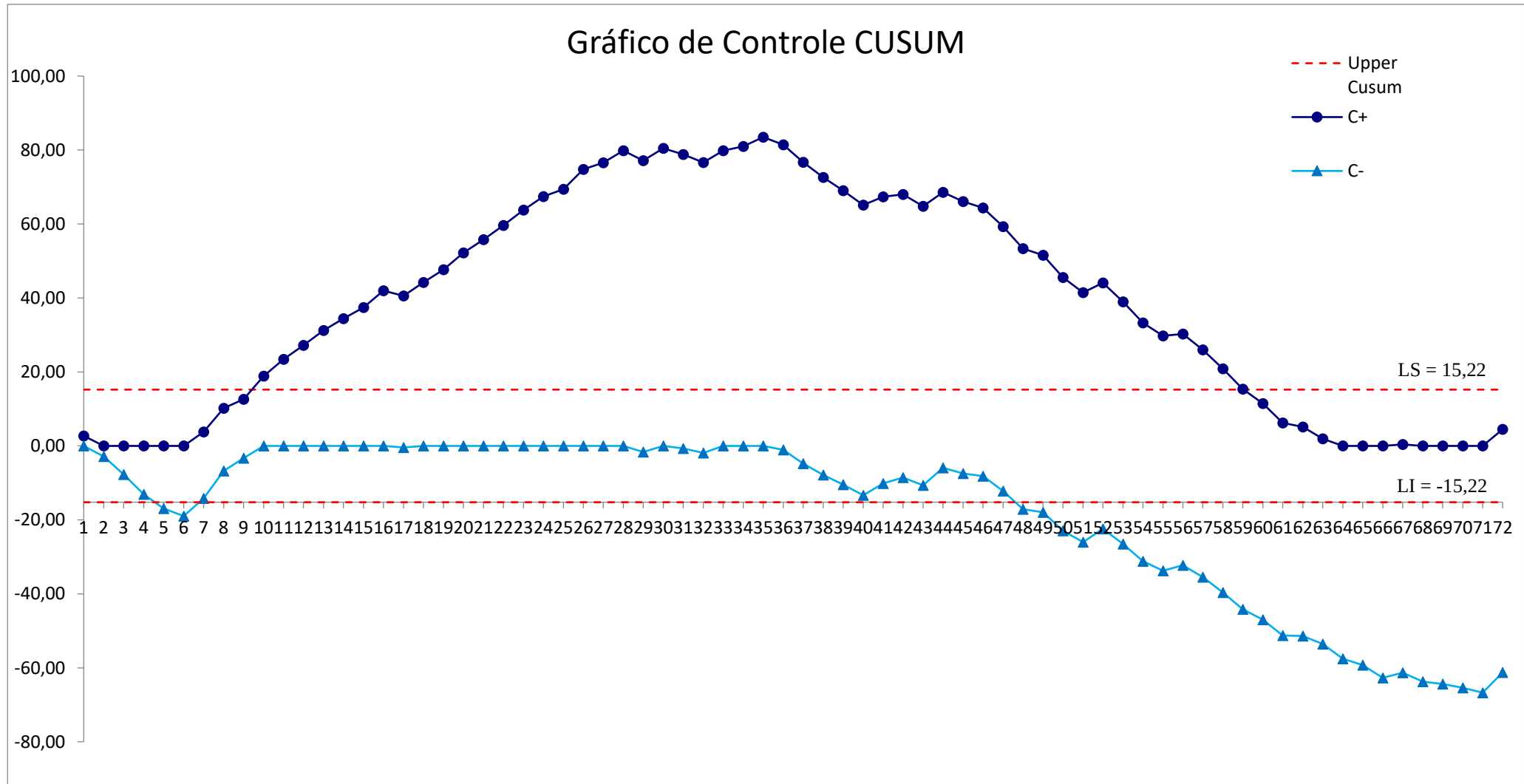
Diante disso, a análise CUSUM (*Cumulative Sum Control Charts*), também denominada de Gráfico de Controle de Soma Acumulada, é recomendada para aferir a estabilidade do processo. Uma vez que, a capacidade deste processo em atender as especificações só poderá ser analisada se o processo estiver sob controle estatístico.

Para Alves (2003), o Gráfico de Controle de Soma Acumulada detecta pequenas variações por meio de coletas sucessivas, pois considera a soma acumulada dos desvios de cada valor individual em relação a medida estipulada pela hipótese.

Na construção do CUSUM, foi utilizado as resistências médias dos aterramentos apresentados no Quadro 4. Para isso, considerou-se os parâmetros $H = 5$; $k = 0,5$ e a estimativa do desvio padrão com base na média da amplitude móvel. Com isso, por meio do *software* Excel e o complemento QIMacros³, obteve-se o Gráfico 5:

³ Disponível em <https://www.qimacros.com>. Acesso em 30 de outubro de 2022.

Gráfico 5 – Gráfico de Controle de Soma Acumulada



Fonte: Dados da pesquisa (2022).

Ao observar o Gráfico 5, é perceptível o que já havia sido constatado por meio das regras sensibilizantes apresentadas na Tabela 1. O processo não⁺ estava sob controle estatístico, uma vez que muitos pontos de C^+ e C^- , que consideram o desvio acumulado em relação à média, estão fora dos limites de especificação, os quais são $LS = 15,22 \Omega$ e $LI = -15,22 \Omega$, respectivamente limite superior e limite inferior, os quais estão representados pelas linhas vermelhas tracejadas.

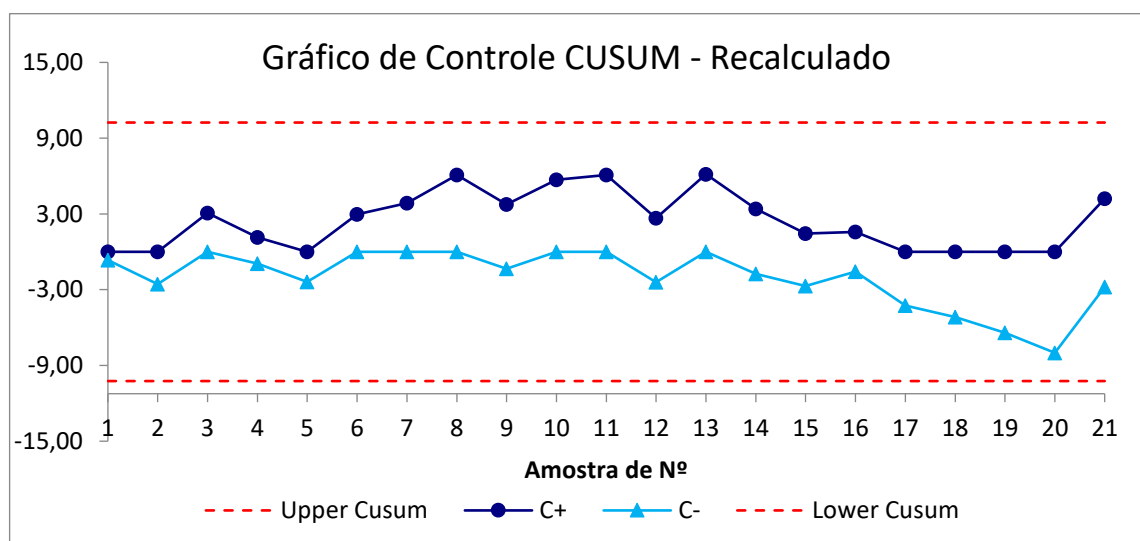
Já a partir da amostra nº 10 (Torre 79), o C^+ , desvio acumulado acima do valor alvo, ultrapassa o limite superior de especificação. Depois, esse desvio acumulado só aumenta e permanece fora dos limites até a amostra de nº 59 (Torre 122). Isso ocorre porque há um grande número seguido de amostras com valores acima da média, o que resulta em um desvio acumulado exponencialmente maior.

Ao analisarmos o desvio acumulado abaixo do valor alvo, C^- , acontece algo semelhante. É visível a partir da amostra de nº48 que esses pontos ultrapassam o limite inferior de especificação e se distanciam cada vez mais do valor alvo. Isso acontece porque há um grande número seguido de valores abaixo da média e isso joga o desvio acumulado para fora dos limites de especificação.

Diante disso, após a remoção das tendências e a construção dos gráficos de controle recalculados, os quais estão representados pelos Gráficos 3 e 4. Faz-se necessário uma nova análise CUSUM para verificar se o processo está controlado considerando a soma dos desvios após a remoção dos pontos apresentados na Tabela 3.

Para o CUSUM recalculado, utilizou-se os mesmos parâmetros que foram considerados na construção do Gráfico 5. Com isso, obteve-se o Gráfico 6.

Gráfico 6: Gráfico de Controle recalculado para soma acumulada



Fonte: Dados da pesquisa (2022).

A partir do Gráfico de Controle CUSUM recalculado, representado pelo Gráfico 6, é possível verificar que tanto o desvio acumulado acima do valor alvo, C^+ , quanto o desvio acumulado abaixo do valor alvo, C^- , encontram-se entre os limites de especificação que são 10,23 e -10,23 para o limite superior e inferior, respectivamente. Deste modo, pode-se afirmar que o processo está controlado.

Posteriormente, será feita uma análise acerca da capacidade do processo. Neste contexto, vale ressaltar que para os fins do trabalho, considerou-se que o processo está estável, sob controle estatístico, partindo da análise do gráfico CUSUM recalculado, representado pelo Gráfico 6. Com isso, tem-se a análise da capacidade descrita a seguir.

4.3.2 Capacidade do processo

Para Ramos et al. (2013), a análise da capacidade avalia a dispersão natural dentro dos limites de especificação. Sendo possível, por meio destes resultados, afirmar se as medições serão capazes de atender as especificações da cliente.

Com esta finalidade, serão calculados os indicadores, C_p , C_{pk} e C_{pm} , mas antes é necessário definir os limites de especificações, tanto o inferior quanto o superior e para a variável de resistência dos aterramentos, os valores precisam ser menores que 15, ou seja, $LSE = 15 \Omega$ conforme especificações da cliente. Já para o limite inferior não há especificações, logo será adotado o LIC do gráfico X recalculado, ou seja, $LIE = 0,852 \Omega$.

Logo, para o cálculo do C_p será utilizado a equação 10:

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6\sigma}$$

Sendo necessário a utilização da relação $\sigma = \frac{R}{d_2}$ conforme Ramos et al. (2013), para o cálculo do desvio padrão, o qual se dá entre a razão da média das amplitudes e d_2 , ou seja, $d_2 = 1,128$ para amostras de tamanho 2 e a média das amplitudes é 3,247. Em seguida, substituindo os valores na Eq. 10, tem-se:

$$C_p = \frac{15 - 0,852}{6\left(\frac{3,247}{1,128}\right)}$$

$$C_p = 0,819$$

Já para o cálculo do C_{pk} utiliza-se a Eq. 11:

$$C_{pk} = \min\left(\frac{LSE - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LIE}{3\sigma}\right)$$

Onde, μ é a média dos valores coletados, ou seja, 9,49. Substituindo os valores na equação, tem-se:

$$C_{pk} = \min\left(\frac{15 - 9,49}{3\left(\frac{3,247}{1,128}\right)}, \frac{9,49 - 0,852}{3\left(\frac{3,247}{1,128}\right)}\right)$$

$$C_{pk} = \min\left(\frac{15 - 9,49}{3(2,87)}, \frac{9,49 - 0,852}{3(2,87)}\right)$$

$$C_{pk} = \min(0,63, 1)$$

Logo, C_{pk} será o menor valor, então:

$$C_{pk} = 0,63$$

Vale ressaltar que poderia ser utilizado uma abordagem de capacidade unilateral, já que há apenas um dos limites especificados, o LIE. O que se assemelha a 1ª parte da Eq. 11.

Segundo Montgomery (2017), considerando que o processo é existente, o valor mínimo recomendado para o C_{pk} deveria ser de 1,25. Assim, observando que $C_{pk} = 0,63$ o parâmetro não é alcançado. Indicando que os parâmetros não estão atendendo as especificações do processo.

Por fim, tem-se o C_{pm} que pode ser calculado utilizando a Eq. 12:

$$C_{pm} = \frac{LSE - LIE}{6\sqrt{\sigma^2 + (\mu - T)^2}}$$

Onde T é o valor nominal da especificação, ou seja:

$$T = \frac{LSE + LIE}{2} = \frac{15 + 0,852}{2} = 7,92$$

Substituindo os valores na equação, tem-se:

$$C_{pm} = \frac{15 - 1,98}{6\sqrt{\left(\frac{3,247}{1,128}\right)^2 + (9,49 - 7,92)^2}}$$

$$C_{pm} = \frac{14,14}{6\sqrt{(2,87)^2 + (1,57)^2}}$$

$$C_{pm} = 0,71$$

A partir destes cálculos, obtive os valores de $C_p = 0,819$, $C_{pk} = 0,63$ e $C_{pm} = 0,71$. Com base nestes é possível fazer algumas considerações acerca da capacidade do processo em atender as especificações.

Como o C_{pk} é menor que o C_p , indica que o processo não está centralizado e para $C_{pk} \neq C_p$, a análise deve ser feita considerando o valor do C_{pk} . Neste caso, $C_{pk} < 1$, indica que o processo não é capaz de atender as especificações do cliente, que são valores menores do que o limite superior de especificação, 15Ω .

Com isso, é necessário fazer melhorias no sistema de aterramento das torres em que o valor da resistência está muito elevado, afim de aumentar a capacidade do processo em atender as exigências da cliente. Além de uma verificação acerca do sistema de medição, uma vez que todas as coletas foram feitas pelo mesmo operador, inclusive algumas em período de inverno, nos meses de dezembro a fevereiro de 2022, o que pode ter resultado em medições inadequadas que não representam o valor real da resistência de algumas torres.

5 CONCLUSÃO

De acordo com os dados apresentados, apesar de não favoráveis em alguns pontos, constata-se que o objetivo geral da pesquisa, em analisar a capacidade do processo de medição de resistência em uma LT por meio do CEP, foi alcançado e que a resistências das 51 torres listadas na Tabela 3 afetaram a estabilidade do processo.

Ainda é possível perceber, através da aplicação do Controle Estatístico do Processo, especificamente os gráficos de controle para medidas individuais, que o processo de medição de resistência dos aterramentos nas 72 torres da LT não está controlado. Mesmo após remover as tendências listadas na Tabela 3, analisando a capacidade do processo, os índices C_p , C_{pk} e C_{pm} não estão bons. Tanto o C_p como o C_{pk} são < 1 , mostrando que o processo não está centrado e apresenta uma grande variabilidade. O mesmo é evidente no C_{pm} e isso indica que o processo precisa de ajustes. Diante disso, considerando os valores coletados das medições, a resistência dos sistemas de aterramento em uma obra de LT no Nordeste não atende as especificações da cliente.

Com relação aos objetivos específicos, o primeiro objetivo foi alcançado, que se refere ao cálculo dos limites de controle e construção dos gráficos de controle. Foi construído os gráficos de controle MR, X barra e CUSUM, representados respectivamente pelos Gráficos 1, 2 e 5. No gráfico de Controle MR os valores foram $LC = 2,73$, $LSC = 8,91$ e $LIC = 0$, onde foi possível observar algumas tendências. As amostras de 21 a 25 apresentaram uma sequência crescente de valores. Já no Gráfico de controle X barra os limites foram $LC = 9,24 \Omega$, $LSC = 16,49 \Omega$ e $LIC = 1,98 \Omega$. Nele todos os pontos estavam entre os limites de controle, entretanto apresentou grande concentração de pontos acima da linha central. Do ponto 7 até o 28 p todos os valores acima de $9,24 \Omega$. Diante disso e com base nas regras sensibilizantes da Tabela 1, constatou-se que processo não estava controlado. A partir disso, foi construído o gráfico CUSUM para analisar de forma estatística as pequenas variações e sequência de pontos. Considerando $H = 5$ e $K = 0,5$ obteve-se $LSE = 15,22 \Omega$ e $LIE = -15,22 \Omega$. O que mostrou de forma numérica, considerando os desvios acumulados C^+ e C^- o que foi constatado por meio das regras sensibilizantes. A partir da amostra nº 10 o desvio acumulado acima do valor alvo ultrapassa o LSE e permanece acima até a amostra nº 59, ou seja, 50 pontos com desvio acumulado fora do limite superior. O que é preocupante, pois mostra que o processo não está centrado entre os limites de especificação.

Quanto ao segundo objetivo – diagnóstico das possíveis causas especiais detectadas pelos gráficos de controle, foi alcançado. Tendo em vista que nenhum dos gráficos de controle para medidas individuais, representados pelos Gráficos 1 e 2, apresentou pontos fora dos limites de controle. Mesmo não havendo causas especiais, com base nas regras de sensibilidade, Tabela 1, e no Gráfico CUSUM representado pelo Gráfico 5, o processo estava fora de controle. Deste modo, removeu-se as tendências, que estavam mantendo o processo fora de controle, considerando as regras da Tabela 1. Estes pontos foram representados na Tabela 3, bem como o critério adotado para remoção. A partir das 21 amostras que sobraram, os limites de controle foram recalculados e os gráficos de controle MR, X barra e CUSUM também. Os quais foram representados, respectivamente, pelos Gráficos 3, 4 e 6. Todos os três gráficos apresentaram valores distribuídos aleatoriamente entre os limites de especificação, sem tendências. Já referente ao Gráfico 6, o qual refere-se ao CUSUM recalculado, foi possível perceber uma redução significativa tanto na soma acumulada dos desvios acima do valor alvo, C+, quanto nos valores abaixo, C-. Todos os 21 pontos representados entre os limites de especificação, resultando em um processo controlado.

Já referente ao terceiro objetivo, o cálculo do C_p , C_{pk} e C_{pm} , foi alcançado. Obteve-se um $C_p = 0,819$, $C_{pk} = 0,63$ e $C_{pm} = 0,71$. Diante disso, considerando que o processo é existente, C_{pk} deveria ser 1,25, pelo menos. Como $CPK \neq CP$, o processo não está centralizado. Uma vez que todos os três indicadores são < 1 , o processo não atende as especificações da cliente.

Assim, este trabalho tem como proposta responder a problemática: A resistência dos sistemas de aterramentos em uma obra de LT no Nordeste é capaz de atender as especificações? Portanto, pode-se constatar que a resistência dos sistemas de aterramentos não é capaz de atender as especificações, que são valores $< 15 \Omega$, uma vez que todos os indicadores da capacidades foram menores que 1. Além de apresentar grande variabilidade no processo e elevadas resistências em algumas torres, o que deixou o processo fora de controle.

Quanto ao quarto objetivo – proposição de melhorias para os problemas encontrados, foi alcançado. Neste sentido recomenda-se uma correção no sistema de aterramento das estruturas, além da verificação do sistema de medição, uma vez que as medições foram feitas pelo mesmo operador. Deste modo, haverá uma redução na variabilidade do processo e consequentemente uma garantia de qualidade ainda maior, com isso as exigências da cliente certamente serão atendidas. Como uma possível redução desses valores, pode ser acrescentado mais algumas fases de aterramento nas torres 78, 80, 81, 82, 82A, 88, 90, 91, 94 e 72, pois são as amostras que apresentam os valores mais elevados de resistência nos aterramentos. Partindo do pressuposto que as fases de aterramento instaladas não estão sendo suficiente para que haja

uma redução efetiva nas resistências. Estas melhorias não comprometeriam um orçamento tão elevado, tendo em vista que não será removido o contrapeso já instalado, apenas um acréscimo do aterramento. Neste sentido, é de fundamental importância um estudo mais aprofundado do sistema de aterramento e sua reorganização através de um profissional especializado.

Vale salientar que é necessária uma visão mais ampla da obra como um todo para qualquer tomada de decisão referente a mudança de projeto, pois para o estudo em questão levou-se em consideração apenas as informações fornecidas sobre as resistências dos aterramentos. Não foram fornecidos dados sobre o tipo de solo, como sondagem, por exemplo, além de informações sobre a quantidade de fases de aterramento instaladas em cada estrutura que poderiam ter sido utilizadas para uma melhor análise. Estas podem ser consideradas como algumas das limitações encontradas na realização da pesquisa.

Por fim, como proposta para trabalhos futuros, sugere-se aplicar o CEP para analisar outros processos importantes na construção de uma linha de transmissão, como sondagem, nivelamento de cabo e giro e prumo. A análise financeira também é altamente viável, considerando que são projetos com grande capital investido. Além de uma pesquisa referente aos impactos ambientais, ou até mesmo referente aos resíduos sólidos oriundos da construção da LT.

REFERÊNCIAS

- ALVES, Custódio da Cunha. **Gráficos de Controle CUSUM: um enfoque dinâmico para a análise estatística de processos**. Florianópolis:UFSC,2003. 134p.Dissertação Mestrado - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis,2003.
- ANEEL. **Relatório de Análise de Desligamentos Forçados do Sistema de Transmissão - Edição 2018**.Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília - Brasil: [s.n.]. Disponível em: <7a991934-f7b4-5835-07e1-4349bd513f96 (aneel.gov.br)>. Acesso em 01 dezembro 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15749: Medição de resistência de aterramentos e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento**. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5422: Projetos de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica**. Rio de Janeiro, 1985.
- BRASIL, Ministério de Minas e Energia. **Fontes de energia renováveis representam 83% da matriz elétrica brasileira**. [Brasília]: Ministério de Minas e Energia, 21 jan. 2020. Disponível em:<<https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2020/01/fontes-de-energia-renovaveis-representam-83-da-matriz-eletrica-brasileira>>. Acesso em: 01 dezembro 2022.
- CAETANO, C. E. F. et al. **A conductor arrangement that overcomes the effective length issue in transmission line grounding: Full-scale measurements**. 34th International Conference on Lightning Protection, ICLP 2018.
- CARDOSO, M.C. **Determinação em tempo real dos riscos de desligamentos em linhas de transmissão devido a descargas atmosféricas**. Rio de Janeiro, Brasil: PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO, 2 out. 2017.
- DINSMORE, Paul C.; NETO, Fernando H. da. S. **Gerência de Projetos: Como gerenciar seu projeto com qualidade, dentro do prazo e custo previsto**. 1. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2004.
- GERHARDT, Tatiana Engel; SILVEIRA, Denise Tolfo (organizadoras). **Métodos de Pesquisa**. 1ª Ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.
- GIL, Antônio. Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2022.
- IRENA - INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Global Renewables Outlook: Energy transformation 2050**. 2020. ed. Abu Dhabi: Irena, 2020. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2020/Apr/Global-Renewables-Outlook-2020>. Acesso em: 18 setembro 2022.
- JOLANDEK, Marco Aurélio. **Gestão de Projetos de Linhas de Transmissão de Energia Elétrica**. Curitiba: 2009. 44p. Especialização em Gestão Empresarial - Escola de Administração, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.
- LIMA, A.a.n. et al. **Aplicação do controle estatístico de processo na indústria farmacêutica**. Revista de Ciências Farmacêuticas Básica e Aplicada, Recife, v. 27, n. 3, p.177-187, 05 mar. 2006. Disponível em: <C:\TRABALHO\revistafarmácia\vol (usp.br)>. Acesso em: 01 dezembro 2022
- MONTGOMERY, d. c. **Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade**. 7. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.
- RAMOS, M. L. S; ALMEIDA, S. dos S.; ARAUJO, A. dos R. **Controle Estatístico da Qualidade**. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- SCHISSATTI, Márcio Luiz. **Uma Metodologia de Implantação de Carta de Shewharts Para o Controle de Processos**. Florianópolis:UFSC,1998. 104p.Dissertação Mestrado - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis,1998.
- TONINI, a. C.; OLIVEIRA, O. J. **Seis Sigma: uma estratégia para melhoria da qualidade e produtividade**. In: OLIVEIRA, O. J. (org.). **Gestão empresarial: sistemas e ferramentas**. São Paulo: Atlas, 2007.

XXXV Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Fortaleza, CE, p. 1- 16, 2015. ROSA, Leandro Cantorski da. Introdução ao controle estatístico de processos.: Fundação de Apoio a Tecnologia e Ciência - Editora UFSM, 2016. 152 p.

WARMI, Y.; MICHISHITA, K. **Investigation of lightning tripouts on 150-kV transmission lines in West Sumatra in Indonesia.** IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering John Wiley and Sons Inc.

WERKEMA, Maria C. C. **Ferramentas Estatísticas Básicas Para o Gerenciamento de Processos.** Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia, v. 2, 1995.