



Serviço Público Federal
Ministério da Educação
Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia- FAENG
Engenharia Elétrica - Bacharelado



Desenvolvimento de uma ferramenta em VBA para projetos de malhas de aterramento de subestações

Michele Dilma de Aquino da Silva

Campo Grande, MS

09 de março de 2022



Serviço Público Federal
Ministério da Educação
Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia- FAENG
Engenharia Elétrica - Bacharelado



Desenvolvimento de uma ferramenta em VBA para projetos de malhas de aterramento de subestações

Michele Dilma de Aquino da Silva

Orientador: Dr. Ruben Barros Godoy

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Mato Grosso do Sul na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Eletricista.

Campo Grande, MS

09 de março de 2022

Desenvolvimento de uma ferramenta em VBA para projetos de malhas de aterramento de subestações

Monografia apresentada à Universidade Federal de Mato Grosso do Sul na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia, para obtenção da Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ruben Barros Godoy

Orientador

Prof^ª. Dr^ª. Luciana Cambraia Leite

Professor do curso de Engenharia Elétrica

Prof. Dr. Tiago Henrique de Abreu Mateus

Professor do curso de Engenharia Elétrica

Campo Grande, MS

09 de março de 2022

DECLARAÇÃO DE AUTORIA E RESPONSABILIDADE

Michele Dilma de Aquino da Silva, residente e domiciliado na cidade de Campo Grande, Estado do Mato Grosso do Sul, portador do RG de nº 2.177.759 e CPF nº 068.801.511-59, declaro que o “Trabalho de Conclusão de Curso” apresentado, com o título “Desenvolvimento de uma ferramenta em VBA para projetos de malhas de aterramento de subestações” é de minha autoria e assumo a total responsabilidade pelo seu conteúdo e pela originalidade do texto. Declaro que identifiquei e referenciei todas as fontes e informações gerais que foram utilizadas para construção do presente texto. Declaro também que este artigo não foi publicado, em parte, na íntegra ou conteúdo similar em outros meios de comunicação, tendo sido enviado com exclusividade para a Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS).

Campo Grande, 09 de março de 2022.

Michele Dilma de A. da Silva

Michele Dilma de Aquino da Silva

Dedico este trabalho a Deus, meu auxílio e guia. Dedico a minha mãe, meu maior exemplo. As minhas irmãs que são minhas conselheiras. Dedico também ao meu amor, Fernando de Freitas, sem você ao meu lado eu não conseguiria.

AGRADECIMENTOS

Sou grata a minha mãe Zilma de Aquino Borges, por ser minha base. Todas as minhas conquistas são méritos seus. Sou grata pela minha família que é minha sustentação, o meu maior suporte. Agradeço ao Fernando de Freitas por estar sempre ao meu lado, meu maior apoiador. Aos meus professores por tanta dedicação, me ajudando a alcançar meus objetivos. Em especial, agradeço ao meu professor e orientador Dr. Ruben Barros Godoy, sempre solícito e paciente a me ensinar. Agradeço aos meus amigos e companheiros de curso, tive o prazer em estudar com pessoas excelentes. E não posso deixar de agradecer meus amigos Rafael de Sousa, Lailson de Moura, Filipe Monteiro e tantos outros que estiveram presentes comigo nas madrugadas em claro.

RESUMO

Tendo em vista que o projeto de malhas de aterramento para subestações é uma exigência normativa aos consumidores primários, os principais procedimentos contidos nos projetos de malhas de terra foram amplamente investigados a fim de se desenvolver um sistema especialista, capaz de auxiliar nesse propósito. Para tanto, foi necessário atender aos requisitos normativos, aplicar um modelo abrangente e promover a redução do tempo e complexidade dos projetos. Por meio de revisão bibliográfica delimitaram-se os casos a serem estudados. Diante disso, aplicou-se um modelo de solução utilizado em solos estratificados em duas camadas e que pudesse atender apropriadamente às normas. Os resultados apresentados pelo sistema especialista foram condizentes quando comparados a outros projetos. Por ser intuitiva, acessível e de fácil utilização, a ferramenta proposta promoveu a redução do tempo de projeto e firmou a constatação do êxito do sistema especialista, pois os objetivos gerais e específicos da pesquisa foram atendidos.

Palavras-Chave: Resistividade; Resistência; Aterramento; Malhas.

ABSTRACT

Considering that the design of grounding meshes for substations is a regulatory requirement for primary consumers, the main procedures contained in projects were extensively investigated in order to develop an expert system, capable of assisting in this purpose. Therefore, it was necessary to meet the regulatory requirements, apply a comprehensive model and promote the reduction of time and complexity of projects. Through a literature review, the cases to be studied were delimited. In view of this, a solution model used in soils stratified in two layers was applied and that could properly meet the standards. The results presented by the program were consistent when compared to other projects. As it is intuitive, accessible and easy to use, the proposed tool reduced the design time and confirmed the success of the expert system, as the general and specific objectives of the research were met.

Keywords: Resistivity; Resistance; Grounding; Meshes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Efeito da umidade na resistividade do solo.....	18
Figura 2 - Resistividade em função da temperatura.....	20
Figura 3 - Solos estratificados em várias camadas.....	21
Figura 4 - Solo estratificado em duas camadas.....	22
Figura 5 - Montagem de Wenner.....	23
Figura 6 - Linha de corrente elétrica.....	24
Figura 7 - Ponto imagem.....	25
Figura 8 - Imagem do ponto 1 e 4.....	26
Figura 9 - Solo de duas camadas “a”.....	28
Figura 10 - Solo de duas camadas “b”.....	28
Figura 11 - Esquema TN-S.....	31
Figura 12 - Situação de falta TN-S.....	32
Figura 13 - Esquema TN-C-S.....	32
Figura 14 - Esquema TN-C.....	33
Figura 15 - Esquema TT.....	34
Figura 16 - Esquema A do arranjo IT.....	35
Figura 17 - Esquema B do arranjo IT.....	35
Figura 18 - Zona de interferência entre duas hastes.....	38
Figura 19 - Malha de terra.....	39
Figura 20 - Malha de terra com hastes.....	42
Figura 21 - Indivíduo sujeito à tensão de toque.....	43
Figura 22 - Diagrama elétrico equivalente.....	43
Figura 23 - Indivíduo sujeito à tensão de passo.....	44
Figura 24 - Diagrama elétrico equivalente a tensão de passo.....	45
Figura 25 - Fluxograma de projeto.....	46

Figura 26 - Geometria da malha de terra.....	49
Figura 27 - Curva de resistividade do solo.....	50
Figura 28 - Potenciais externos à malha de terra.....	59
Figura 29 - Visão geral do sistema especialista.....	64
Figura 30 - Interface de programação em VBA.....	65
Figura 31 - Módulo de programação em VBA.....	66
Figura 32 - Interface de criação de formulários.....	67
Figura 33 - Rotina de programação utilizando if.....	68
Figura 34 - Rotina de programação utilizando while.....	69
Figura 35 - Tabela dinâmica.....	71
Figura 36 - Segmentação de dados pela tabela dinâmica.....	71
Figura 37 - Interface do sistema especialista.....	75
Figura 38 - Formulário de dados cadastrais.....	76
Figura 39 - Formulário de proposta inicial de malha de terra.....	76
Figura 40 - Formulário de resistividades.....	77
Figura 41 - Formulário de dados do local e parâmetros.....	77
Figura 42 - Segmentação de dados.....	78
Figura 43 - Resultados do sistema especialista.....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resistividade para diferentes tipos de solos.....	16
Tabela 2 - Influência da concentração de sais na resistividade do solo arenoso.....	19
Tabela 3 - Valores dos parâmetros dos condutores mais utilizados em malhas de aterramentos.....	40
Tabela 4 - Constantes Kf.....	41
Tabela 5 - Fator de multiplicação.....	51
Tabela 6 - Determinação da resistividade aparente do solo de duas camadas.....	52
Tabela 7 - Seção mínima do condutor (mm^2 / A).....	53
Tabela 8 - Características dimensionais dos cabos.....	54
Tabela 9 - Coeficiente A.....	60
Tabela 10 - Coeficiente B.....	61
Tabela 11 – Dados das instalações da Indústria Kelvin.....	73
Tabela 12 - Dados de resistividade medida do solo.....	74
Tabela 13 - Resultados do sistema especialista.....	78
Tabela 14 - Resultados da malha de terra.....	79

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	14
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
1.1. Resistividade do solo.....	16
1.2. Influências físicas e químicas na resistividade do solo.....	17
1.2.1. Umidade do solo.....	17
1.2.2. Composição química.....	18
1.2.3. Temperatura.....	19
1.3. Camadas do solo e métodos de estratificação.....	20
1.4. Medição de resistividade – Método Frank Wenner.....	22
1.5. Resistividade aparente.....	27
1.6. Sistema de aterramento e suas classificações (TT, TN e IT).....	29
1.6.1. Esquema TN-C, TN-S e TN-C-S.....	30
1.6.2. Esquema TT.....	33
1.6.3. Esquema IT.....	34
1.7. Geometrias de sistemas de aterramento.....	36
1.7.1. Aterramento de uma única haste.....	37
1.7.2. Aterramento com mais hastes.....	37
1.7.3. Malhas de aterramento.....	39
1.7.4. Malhas de aterramento com hastes.....	41
METODOLOGIA.....	46
2.1. Visão geral do sistema.....	46
2.2. Procedimento 1.....	47
2.2.1. Resistividade do local de instalação.....	47
2.2.2. Resistividade da superfície do solo “s”.....	47
2.2.3. Estudo das correntes de curto-circuito.....	47
2.2.4. Proposta inicial de malha de aterramento.....	48
2.3. Procedimento 2.....	49
2.4. Procedimento 3.....	50
2.4.1. Resistividade aparente do solo.....	50
2.4.2. Seção mínima do condutor.....	53
2.4.3. Número de condutores principais e de junção.....	53
2.4.4. Comprimento de eletrodos horizontais da malha de terra.....	54
2.4.5. Coeficientes de ajuste “Km”, “Ks” e “Ki”.....	54
2.4.6. Comprimento mínimo do condutor da malha.....	56
2.5. Procedimento 4.....	56
2.5.1. Tensão de passo e de toque.....	56
2.5.2. Corrente máxima de choque.....	57

2.5.3. Corrente de choque devido à tensão de passo (sem camada de brita).....	57
2.5.4. Corrente de choque devido à tensão de passo (com camada de brita).....	57
2.5.5. Corrente de choque devido à tensão de toque (sem camada de brita).....	57
2.5.6. Corrente de choque devido à tensão de toque (com camada de brita).....	58
2.5.7. Corrente de acionamento do sistema de proteção.....	58
2.5.8. Potenciais da região externa à malha.....	58
2.5.9. Resistência de uma malha com eletrodos horizontais e verticais.....	60
2.5.10. Resistência mútua.....	61
2.5.11. Resistência da malha de aterramento.....	62
2.6. Procedimento 5.....	62
2.7. Procedimento 6.....	62
ARQUITETURA E FERRAMENTAS DE PROGRAMAÇÃO.....	63
3.1. VBA - Visual Basic for Applications	64
3.1.1. Buttons.....	66
3.1.2. UserForm.....	66
3.1.3. MsgBox.....	67
3.1.4. Estruturas condicionais “IF” e “Else”.....	67
3.1.5. Estruturas de loop.....	68
3.2. Banco de dados.....	70
3.2.1. Formatação como tabela.....	70
3.2.2. Tabela dinâmica.....	70
3.2.3. Dashboard.....	72
RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	73
4.1. Interface do sistema especialista.....	74
4.1.1. Entrada de dados.....	74
4.1.2. Disposição das informações.....	77
4.2. Resultados.....	78
4.3. Discussões.....	79
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83

INTRODUÇÃO

No presente trabalho, abordaremos o projeto de malhas de aterramento voltado para subestações de energia elétrica. É exigido das unidades consumidoras atendidas em média tensão, o projeto de subestação responsável por agrupar equipamentos de proteção, medição, manobras e transformação de grandezas elétricas [1]. O fornecimento de energia elétrica aos consumidores primários depende da aprovação desse projeto junto à concessionária [2].

A realização do projeto demanda recursos e costuma ser trabalhoso. Portanto, percebe-se a necessidade da automatização dos processos. Nesse contexto, o desenvolvimento de um sistema especialista que auxilie nos projetos, principalmente de malhas de aterramento de subestações, que se relaciona diretamente com a proteção de pessoas e equipamentos, apresenta-se como uma abordagem relevante [3].

Logo, o objetivo geral da pesquisa é, aplicar um modelo de automatização de projeto de malhas de terra, por meio de um sistema especialista. Os objetivos específicos do sistema especialista são: desenvolver um modelo que seja aplicado aos casos mais recorrentes e que atenda às exigências impostas pelas normas para sistemas de aterramento, com o intuito de reduzir e facilitar os processos contidos nos projetos de malhas.

Parte-se da hipótese de que é possível aplicar um modelo de resolução de projeto que possa ser executado por um sistema especialista a fim de projetar malhas de terra e que seja aplicável a um abrangente número de casos.

No primeiro capítulo, os modelos de solos foram estudados, os fatores que exercem influência direta, os procedimentos de obtenção de dados e as principais exigências normativas. Neste, delimita-se a partir da revisão bibliográfica os objetos de estudo.

No Capítulo 2, apresenta-se o método de resolução de projeto mais abrangente que será empregado no sistema especialista. Os procedimentos de cálculos são descritos para se alcançar os valores de resistividade do solo e de resistência de aterramento. Estudam-se os valores corrente de choque, tensão de passo, tensão de toque e resistência de aterramento que validem os projetos.

Subsequentemente, no Capítulo 3, apresenta-se a arquitetura de programação empregada e as ferramentas utilizadas. Aplicando na ferramenta todos os procedimentos de cálculos desenvolvidos no segundo capítulo, chega-se a uma versão inicial de um sistema especialista no projeto de malhas de aterramento.

No Capítulo 4, os resultados obtidos pelo sistema especialista são aplicados a uma malha hipotética estratificada em duas camadas verticais. Realiza-se um comparativo entre um projeto realizado por uma referência bibliográfica e o sistema especialista desenvolvido.

Por fim, no Capítulo 5, discute-se brevemente a respeito das atividades desenvolvidas, dos objetivos alcançados, as dificuldades enfrentadas durante o desenvolvimento da ferramenta e as sugestões dos trabalhos futuros relacionados ao tema abordado neste trabalho.

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1. Resistividade do solo

A resistividade do solo (ρ) tem relação direta com a resistência exercida pelo solo ao fluxo da corrente elétrica. Há diferentes tipos de solos e a resistividade de cada um será suscetível às suas características físico-químicas. Sendo essa, inerente à natureza do solo, se pode obter valores distintos, mesmo em solos aparentemente iguais.

Essas variações são consequência de alguns fatores como: teor de umidade, profundidade, concentração dos sais retidos e até mesmo da compactação do solo. Logo, quantificar a resistividade de um solo se torna difícil, visto que, características diferentes resultam em valores de resistividade distintos [4].

Para se obter a resistividade de um solo, é necessário levantar dados por meio de um instrumento de medição denominado Megger ou Megômetro. Com os dados levantados com esse equipamento, aplica-se o método proposto por Frank Wenner, que será abordado mais amplamente na seção 1.4.

A Tabela 1 fornece a resistividade aproximada de vários tipos de solo, sendo útil em situações em que o processo de medição é inviável. Conforme Tabela 1, fica evidente que, além da composição química do solo, a umidade é um fator extremamente relevante para a resistividade de um solo.

Tabela 1 - Resistividade para diferentes tipos de solo.

Natureza dos solos	Resistividade ($\Omega \cdot m$)	
	Mínima	Máxima
Solos alagadiços ou pantanosos	-	30
Lodo	20	100
Húmus	10	150
Argilas plásticas	-	50
Argilas compactas	100	200
Terra de jardim com 50% de umidade	-	140

Natureza dos solos	Resistividade ($\Omega \cdot m$)	
	Mínima	Máxima
Terra de jardim com 20% de umidade	-	480
Argila seca	1.500	5.000
Argila com 40% de umidade	-	80
Argila com 20% de umidade	-	330
Areia com 90% de umidade	-	1.300
Areia comum	3.000	8.000
Solo pedregoso nu	1.500	3.000
Solo pedregoso coberto com relva	300	500
Calcários moles	100	400
Calcários compactos	100	5.000
Calcários fissurados	500	1.000
Xisto	50	300
Micaxisto	-	800
Granito e arenito	500	10.000

Fonte: [3].

1.2. Influências físicas e químicas na resistividade do solo

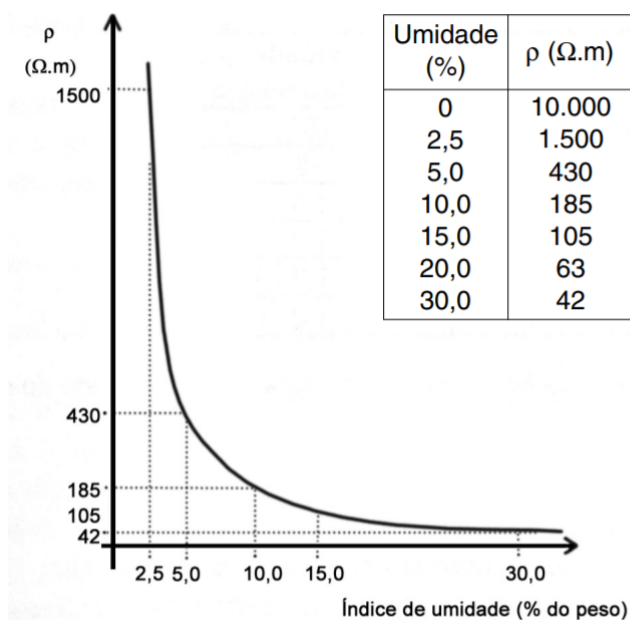
1.2.1. Umidade do solo

O decréscimo da resistividade está relacionado à presença de sais e umidade. Em solos salinos, há maior concentração de íons e a água promove o livre deslocamento desses íons positivos e negativos. O aumento da porcentagem da umidade no solo dissolve os sais nele presentes, tornando o meio eletrolítico melhor e assim promovendo a passagem da corrente elétrica [4].

Em tese, no estado natural do solo, não é comum encontrar uma taxa de umidade superior a 40%. Essa porcentagem varia conforme as condições climáticas, presença de lençóis freáticos e a natureza do solo. A tendência é a redução da resistividade com a profundidade, pois há maior percentual de água retida [5].

A curva que descreve o comportamento da resistividade do solo em função do índice de umidade pode ser observada na Figura 1.

Figura 1 - Efeito da umidade na resistividade do solo.



Fonte: [5].

Resumindo, a taxa de umidade é um fator relevante e varia em função de condições físicas. A temperatura tem influência direta nesse índice. Em condição ambiente, ocorre a lenta evaporação da água, mantendo o solo com certo grau de umidade. Entretanto, em temperaturas muito baixas ocorre a cristalização da água, que possui alta resistência elétrica. Por outro lado, em temperaturas muito altas, ocorre a rápida evaporação da água, tornando o solo seco e com elevada resistividade.

1.2.2. Composição química

Normalmente, ácidos e sais solúveis estão presentes no solo. Esses compostos colaboram com a redução da resistividade. Solos arenosos são uma exceção, pois apresentam baixa quantidade de sais minerais e, conseqüentemente, resistividade elevada. Mesmo com o acréscimo de água, a redução do seu valor é mínima [5]. No entanto, uma forma de promover a redução da resistividade em solos seria através do tratamento químico. Esse processo de

redução pode ser verificado na Tabela 2, onde a umidade é mantida fixa em 15% e o solo em estudo, de característica arenosa, é tratado por meio da adição de sais.

Tabela 2 - Influência da concentração de sais na resistividade do solo arenoso.

Sal adicionado (% em peso)	Resistividade ($\Omega \cdot m$) - Solo arenoso
0	107
0,1	18
1,0	1,6
5,0	1,9
10,0	1,3
20,0	1,0

Fonte: [4].

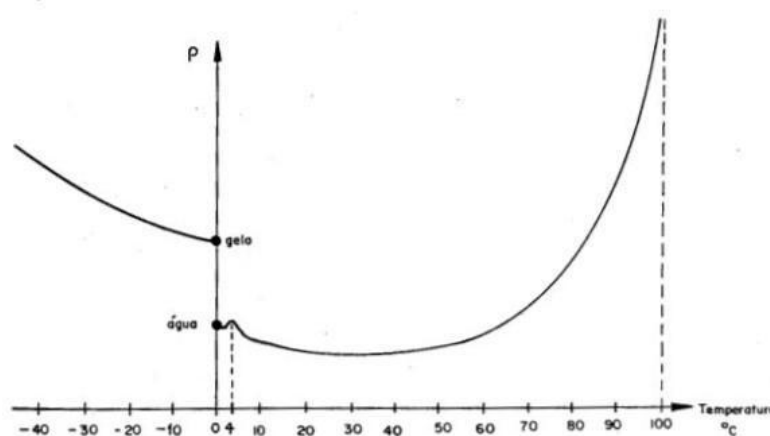
Outro ponto importante a se destacar é em relação aos ácidos presentes no solo. Os ácidos em solução aquosa sofrem ionização, ou seja, originam íons livres, o que facilita a condução da corrente elétrica. Logo, quanto maior o número de moléculas ionizadas no solo, melhor será a condutibilidade elétrica [6].

Muito embora os ácidos e sais agregados ao solo possam contribuir com a redução da resistividade, é importante ressaltar que em sua estrutura sólida não são condutores de corrente elétrica, ou seja, a água se torna imprescindível no processo.

1.2.3. Temperatura

A incidência direta dos raios solares no solo contribui para o aumento da temperatura e, conseqüentemente, para o aumento da resistividade, ou seja, diminui a capacidade do solo de reter umidade. Em contrapartida, o decréscimo da temperatura, próximo ao ponto de fusão da água, também eleva a resistividade, consequência da sua peculiar concentração molecular [5]. Esses fenômenos podem ser observados na Figura 2.

Figura 2 - Resistividade em função da temperatura.



Fonte: [4].

Para se considerar os efeitos da temperatura, dois fatores devem ser levados em consideração: evaporação e homogeneidade [5]. A evaporação é consequência da elevação da temperatura. Mediante isso, a resistividade aumenta, pois, como destacado nos parágrafos anteriores, a condução elétrica é indissociável à presença de água.

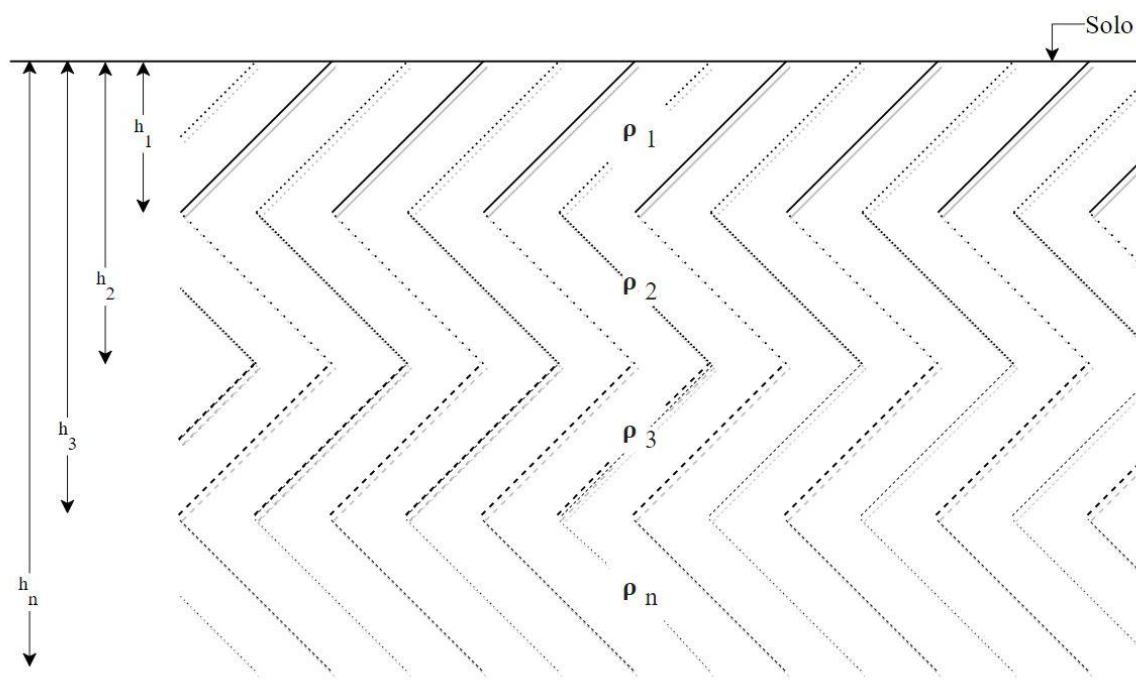
Contudo, nos solos heterogêneos, não há verossimilhança, visto que, apresentam diferentes características e variadas camadas, consequência dos diferentes sedimentos depositados no solo. Solos assim, possuem diferentes tipos e tamanhos de grãos, resultando em comportamentos distintos em função da temperatura. Em pontos onde se apresenta maior concentração desses, resulta-se na melhor retenção da umidade e em menor evaporação [5].

1.3. Camadas do solo e métodos de estratificação

O solo pode apresentar inúmeras camadas e, regularmente, são horizontais, paralelas à superfície e de formações geológicas variadas [4]. A matéria depositada na superfície terrestre é oriunda de erosões, já nas camadas mais profundas, a matéria orgânica é proveniente de lagos e mares internos [5].

As formações geológicas estão diretamente relacionadas à dificuldade de se classificar os solos. Conforme apresentado na Figura 3, em geral, o solo é heterogêneo, razão das diferentes camadas formadas ao longo do tempo.

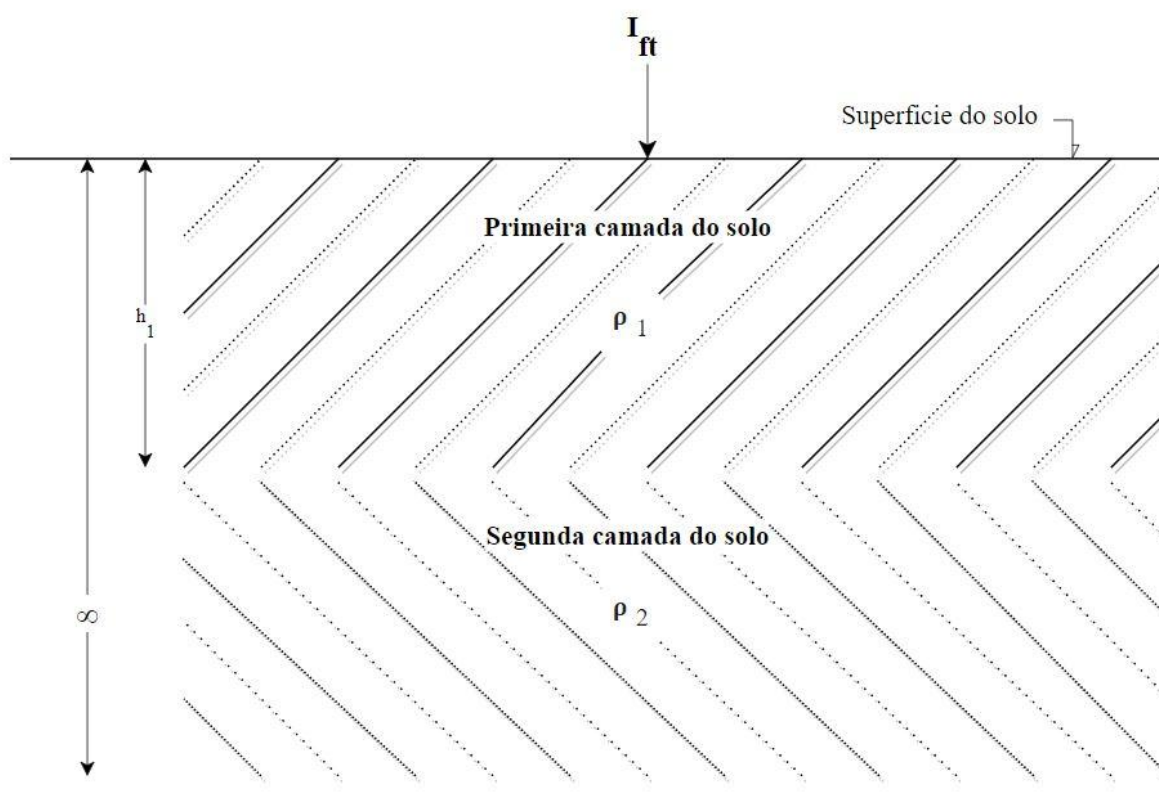
Figura 3 - Solos estratificados em várias camadas.



Fonte: [3] adaptado pela autora.

Apesar dos solos serem heterogêneos, uma possibilidade para facilitar o dimensionamento de sistemas de aterramento é, quando possível, estratificar o solo em duas camadas, conforme se observa na Figura 4.

Figura 4 - Solo estratificado em duas camadas.



Fonte: [3] adaptado pela autora.

Entretanto, há casos em que as camadas estão inclinadas e até mesmo perpendiculares à superfície do solo. Uma vez que esses casos são atípicos, é mais comum adotar que o perfil das camadas seja aproximadamente horizontal [4].

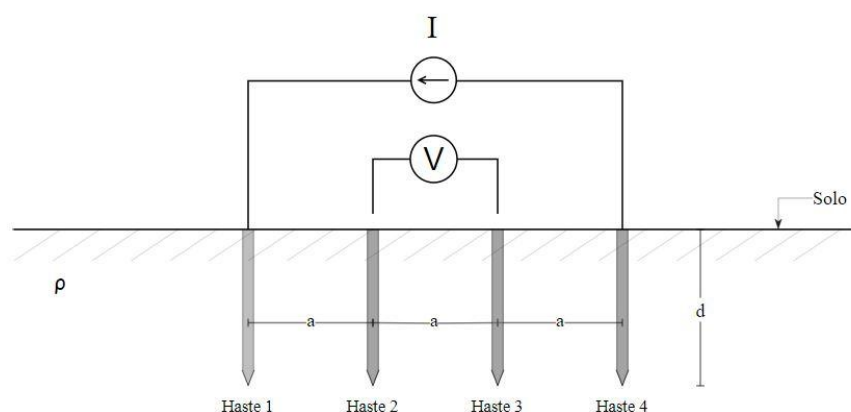
1.4. Medição de resistividade – Método Frank Wenner

Para se levantar a curva que melhor descreva a resistividade do solo, alguns métodos são aplicados e esses são denominados Métodos Geofísicos [6]. Dentre eles, o mais adotado é o proposto por Frank Wenner, onde se aplica uma corrente elétrica no solo no intuito de medir a resistência exercida ao seu fluxo [3].

Esse método, conforme ilustrado na Figura 5, utiliza-se de quatro eletrodos fixados ao solo a uma profundidade "d", espaçados por uma distância "a" e dispostos linearmente. No

primeiro terminal (eletrodo) é injetada uma corrente elétrica (I), que é coletada pelo último eletrodo. Por consequência da resistência do solo, é gerada uma diferença de potencial (V) nos terminais 2 e 3 [3].

Figura 5 - Montagem de Wenner.



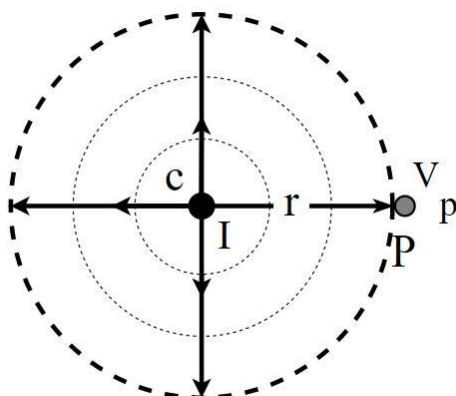
Fonte: [8] adaptado pela autora.

Segundo (1), a relação entre tensão e corrente resulta na resistência exercida pelo meio à passagem da corrente. Quanto mais próximo estiverem os eletrodos, os valores de resistência calculados serão referentes às camadas superficiais. A medida que os eletrodos forem fixados com espaçamentos " a " maiores, conforme Figura 5, o valor da resistência será referente a camadas mais profundas.

$$R = \frac{V}{I} \quad (1)$$

Para compreender o processo implícito ao método, é necessário se conhecer o comportamento da corrente elétrica injetada no solo. Quando isso ocorre em um ponto “ c ”, sendo o solo homogêneo e infinito, a dispersão apresenta um perfil radial, conforme Figura 6.

Figura 6 - Linha de corrente elétrica.



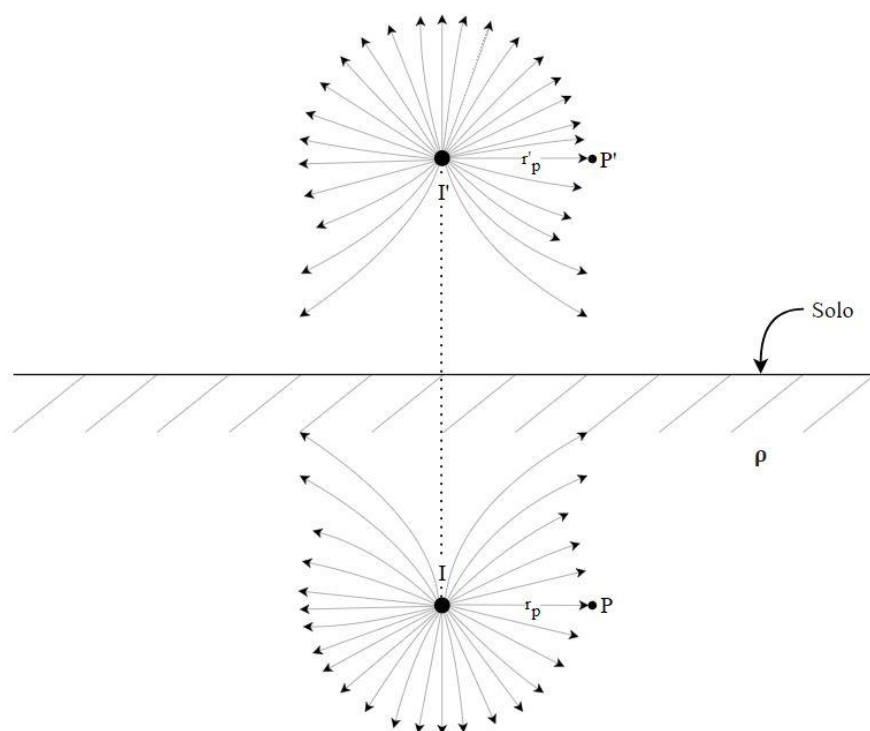
Fonte: [4] adaptado pela autora.

O potencial resultante em um ponto "P", distante da origem é dado por (2), onde " ρ " é a resistividade do solo, " I " a corrente que passa por ele e " r " é a distância entre o ponto "P" e o centro "c".

$$V_p = \frac{\rho I}{4\pi r} \quad (2)$$

Situação similar ocorre quando a corrente emana em um ponto abaixo da superfície do solo e a dispersão ocorre de forma parecida. Entretanto, considerando o método das imagens, a carga elétrica sob o solo tem seu reflexo acima do solo [3]. Esse comportamento pode ser visualizado na Figura 7.

Figura 7 - Ponto imagem.

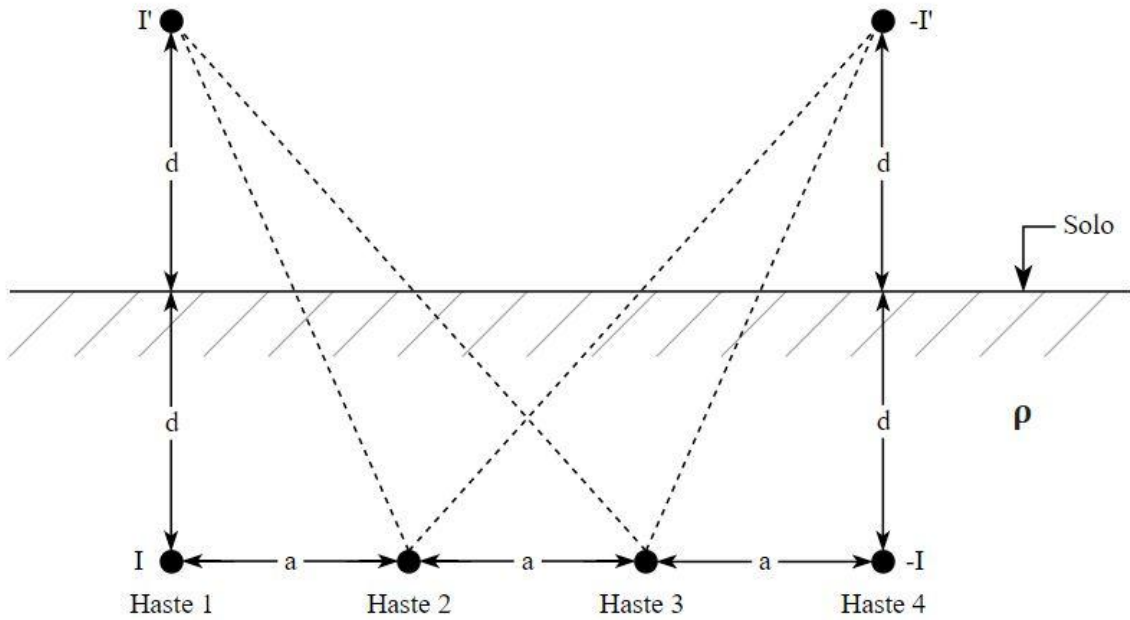


Fonte: [4] adaptado pela autora.

Aplicando o método da superposição, o potencial resultante no ponto "P" é a soma das contribuições de cada fonte, ou seja, da carga injetada e da sua imagem. Dessa forma, a partir de (2) obtém-se o potencial em "P" conforme (3).

$$V_P = \frac{\rho I}{4\pi r_{1P}} + \frac{\rho I'}{4\pi r'_{1P}} \quad (3)$$

O mesmo procedimento realizado para o eletrodo de injeção da corrente deve ser aplicado para o eletrodo de retorno. Sendo assim, considerando que no eletrodo de retorno a carga elétrica é negativa, expande-se (3) acrescentando-se as contribuições de outras duas fontes de potencial.

Figura 8 - Imagem do ponto 1 e 4.

Fonte: [4] adaptado pela autora.

Para se obter a diferença de potencial entre os eletrodos "2" e "3", torna-se necessária a obtenção dos valores de tensão para esses pontos. O potencial resultante na haste "2" está expresso em (4) e na haste 3 em (5).

$$V_2 = \frac{\rho I}{4\pi} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}} \right) \quad (4)$$

$$V_3 = \frac{\rho I}{4\pi} \left(\frac{1}{2a} + \frac{1}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}} - \frac{1}{a} - \frac{1}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} \right) \quad (5)$$

Por fim, a diferença de potencial nas hastes internas "2" e "3" é expresso por (6). Substituindo (6) em (1), obtém-se a equação para a resistência elétrica do solo. Finalmente, a resistividade do solo será dada por (8).

$$V_{23} = V_2 - V_3 = \frac{\rho I}{4\pi} \left(\frac{1}{a} + \frac{2}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}} \right) \quad (6)$$

$$R = \frac{V_{23}}{I} = \frac{\rho}{4\pi} \left(\frac{1}{a} + \frac{2}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}} \right) \quad (7)$$

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2a}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}}} \quad (8)$$

Para a Fórmula de Palmer, apresentada em (8), recomenda-se que o comprimento da haste seja menor ou igual a 10% do espaçamento [4], conforme se observa em (9).

$$d_h \leq 0,1a \quad (9)$$

Respeitando (9), a Fórmula de Palmer se reduz à (10) quando o espaçamento for grande, acima de 20 vezes o comprimento da haste, isto é, $a > 20d$.

$$\rho = 2\pi a R \quad (10)$$

1.5. Resistividade aparente

A resistividade aparente tem relação direta com o quanto da corrente elétrica aplicada a um determinado solo será absorvida ou emanada no sistema de aterramento. É concernente ao solo e ao tipo de aterramento, ou seja, é a resistividade vista pelo sistema de aterramento durante a interação com o solo em função da profundidade atingida pela dispersão da corrente [4].

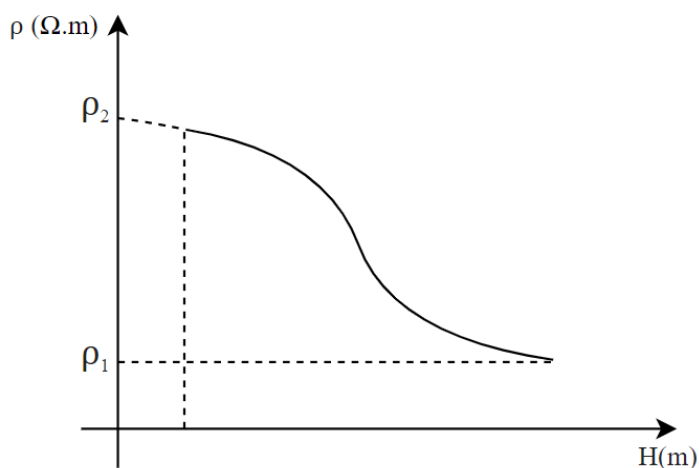
A definição dada por [3] é similar, entretanto, ressalta-se que há diferença no valor da resistividade vista por duas malhas de terra distintas para o mesmo solo homogêneo. Ressalta-se ainda, que há diferença ao se adotar a mesma malha de aterramento em solos distintos, mesmo que apresentem resistividades médias similares.

Já para [8], a resistividade denomina-se como aparente por consequência da definição do método aplicado, pois considera o solo como sendo uniforme, o que não ocorre na prática. Diante disso, para o caso do solo idealmente uniforme, o valor obtido em (8) é o aparente para o espaçamento "a" entre os terminais.

Para se determinar a resistividade aparente, é necessário encontrar a curva que descreve o comportamento do solo, obtida através das medições. Contudo, vale ressaltar que

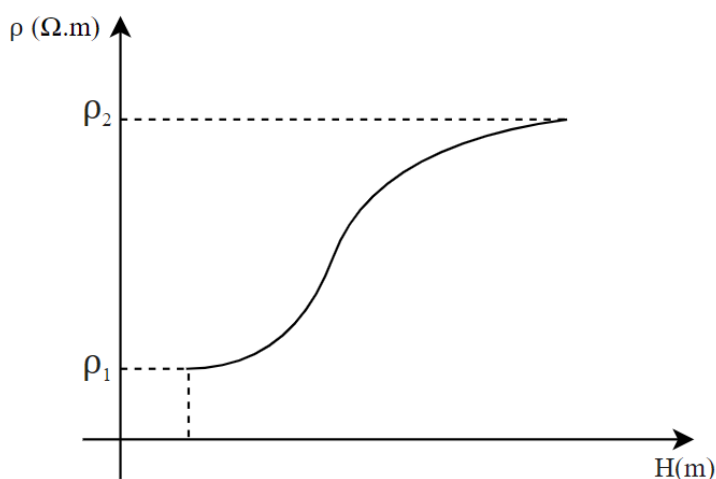
para os casos onde faz-se necessário realizar terraplanagem só se deve fazer a medição da resistividade, após decorrido um tempo para estabilização química do solo [3]. A curva que representa os solos estratificados em duas camadas é apresentada nas Figuras 9 e 10.

Figura 9 - Solo de duas camadas “a”.



Fonte: [3] adaptado pela autora.

Figura 10 - Solo de duas camadas “b”.



Fonte: [3] adaptado pela autora.

O fator que define se a curva será do tipo “a” ou “b” é o coeficiente de reflexão (K) (11). Onde ρ_1 é a resistividade da primeira camada e ρ_2 da segunda camada. Esse coeficiente é limitado a -1 e +1: sendo ele negativo, a curva é similar à Figura 9, caso contrário, à Figura 10.

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (11)$$

1.6. Sistema de aterramento e suas classificações (TT, TN e IT)

O sistema de aterramento tem como objetivo garantir a segurança dos equipamentos, operadores e a atuação do sistema de proteção [3]. Sendo assim, constitui-se como um sistema de aterramento o ato de conectar os equipamentos e suas carcaças a um condutor de proteção e enterrá-lo sob o solo.

Deve-se atuar em situações de contato acidental de um condutor energizado com uma massa metálica. Se a carcaça do equipamento estiver aterrada, ocorrerá um curto-circuito. Em consequência, ocasionará a atuação do sistema de proteção, responsável por interromper o condutor energizado [3].

O aterramento possui algumas classificações que estão relacionadas diretamente às medidas de proteção contra choques elétricos e às configurações de sobretensões [9]. Os esquemas de aterramento comumente utilizados em instalações elétricas são: TN, TT e IT [2]. Nessa nomenclatura, a primeira letra refere-se a situação da alimentação em relação à terra [9], sendo:

- T - um ponto de alimentação diretamente aterrado (normalmente é o condutor neutro);
- I - isolamento de todas as partes vivas em relação à terra ou aterramento de um ponto através de impedância;

A segunda letra indica a situação das massas em relação à terra [9]:

- T - massas diretamente aterradas, independentemente do aterramento eventual de um ponto da alimentação;
- N - massas ligadas ao ponto da alimentação aterrado (em corrente alternada, o ponto aterrado é normalmente o ponto neutro);

Outras nomenclaturas eventuais indicam a disposição do condutor neutro e de proteção [9]:

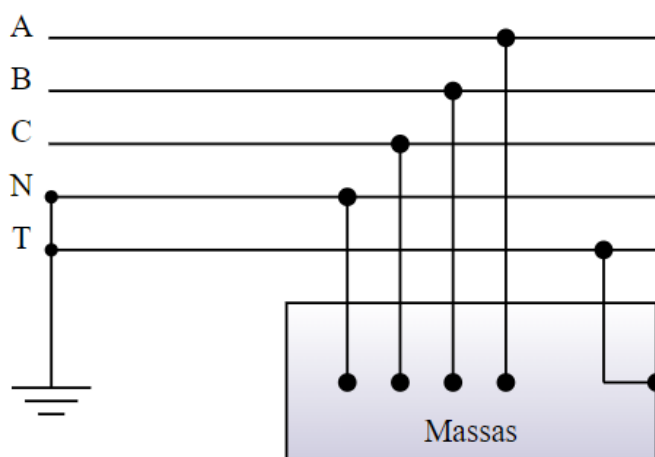
- S - funções de neutro e de proteção asseguradas por condutores distintos;
- C - funções de neutro e de proteção combinadas em um único condutor (condutor PEN).

1.6.1. Esquema TN-C, TN-S e TN-C-S

Os arranjos do tipo “TN” possuem um ponto de aterramento na geração ou na entrega de energia elétrica. As massas estão conectadas a esse ponto, através do condutor de proteção (PE), ou, por meio, de um condutor de proteção de função combinada com o neutro (PEN). Em situações de falta, quando há contato do condutor energizado com uma massa metálica (fase-massa), há baixa impedância [2].

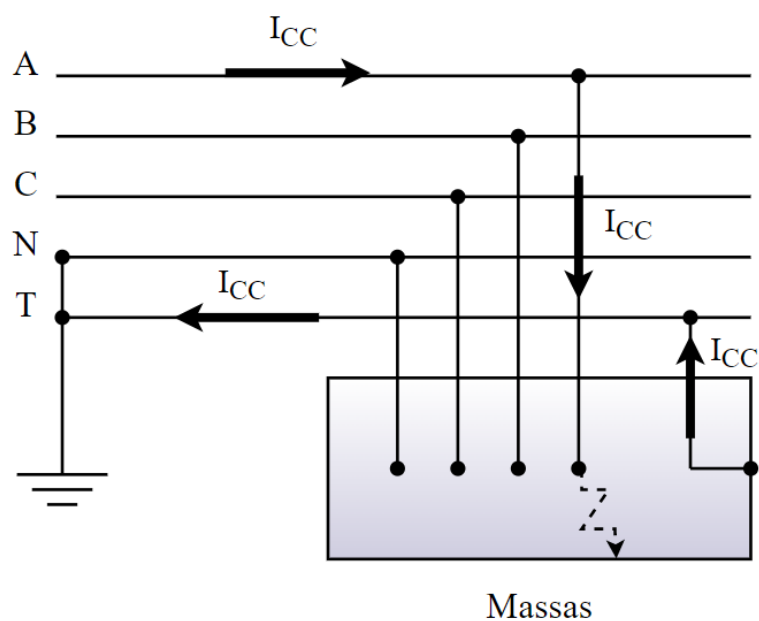
A corrente de falta é limitada exclusivamente pelos elementos condutores. Logo, a corrente de falta apresenta-se como corrente de curto-circuito. Sendo assim, torna-se obrigatório o estudo de corrente de curto-circuito mínima, a fim de garantir a detecção do defeito pelos dispositivos de proteção [9].

Esse esquema apresenta algumas subdivisões. A primeira, denomina-se TN-S, quando o condutor neutro e o condutor de proteção são distintos. A segunda, TN-C-S, combina-se em parte do percurso as funções de neutro e de proteção à um único condutor. E TN-C, combina-se as funções dos condutores na totalidade do percurso. Na sequência, será comentado a respeito do arranjo TN-S, conforme Figura 11.

Figura 11 - Esquema TN-S.

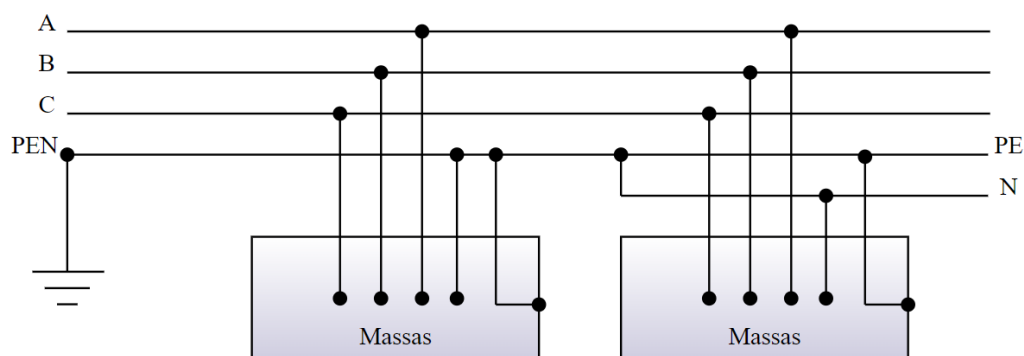
Fonte: autora.

O esquema TN-S é conhecido como sistema a cinco condutores. Nele, o condutor de proteção é ligado à malha de aterramento na origem do sistema, ou seja, ao ponto de neutro localizado no secundário do transformador da subestação [3]. As correntes de falta são limitadas exclusivamente pelos elementos condutores, sendo, um percurso de baixa impedância [9]. Essa situação pode ser visualizada na Figura 12.

Figura 12 - Situação de falta TN-S.

Fonte: autora.

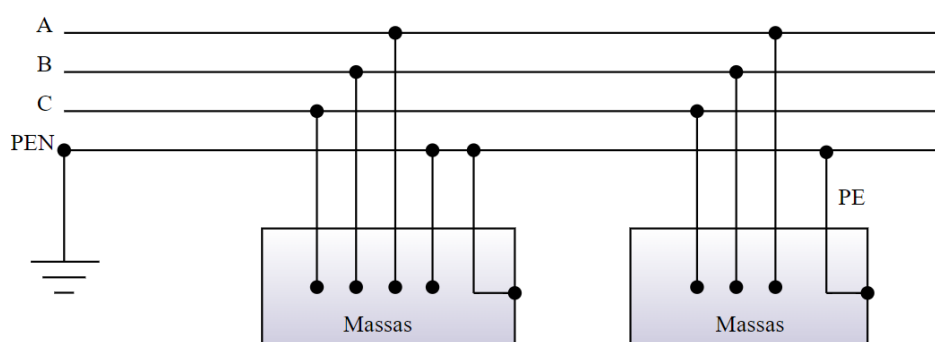
O arranjo TN-C-S permite a utilização de quatro ou cinco condutores, pois, como a função de neutro e terra são combinadas no condutor PEN, pode-se usá-lo com condutor neutro ou de proteção. Conforme Figura 13, é possível verificar a utilização do condutor de função combinada e também separada a partir da sua derivação.

Figura 13 - Esquema TN-C-S.

Fonte: autora.

A Figura 14 representa o esquema TN-C, conhecido também como sistema a quatro condutores. Esse arranjo é comum em pequenas instalações, pois, se reduz um condutor e consequentemente os custos. Um problema grave desse arranjo é que toda a corrente de falta é conduzida pelo condutor neutro, provocando fortes flutuações na referência de tensão para as fases. Outro agravante consiste no possível dano ou rompimento do condutor PEN por conta das elevadas corrente de curto-circuito. Se isso vier a acontecer, não haverá caminho de retorno para as correntes que fluem pelo neutro levando ao desequilíbrio das tensões nas cargas.

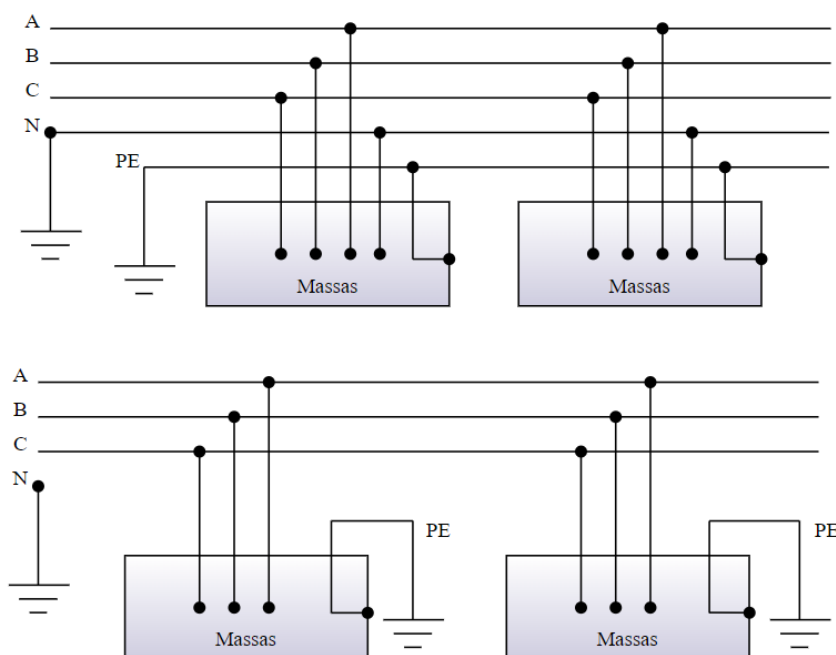
Figura 14 - Esquema TN-C.



Fonte: autora.

1.6.2. Esquema TT

No esquema "TT" o condutor de alimentação e as massas são aterradas. Entretanto, são sistemas distintos e independentes. Em virtude disso, situações de faltas diretas (fase-massa) apresentam impedância elevada. Portanto, a corrente de falta é pequena em comparação à corrente de curto-circuito fase neutro. Este tipo de sistema é vantajoso quando há longas distâncias entre cargas e a entrada de energia e torna indispensável a utilização de dispositivos sensíveis às correntes diferenciais [9].

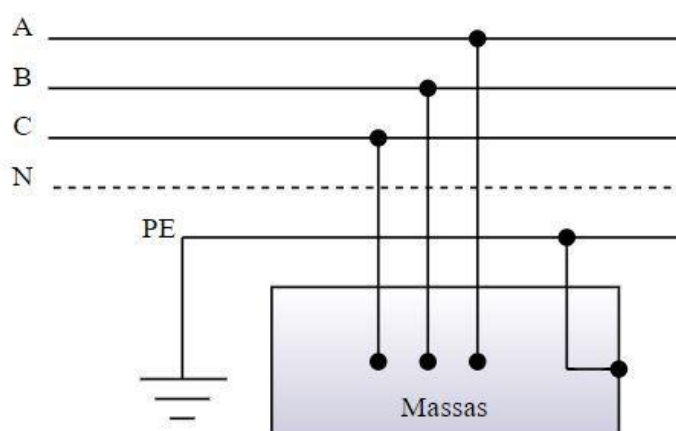
Figura 15 - Esquema TT.

Fonte: autora.

1.6.3. Esquema IT

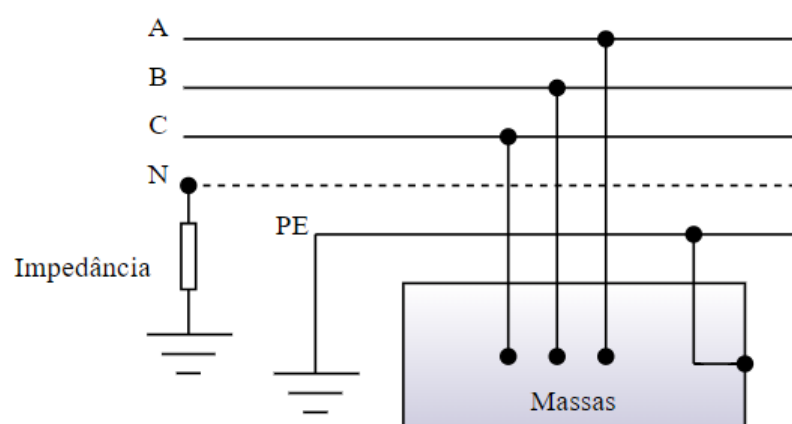
Nesse sistema, a alimentação não está diretamente aterrada. O neutro pode ser distribuído, ou não, e a alimentação pode não estar aterrada ou ser aterrada por uma impedância de valor elevado. As massas podem ser aterradas individualmente, em conjunto e podem estar conectadas ao aterramento da alimentação, ou não [9]. Essas configurações estão dispostas nas figuras 16 e 17.

Figura 16 - Esquema A do arranjo IT.



Fonte: autora.

Figura 17 - Esquema B do arranjo IT.



Fonte: autora.

Esse sistema é comum em locais onde a continuidade da energia elétrica é prioridade, como em hospitais. Nesse arranjo as correntes de falta fase-massa ou fase-terra tem baixa intensidade. Posto isso, torna-se indispensável o uso de um dispositivo de supervisão de isolamento (DSI) [9].

1.7. Geometrias de sistemas de aterramento

Um parâmetro importante no aterramento é o eletrodo vertical utilizado, pois precisa ser um bom condutor de eletricidade e apresentar boa preservação à ação de sais e ácidos. Os mais utilizados são: Copperweld, que é uma barra de aço circular com cobre fundido sobre. Cadweld, onde o cobre é depositado de forma eletrolítica sobre a alma de aço. E encamisado por extrusão onde o aço é revestido por um tubo de cobre [4].

A disposição sob o solo pode contar com uma única haste, ou com várias hastes alinhadas, hastes em triângulo, quadrado, círculo e também por cabos condutores nus formando uma malha. O sistema mais eficiente e indicado para subestações são as malhas de terra com hastes, motivo pelo qual será tratado com mais abrangência neste trabalho.

A concessionária local estabelece os parâmetros de fornecimento de energia elétrica a consumidores de baixa tensão e média tensão. Consumidores de baixa tensão, monofásicos e bifásicos, devem apresentar aterramento no ramal de entrada, contando no mínimo uma haste interligada ao neutro da entrada de serviço e consumidores trifásicos com três hastes. O valor da resistência de terra não pode ultrapassar 20Ω em qualquer época do ano [10].

Para consumidores primários (de média tensão), com carga instalada superior a 75 kW, a concessionária exige o projeto de uma subestação de energia. Subestações aéreas, de até 300 kVA devem conter aterramento com no mínimo três hastes interligadas. Para subestações abrigadas de até 150 kVA são necessárias seis hastes compondo uma malha de terra. Nove hastes são necessárias para subestações de até 500 kVA. Para potências superiores, necessita-se de um projeto de aterramento específico. Independente do tipo de aterramento, a resistência de terra deve ser inferior a 10Ω [11] em qualquer época do ano.

Vale lembrar que o valor da resistência de aterramento máxima prevista pelas normas é apenas uma referência, o que não dispensa a necessidade da equipotencialização das cargas da instalação [12]. Sendo assim, recomenda-se fortemente que a malha de aterramento de uma subestação esteja interligada aos barramentos de aterramento dos quadros por meio de condutores de cobre, formando um sistema de aterramento TN-S.

1.7.1. Aterramento de uma única haste

Uma haste cravada verticalmente no solo apresenta resistência elétrica conforme (12).

$$R_{el} = \frac{\rho_a}{2\pi L_h} \ln\left(\frac{4L_h}{D_h}\right) \quad (12)$$

Sendo, “ L_h ” o comprimento da haste em metros, “ D_h ” o diâmetro do eletrodo em metros e ρ_a a resistividade aparente medida em $\Omega.m$.

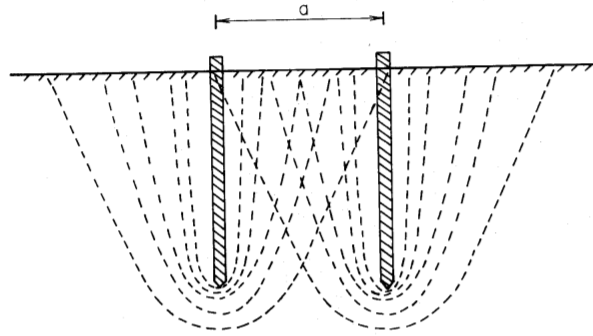
Em muitas situações, a resistência de apenas uma haste não atende às exigências. Como solução a isso, em razão de serem inversamente proporcionais à resistência resultante, pode-se aumentar o comprimento ou o diâmetro da haste. Outra solução é o tratamento do solo com sais, a fim de se reduzir a resistividade do solo. No entanto, em praticamente todas as situações, essas soluções são inviáveis conduzindo o projetista a arranjos de aterramento mais complexos.

1.7.2. Aterramento com mais hastes

Como solução à resistência elevada de uma única haste, eletrodos podem ser interligados, dispostos em diferentes tipos de arranjos. Como supracitado na seção 1.4, a corrente quando injetada no solo possui dispersão radial, e caso os eletrodos estejam próximos, haverá interferência na dispersão do conjunto [4].

Na Figura 18 é possível visualizar a zona de interferência produzida por duas hastes, resultado das superfícies equipotenciais, quando enterradas sob solo homogêneo a uma distância “a”.

Figura 18 - Zona de interferência entre duas hastes.



Fonte: [4].

Há uma Resistência Mútua “ R_M ” ou um acoplamento resistivo entre os eletrodos, resultado da elevação do potencial de uma haste em relação à terra por consequência da corrente que flui na outra haste [4]. O acréscimo da resistência do eletrodo “e” por influência do eletrodo “m” é dado por (13).

$$R_{em} = \frac{0,183 \times \rho_a}{L_h} \times \log \left(\frac{\sqrt{L_h^2 + D_{em}^2} - L_h^2 - D_{em}^2}{D_{em}^2 - (\sqrt{L_h^2 + D_{em}^2} - L_h^2)^2} \right) \quad (13)$$

Onde, “ D_{em} ” é a distância horizontal entre os eletrodos, dada em metros.

Logo, a resistência total do eletrodo “e” é expressa conforme (14).

$$R_e = R_{el} + \sum_{n=1}^n R_{em} \quad (14)$$

Onde, “ n ” é o número de hastes interligadas.

Como exemplo, para três hastes em um arranjo linear, cada uma terá sua resistividade própria, conforme (15), (16) e (17), respectivamente.

$$R_1 = R_{11} + R_{12} + R_{13} \quad (15)$$

$$R_2 = R_{21} + R_{22} + R_{23} \quad (16)$$

$$R_3 = R_{31} + R_{32} + R_{33} \quad (17)$$

Por simetria $R_{12} = R_{21}$, $R_{13} = R_{31}$ e $R_{23} = R_{32}$. Como se trata de eletrodos com os mesmos parâmetros construtivos, a resistência própria de cada haste é igual, ou seja,

$R_{11} = R_{22} = R_{33}$. Por fim, a resistência equivalente de três hastes dispostas linearmente em solo homogêneo pode ser obtida a partir do paralelismo de suas resistências totais (18).

$$R_{ne} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right)^{-1} \quad (18)$$

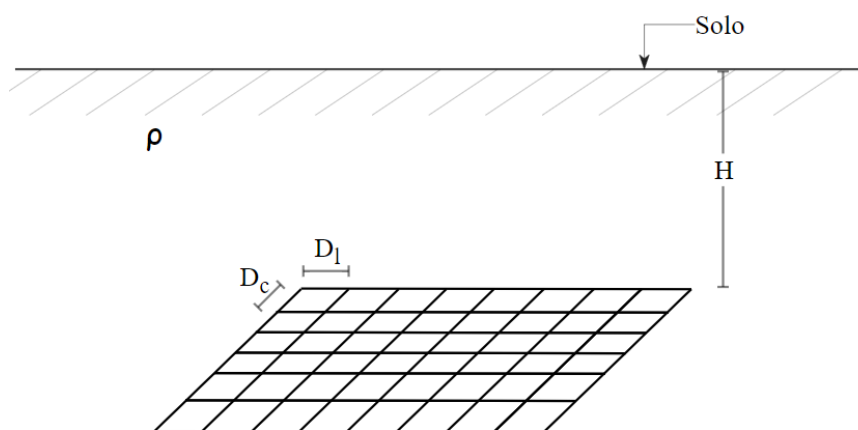
Para reduzir os processos de cálculo, existe o coeficiente de redução “K” (19), que corresponde a resistência equivalente do conjunto de hastes interligadas em relação à resistência de uma única haste. Os coeficientes de redução são dados já tabulados, referentes a vários arranjos.

$$K = \frac{R_{ne}}{R_{el}} \quad (19)$$

1.7.3. Malhas de aterramento

As malhas de aterramento são compostas por condutores de cobre nu enterrados. Pode-se dizer que são eletrodos horizontais. Estes, geralmente são dispostos sob o solo formando quadriculas de condutores, conforme se observa na Figura 19.

Figura 19 - Malha de terra.



Fonte: autora.

A principal vantagem de uma malha é o controle do potencial produzido na superfície durante uma falta, ou seja, mantém a tensão ao longo da malha em níveis muito próximos, de tal forma que, a diferença de potencial sobre diferentes pontos da malha seja suportável. O

condutor a ser enterrado sob o solo é um parâmetro de projeto importante, a julgar que, o mesmo deve suportar os esforços mecânicos e térmicos [4].

A norma regulamentadora NBR 15751 estabelece a equação de Onderdonk (20) para a seção mínima do condutor de aterramento considerando os esforços térmicos [1].

$$S_c = I_f \times \sqrt{\frac{t \times \alpha_r \times \rho_t \times 10^4}{TCAP \times \ln\left(\frac{k_0 - T_m}{k_0 - T_a}\right)}} \quad (20)$$

Onde:

S - é a seção do condutor em mm²;

I_f - é a corrente de falta fase-terra, expressa em quiloampères (kA);

t - é o tempo de atuação da proteção, expresso em segundos (s);

α_r - é o coeficiente térmico de resistividade do condutor a uma certa temperatura em °C (°C⁻¹);

ρ_t - é a resistividade do condutor de aterramento a uma certa temperatura em °C, expressa em ohm × centímetro ($\Omega \times \text{cm}$);

TCAP - é o fator de capacidade térmica, em joule por centímetro cúbico vezes graus Celsius [J/(cm³ × °C)];

T_m - é a temperatura máxima suportável, expressa em graus Celsius (°C), conforme Tabela 3;

T_a - é a temperatura ambiente, expressa em graus Celsius (°C); $k_0 = \frac{1}{\alpha_0}$ ou $\left(\frac{1}{\alpha_r}\right) - T_r$;

k_0 - é o coeficiente térmico de resistividade do condutor a 0 °C;

T_r - é a temperatura de referência das constantes do material, em graus Celsius (°C).

Tabela 3 - Valores dos parâmetros dos condutores mais utilizados em malhas de aterramentos.

Tipo do condutor	Condutância %	Coeficiente térmico de resistividade		Temperatura de fusão (a) (°C)	Resistividade ρ_r (20 °C)	TCAP [J/(cm ³ × 20 °C)]
		α_0 (0 °C)	α_r (20 °C)			
Cobre (macio)	100,0	0,004 27	0,003 93	1 083	1,724	3,422
Cobre (duro)	97,0	0,004 13	0,003 81	1 084	1,777	3,422
Aço cobreado 40%	40,0	0,004 08	0,003 78	1 084	4,397	3,846
Aço cobreado 30%	30,0	0,004 08	0,003 78	1 084	5,862	3,846

(a) Aço cobreado baseado em uma espessura de 254 µm de cobre.

Tipo do condutor	Condutância %	Coeficiente térmico		Temperatura	Resistividade	TCAP
		de resistividade		de fusão (a)		
		α_0 (0 °C)	α_r (20 °C)	(°C)		
					ρ_r (20 °C)	[J/(cm³ x 20 °C)]
(b) Aço inoxidável baseado em 508 μm nº 304 de espessura sobre o aço 1020						

Fonte: [1].

Entretanto, a expressão (20) pode ser simplificada, a partir de “ K_f ” que corresponde a constante para materiais levando em consideração a temperatura ambiente (T_a) de 40 °C. Os valores para “ K_f ” podem ser obtidos conforme Tabela 4.

$$S_c = I_f \times K_f \times \sqrt{t} \quad (21)$$

Tabela 4 - Constantes K_f .

Conexão	K_f
Mecânica (perfurada ou por pressão)	5,8
Emenda tipo solda oxiacetilênica	4,7
Emenda com solda exotérmica	3,8
Emenda a compressão (a)	3,8
(a) Obtida por meio de conectores com compressão por ferramenta hidráulica.	

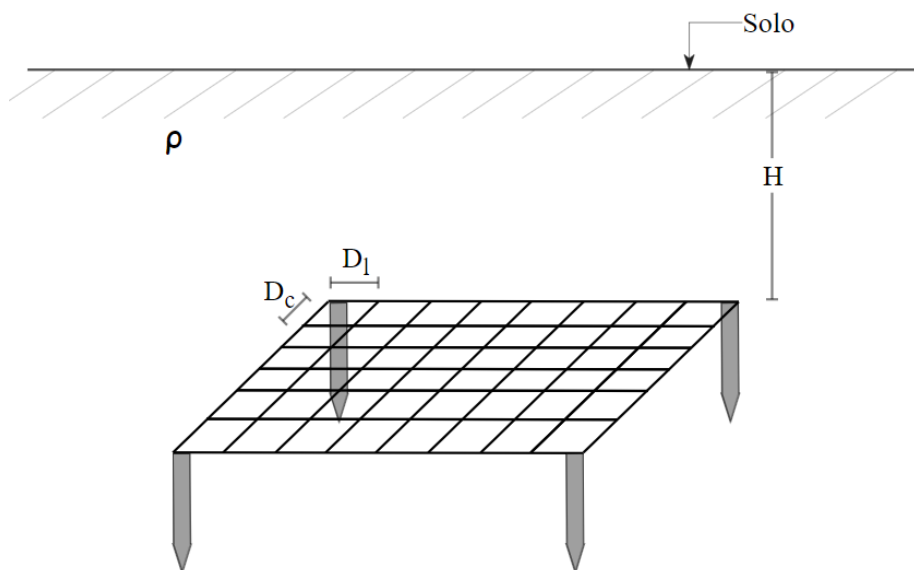
Fonte: [1].

Logo, a seção mínima do condutor deve ser superior a “ S_c ”. Entretanto, a NDU 002 estabelece 50 mm² como a seção mínima para o condutor da malha de aterramento [11].

1.7.4. Malhas de aterramento com hastes

Conforme mostrado na Figura 20, neste arranjo, além dos condutores horizontais de cobre nu, formando quadrículas, nos vértices e cruzamentos das quadrículas podem ser conectados eletrodos verticais de aterramento. As conexões, geralmente, são realizadas por meio de solda exotérmica. Assim como no arranjo anterior, esse sistema controla os níveis de tensão, entretanto, garante a dispersão da corrente elétrica nas camadas mais profundas do solo promovendo maior segurança.

Figura 20 - Malha de terra com hastes.



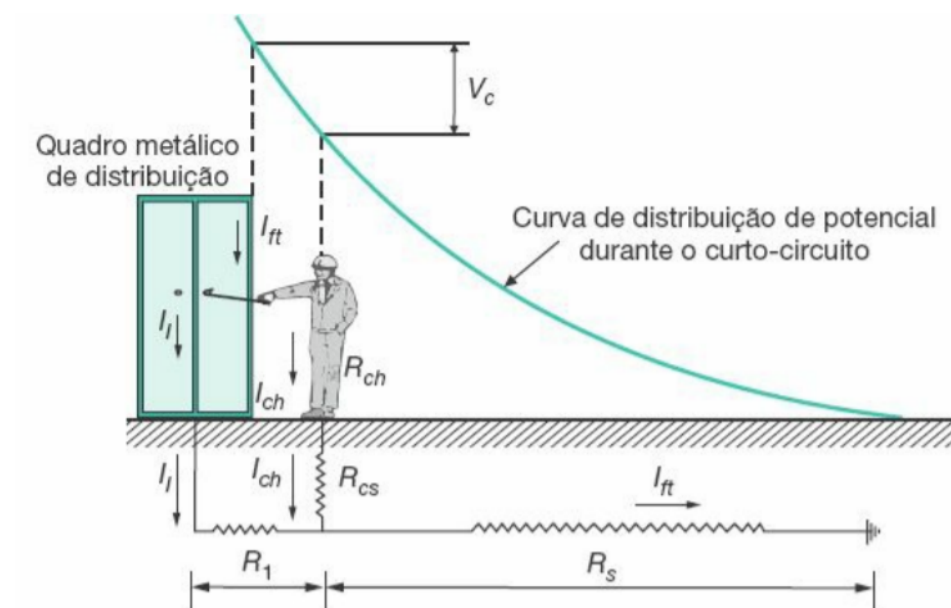
Fonte: autora.

Um estudo comparativo entre as geometrias de malha de terra realizado por [13] mostra que arranjos retangulares apresentam melhor desempenho, quando comparados a malhas em formato L ou quadrada dispostas na mesma área. Comparou-se também o espaçamento uniforme e desigual dos eletrodos e em ambos o arranjo retangular apresentou valores mínimos de resistência. Logo, quando se há dificuldade em encontrar valores de resistência de terra baixos sugere-se adotar a geometria retangular.

Outro ponto relevante é que a malha com hastes controla melhor os níveis de tensão de toque, sendo esse limitado pela tensão de contato máxima que o corpo humano suporta sem ocorrência de fibrilação ventricular [3]. Segundo (22) essa tensão depende da resistividade do material em que o solo está coberto “ ρ_s ” (normalmente pedra brita) e o tempo de ocorrência do defeito T_f ($T_f \leq 0,5$ s). A Figura 21 ilustra a situação de um indivíduo sujeito à tensão de toque.

$$E_{tm} = \frac{116 + 0,174 \times \rho_s}{\sqrt{T_f}} \quad (22)$$

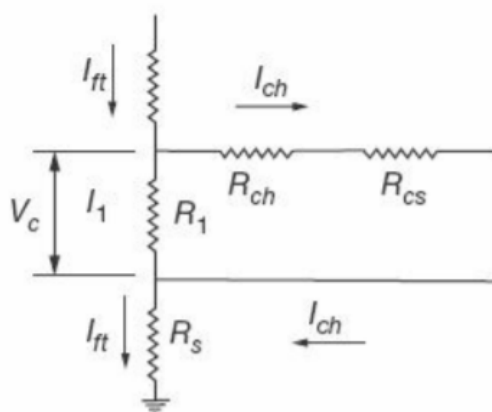
Figura 21 - Indivíduo sujeito à tensão de toque.



Fonte: [3].

O diagrama elétrico equivalente a uma pessoa sujeita a tensão de toque num momento de falta está representado na Figura 22.

Figura 22 - Diagrama elétrico equivalente.



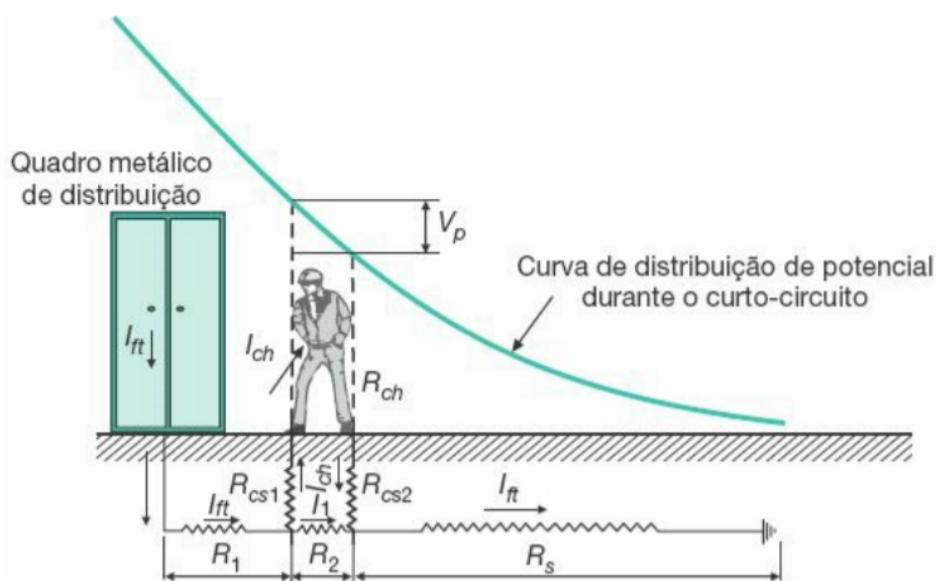
Fonte: [3].

Sendo, “ I_{ft} ” a corrente de curto-circuito fase e terra, “ I_{ch} ” a corrente de choque, “ R_{ch} ” a resistência do corpo humano, “ R_s ” a resistência do solo, “ R_{cs} ” a resistência de contato resultante de cada pé com o solo e “ V_c ” a tensão de contato.

Outro nível de tensão que a malha de aterramento deve controlar é a tensão de passo. Se uma pessoa estiver sobre a malha de aterramento durante a falta, com corrente fluindo pela malha, este fica sujeito à uma tensão entre os pés [2], situação essa representada na Figura 23. Essa tensão também se limita ao tempo de ocorrência do defeito e a resistividade do material que cobre o solo conforme (23).

$$E_{pa} = \frac{116+0,174 \times \rho_s}{\sqrt{T_f}} \quad (23)$$

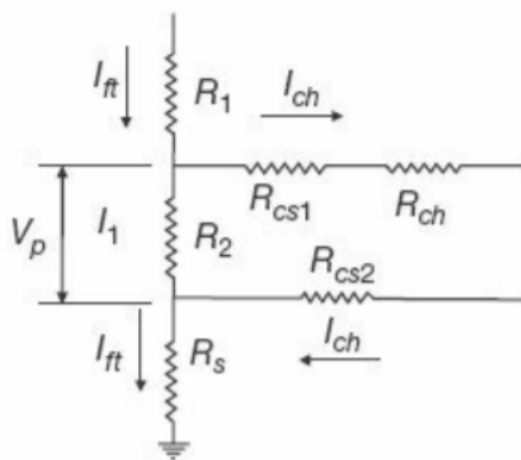
Figura 23 - Indivíduo sujeito à tensão de passo.



Fonte: [3].

O diagrama elétrico correspondente à corrente de choque resultante da tensão de passo está disposto na Figura 24.

Figura 24 - Diagrama elétrico equivalente a tensão de passo.



Fonte: [3].

Sendo, " R_{cs1} " a resistência de contato do pé direito " R_{cs2} " a resistência de contato do pé esquerdo.

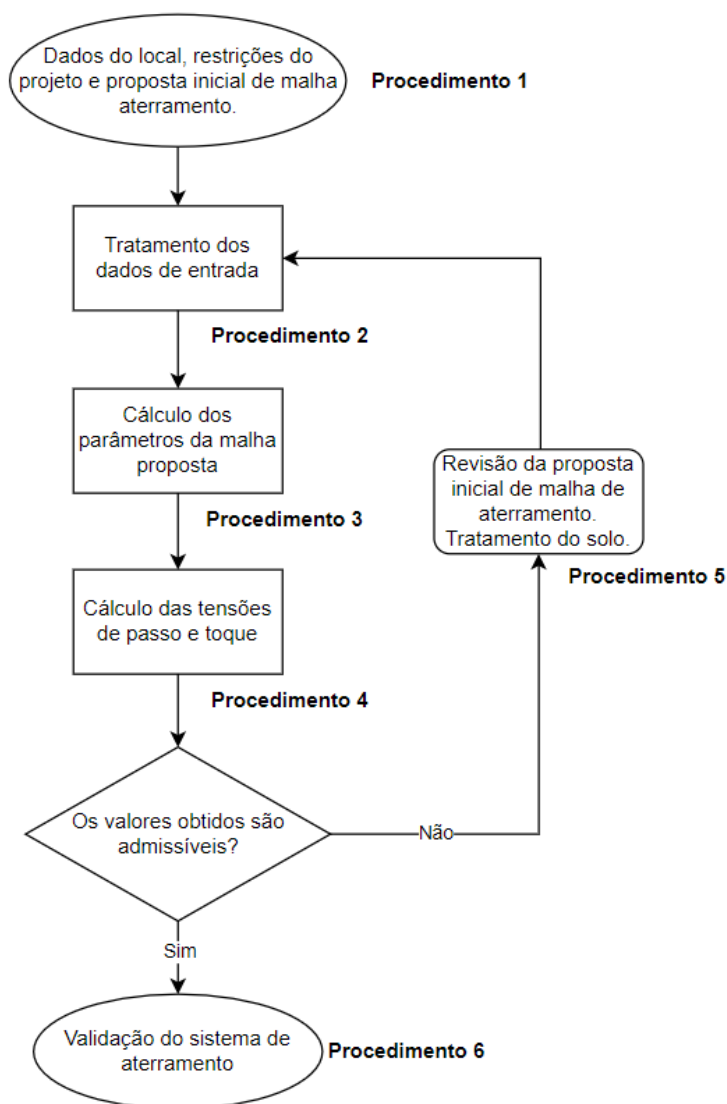
O capítulo subsequente apresenta mais especificamente os procedimentos metodológicos para o cálculo de uma malha de terra com eletrodos verticais e horizontais, visando atender solos estratificados em duas camadas horizontais e todas as exigências normativas para os projetos de malhas de aterramento de subestações.

2. METODOLOGIA

2.1. Visão geral do sistema

O procedimento de projeto de malhas de aterramento segue a sequência lógica indicada na Figura 25. A etapa inicial de um projeto de malha se dá a partir da coleta de dados do local de instalação. Essas informações são referentes ao solo, a área disponível para sua implementação e ao estudo das instalações elétricas. Posteriormente, essas informações são tratadas para que seja possível a utilização desses dados nos cálculos.

Figura 25 - Fluxograma de projeto.



Fonte: autora.

2.2. Procedimento 1

O passo inicial em um projeto se dá no momento da visita técnica ao local de instalação, situação em que o projetista extrai os dados pertinentes ao projeto. Os principais dados são a resistividade do solo, resistividade do material que será disposto na superfície do solo e a área disponível para o sistema. As principais restrições são coletadas do projeto de proteção, por meio do estudo das correntes de curto-circuito da instalação elétrica.

2.2.1. Resistividade do local de instalação

A resistividade do local é obtida a partir das medições de resistividade pelo método de Wenner, procedimento descrito no capítulo anterior na seção 1.4. Para garantir melhor precisão nos cálculos, deve-se realizar a medição em cinco pontos distintos do terreno, variando cinco vezes as distâncias dos eletrodos e desprezar todos os valores de resistividade que apresentem desvio de 50% em relação a média. A partir dessas informações calcula-se a resistividade média referente a cada distância.

2.2.2. Resistividade da superfície do solo “ ρ_s ”

Normalmente, na superfície acima de uma malha de aterramento instalada ao tempo dispõe de uma camada de 100 a 200 mm de pedra brita. Essa camada garante melhor retenção da umidade do solo e uma boa isolamento, consequência de sua resistividade elevada ($3000 \Omega \cdot m$) [2]. Essa camada de isolamento reduz a ocorrência de acidentes fatais em situações de faltas com a terra.

2.2.3. Estudo das correntes de curto-circuito

As correntes de curto-circuito são definidas no projeto de ajuste do sistema de proteção e na coordenação. Os valores dessas correntes dependem das impedâncias da instalação e do ponto de ocorrência da falta até a fonte geradora. Podem assumir valores de 10 a 100 vezes da corrente nominal do ponto do defeito [3]. Mediante isso, tal informação é de

extrema relevância no projeto da malha de aterramento, pois os elementos que compõem a malha devem ser capazes de suportar essas correntes.

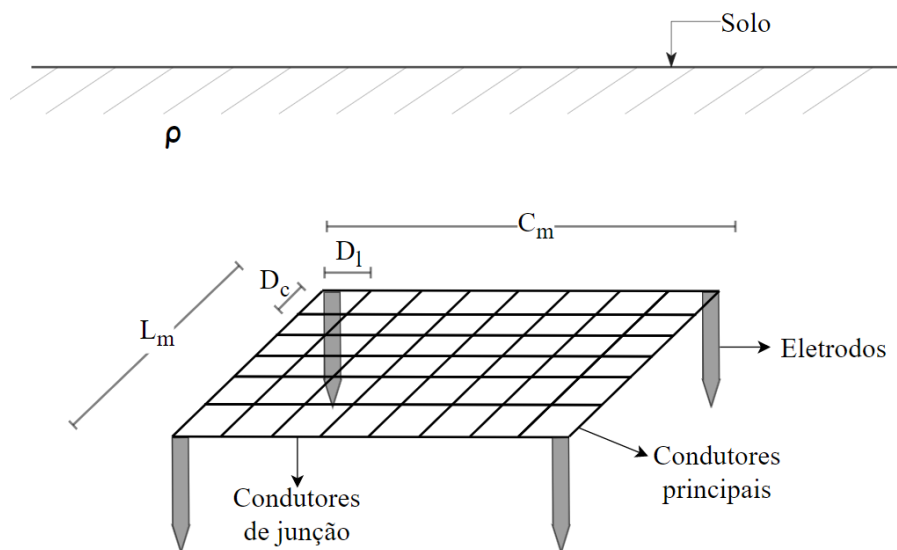
2.2.4. Proposta inicial de malha de aterramento

Baseada nas limitações econômicas e físicas, a proposta inicial da malha deve levar em conta a disponibilidade de espaço para o aterramento. Sistemas onde há a necessidade de baixos valores de resistência e pequenas variações de potenciais demandam uma área maior, ocasionando a elevação dos custos [8]. Portanto, para se estimar a área demandada para a malha que atenderá as exigências previstas em norma há a seguinte formulação:

$$R_{tm} = \frac{\rho_a}{4} \times \sqrt{\frac{\pi}{S}} \quad (24)$$

$$S = \frac{\pi \times \rho_a^2}{16 \times R_{tm}^2} \quad (25)$$

A área do sistema de aterramento (S) depende da resistividade aparente do solo (ρ_a) e da resistência elétrica que pretende-se obter com a malha de aterramento (R_{tm}). A malha será disposta em toda essa área, sendo que, no seu entorno, instala-se um condutor formando um quadrado (ou retângulo) e na parte interna, condutores, formando um reticulado como se pode observar na Figura 26.

Figura 26 - Geometria da malha de terra.

Fonte: autora.

Os eletrodos são fixados aos vértices das quadrículas. Os condutores paralelos à largura da malha (L_m) são denominados condutores principais e aqueles paralelos ao comprimento (C_m) denominam-se condutores de junção. O projetista deve estimar uma proposta inicial de comprimento, largura, espaçamento dos condutores principais e de junção e a profundidade que a malha será enterrada.

2.3. Procedimento 2

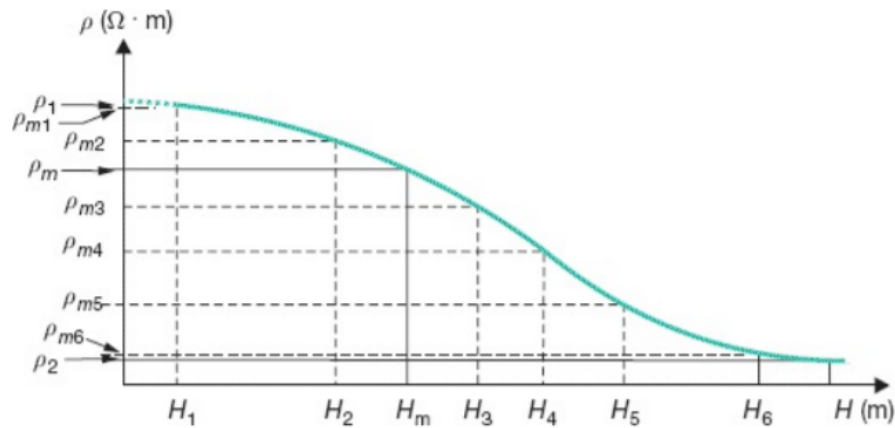
Dadas as informações destacadas nas seções anteriores, é necessário realizar o tratamento desses dados para serem obtidas as resistividades média e aparente. Vale destacar que o método desenvolvido está limitado aos solos estratificados em duas camadas horizontais. Solos com mais camadas ou camadas inclinadas é necessário que o dimensionamento seja realizado de forma diferente.

A partir das informações de resistividade do solo, traça-se uma curva que descreve o comportamento da resistividade do solo em função da distância entre os eletrodos.

Se o solo apresentar menor resistividade para as camadas mais profundas, a curva em questão terá comportamento similar à Figura 27. Caso contrário, a curva se apresenta

invertida, denotando que na camada mais superficial há menor resistência à passagem de corrente elétrica.

Figura 27 - Curva de resistividade do solo.



Fonte: [3].

Ao prolongar a curva até o eixo “ ρ ”, encontra-se o valor da resistividade da primeira camada do solo “ ρ_1 ”. A resistividade da segunda camada “ ρ_2 ” se dá traçando uma assíntota da curva ao eixo das ordenadas, como se observa na Figura 27. A conclusão desta etapa garante a obtenção dos dados essenciais para a realização dos cálculos.

2.4. Procedimento 3

2.4.1. Resistividade aparente do solo

A resistividade média do solo é calculada a partir de (26), onde “ K_1 ” é o fator de multiplicação definido na Tabela 5, dado em função da relação entre as resistividades ρ_2 e ρ_1 . A profundidade da resistividade média é identificada obtendo-se, por meio da curva da base de resistividades, o valor H_m correspondente à “ ρ_m ”.

$$\rho_m = \rho_1 \times K_1 \quad (26)$$

Tabela 5 - Fator de multiplicação.

ρ_2/ρ_1	K1	ρ_2/ρ_1	K1	ρ_2/ρ_1	K1	ρ_2/ρ_1	K1
0,0010	0,6839	0,3000	0,8170	6,5000	1,3310	19,0000	1,4320
0,0020	0,6844	0,3500	0,8348	7,0000	1,3400	20,0000	1,4350
0,0025	0,6847	0,4000	0,8517	7,5000	1,3490	30,0000	1,4560
0,0030	0,6850	0,4500	0,8676	8,0000	1,3560	40,0000	1,4670
0,0040	0,6855	0,5000	0,8827	8,5000	1,3630	50,0000	1,4740
0,0042	0,6858	0,5500	0,8971	9,0000	1,3690	60,0000	1,4780
0,0050	0,6861	0,6000	0,9107	9,5000	1,3750	70,0000	1,4820
0,0060	0,6866	0,6500	0,9237	10,0000	1,3800	80,0000	1,4840
0,0070	0,6871	0,7000	0,9361	10,5000	1,3850	90,0000	1,4860
0,0080	0,6877	0,7500	0,9480	11,0000	1,3900	100,0000	1,4880
0,0090	0,6882	0,8000	0,9593	11,5000	1,3940	110,0000	1,4890
0,0100	0,6877	0,8500	0,9701	12,0000	1,3980	120,0000	1,4900
0,0150	0,6914	0,9000	0,9805	12,5000	1,4010	130,0000	1,4910
0,0200	0,6940	0,9500	0,9904	13,0000	1,4040	140,0000	1,4920
0,0300	0,6993	1,0000	1,0000	13,5000	1,4080	150,0000	1,4930
0,0400	0,7044	1,5000	1,0780	14,0000	4,4100	160,0000	1,4940
0,0500	0,7095	2,0000	1,1340	14,5000	1,4130	180,0000	1,4950
0,0600	0,7145	2,5000	1,1770	15,0000	1,4160	200,0000	1,4960
0,0700	0,7195	3,0000	1,2100	15,5000	1,4180	240,0000	1,4970
0,0800	0,7243	3,5000	1,2370	16,0000	1,4210	280,0000	1,4980
0,0900	0,7292	4,0000	1,2600	16,5000	1,4230	350,0000	1,4990
0,1000	0,7339	4,5000	1,2780	17,0000	1,4250	450,0000	1,5000
0,1500	0,7567	5,0000	1,2940	17,5000	1,4270	640,0000	1,5010
0,2000	0,7781	5,5000	1,3080	18,0000	1,4290	1000,0000	1,5010
0,2500	0,7981	6,0000	1,3200	18,5000	1,4300	-	-

Fonte: [3].

A relação entre o raio “ R ”, que refere-se à área da malha de terra dado por (27), e a profundidade “ H_m ” da camada em que a resistividade média se encontra determina o

coeficiente “ K_2 ”. Introduzindo os valores de “ K_1 ” e “ K_2 ” na Tabela 6 obtém-se o valor de “ K_3 ”, a partir do qual determina-se a resistividade aparente do solo (29). Para se obter valores mais coerentes de constantes, é comum o uso de técnicas de interpolação nas tabelas 5 e 6. Esse é um dos pontos em que um sistema especialista pode auxiliar consideravelmente no dimensionamento de uma malha de aterramento.

$$R = \sqrt{\frac{S}{\pi}} \quad (27)$$

$$K_2 = \frac{R}{H_m} \quad (28)$$

$$\rho_a = K_3 \times \rho_1 \quad (29)$$

Tabela 6 - Determinação da resistividade aparente do solo de duas camadas.

R/Hm	Relação ρ_2/ρ_1												
	0,01	0,05	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20	50	100	200
	Relação ρ_a/ρ_1												
0,1	1	1,01	1,01	1,02	1,05	1	1,1	1,15	1,18	1,2	1,2	1,3	1,3
0,2	0,95	0,96	1	0,97	0,99	1	1,13	1,2	1,25	1,3	1,4	1,4	1,5
0,5	0,8	0,9	0,98	0,95	1	1	1,2	1,3	1,4	1,6	1,8	2	2,3
1	0,77	0,83	0,9	0,85	0,9	1	1,3	1,5	1,6	2	2,5	2,8	3
2	0,67	0,82	0,86	0,86	0,9	1	1,31	1,55	1,6	2,6	3,2	4	4,5
5	0,56	0,6	0,65	0,68	0,8	1	1,32	2	2,9	4	5,7	7,3	8,8
10	0,48	0,52	0,6	0,6	0,8	1	1,35	2,4	3,5	5,3	8	11	14
20	0,41	0,45	0,5	0,53	0,72	1	1,4	2,7	4,2	6,8	12	15	21
35	0,36	0,4	0,45	0,5	0,71	1	1,4	2,8	4,8	7,8	14	18	27
50	0,32	0,37	0,4	0,48	0,7	1	1,5	3,1	5,4	8,5	16	23	33
75	0,29	0,35	0,38	0,46	0,68	1	1,5	3,1	5,5	9	17	26	40
100	0,27	0,31	0,35	0,42	0,55	1	1,5	3,2	5,8	9,8	18	39	45
200	0,22	0,26	0,3	0,38	0,6	1	1,6	3,5	6	11	22	35	56
500	0,18	0,21	0,25	0,35	0,6	1	1,7	3,7	6,7	12	25	42	77
1000	0,15	0,17	0,22	0,3	0,6	1	1,8	4	7	13	37	48	85

Fonte: [3].

2.4.2. Seção mínima do condutor

Na determinação da seção do condutor de aterramento, deve-se considerar o caso mais extremo, ou seja, quando há o contato direto do condutor energizado com o condutor terra e, conseqüentemente, a corrente de curto-circuito é a máxima. A seção do condutor de cobre “K” em mm^2/A é dada pela Tabela 7.

Tabela 7 - Seção mínima do condutor (mm^2/A).

Tempo	Cabo simples - Solda exotérmica (K)	Cabo com juntas soldadas (K)	Cabo com juntas Rebitadas (K)
30	0,020268	0,025335	0,032935
4	0,007093	0,010134	0,012160
1	0,003546	0,005067	0,006080
0,5	0,002533	0,003293	0,004306

Fonte: [3].

A seção mínima do condutor de aterramento em mm^2 é obtido multiplicando-se “K” pela corrente de curto-circuito fase-terra (30). Porém, vale lembrar que, conforme norma técnica da concessionária local, a seção do condutor de cobre nu em sistemas de aterramento não deve ser inferior a $50 mm^2$.

$$S_c = K \times I_{cft} \quad (30)$$

2.4.3. Número de condutores principais e de junção

Por meio da proposta inicial de malha, estima-se o número de condutores principais e de junção. Esse número está relacionado ao comprimento e largura da malha e ao tamanho das quadrículas internas.

$$N_{cp} = \frac{C_m}{D_l} + 1 \quad (31)$$

$$N_{cj} = \frac{L_m}{D_c} + 1 \quad (32)$$

Em (31) e (32), “ C_m ” corresponde ao comprimento da malha, “ L_m ” à largura da malha e “ D_c ” e “ D_l ” aos espaçamentos entre os condutores.

2.4.4. Comprimento de eletrodos horizontais da malha de terra

O comprimento está relacionado ao número de condutores principais “ N_{cp} ” e de junção “ N_{cj} ”, ao comprimento “ C_m ” e à largura “ L_m ” da malha. O fator 1,05 corresponde ao acréscimo de segurança, prevendo-se alguma folga nas conexões da malha aos equipamentos.

$$L_{cm} = 1,05 \times [(C_m \times N_{cj}) + (L_m \times N_{cp})] \quad (33)$$

2.4.5. Coeficientes de ajuste “ K_m ”, “ K_s ” e “ K_i ”

O coeficiente da malha “ K_m ” corrige as influências da profundidade da malha “ H ”, do número de condutores principais e de junção e também dos espaçamentos das quadriculas. Há um coeficiente de ajuste ao longo de cada dimensão da malha.

$$K_{mp} = \frac{1}{2 \times \pi} \times \ln \left[\frac{D_l^2}{4 \times \pi \times (N_{cp} - 1) \times H \times D_{ca}} \right] \quad (34)$$

$$K_{mj} = \frac{1}{2 \times \pi} \times \ln \left[\frac{D_c^2}{4 \times \pi \times (N_{cj} - 1) \times H \times D_{ca}} \right] \quad (35)$$

Onde “ D_{ca} ” o diâmetro do condutor (em metros) obtido através da Tabela 8.

Tabela 8 - Características dimensionais dos cabos.

Seção nominal (mm ²)	Nº fios	Condutor	Cabos isolados		Cabos unipolares	
		Diâmetro nominal (mm)	Espessura isolamento (mm)	Diâmetro externo (mm)	Espessura isolamento (mm)	Diâmetro externo (mm)
1,50	7	1,56	0,7	3,0	1,0	5,50
2,50	7	2,01	0,8	3,7	1,0	6,00
4	7	2,55	0,8	4,3	1,0	6,80

Seção nominal (mm ²)	Condutor		Cabos isolados		Cabos unipolares	
	Nº fios	Diâmetro nominal (mm)	Espessura isolação (mm)	Diâmetro externo (mm)	Espessura isolação (mm)	Diâmetro externo (mm)
6	7	3,00	0,8	4,9	1,0	7,30
10	7	3,12	1,0	5,9	1,0	8,00
16	7	4,71	1,0	6,9	1,0	9,00
25	7	5,87	1,2	8,5	1,2	10,80
35	7	6,95	1,2	9,6	1,2	12,00
50	19	8,27	1,4	11,3	1,4	13,90
70	19	9,75	1,4	12,9	1,4	15,50
95	19	11,42	1,6	15,1	1,6	17,70
120	37	12,23	1,6	16,5	1,6	19,20
150	37	14,33	1,8	18,5	1,8	21,40
185	37	16,05	2,0	20,7	2,0	23,80
240	61	18,27	2,2	23,4	2,2	26,70
300	61	20,46	2,4	26,0	2,4	29,50
400	61	23,65	2,6	29,7	2,6	33,50
500	61	26,71	2,8	33,3	2,8	37,30
630	61	29,26	3,0	36,2	3,0	40,25

Fonte: [3].

O coeficiente de superfície “ K_s ” corrige as influências da profundidade da malha, do diâmetro do condutor e do espaçamento. É necessário calcular este coeficiente na direção dos condutores principais e de junção, conforme se observa em (36) e (37).

$$K_{sp} = \frac{1}{\pi} \times \left\{ \frac{1}{2 \times H} + \frac{1}{D_l + H} + \frac{\ln[0,655 \times (N_{cp} - 1) - 0,328]}{D_l} \right\} \quad (36)$$

$$K_{sj} = \frac{1}{\pi} \times \left\{ \frac{1}{2 \times H} + \frac{1}{D_c + H} + \frac{\ln[0,655 \times (N_{cj} - 1) - 0,328]}{D_c} \right\} \quad (37)$$

O coeficiente de irregularidade “ K_i ”, definido pelas equações (38) e (39), corrige a não uniformidade do fluxo da corrente para a terra.

$$K_{ip} = 0,65 + 0,172 \times N_{cp} \quad (38)$$

$$K_{ip} = 0,65 + 0,172 \times N_{cj} \quad (39)$$

2.4.6. Comprimento mínimo do condutor da malha

O comprimento mínimo de eletrodos horizontais depende da resistividade do material disposto na superfície " ρ_s ", da resistividade aparente " ρ_a ", da corrente de curto-circuito fase-terra mínimo " $I_{cft\ min}$ ", do tempo de duração do defeito T_f do maior produto entre os coeficientes de malha e de superfície " $K_m \times K_i$ ", ambos correspondentes à mesma direção. Para se obter o comprimento mínimo " L_c " de eletrodos horizontais, pode-se utilizar (40).

$$L_c = \frac{K_m \times K_i \times \rho_a \times I_{cft\ min} \times \sqrt{T_f}}{0,116 + 0,174 \times \rho_s} \text{ (m)} \quad (40)$$

A primeira validação do projeto parte de $L_{cm} \geq L_c$. Se a condição não for atendida, deve-se alterar a proposta inicial de malha.

2.5. Procedimento 4

2.5.1. Tensão de passo e de toque

Tensão de passo na periferia da malha corresponde à diferença de potencial entre dois pontos afastados a uma distância de 1 metro da malha.

$$E_{per} = \frac{K_s \times K_i \times \rho_1 \times I_{cft}}{L_{cm}} \text{ (V)} \quad (41)$$

Para validação do projeto, a tensão de passo máxima suportável " E_{pa} ", calculada em (23), deve ser superior a E_{per} .

A tensão de toque existente pode ser determinada por (42).

$$E_{te} = \frac{K_m \times K_i \times \rho_1 \times I_{cft}}{L_{cm}} \text{ (V)} \quad (42)$$

Como condição de validação do projeto, " E_{tm} ", calculada em (22), deve ser superior à E_{te} .

2.5.2. Corrente máxima de choque

A corrente máxima suportada pelo corpo humano para um determinado tempo de atuação da proteção pode ser calculada conforme (43).

$$I_{ch} = \frac{116}{\sqrt{T_f}} \text{ (mA)} \quad (43)$$

2.5.3. Corrente de choque devido à tensão de passo (sem camada de brita)

A corrente de choque devido à tensão de passo, sem camada de isolamento, na periferia da malha, pode ser obtida a partir de (44).

$$I_{pmsb} = \frac{1000 \times E_{per}}{1000 + 6 \times \rho_1} \text{ (mA)} \quad (44)$$

Como condição de validação, " I_{pmsb} " deve ser inferior à corrente " I_{ch} " que o corpo humano pode suportar.

2.5.4. Corrente de choque devido à tensão de passo (com camada de brita)

Quando a condição descrita em 2.6.2 não é atendida, torna-se necessário realizar a adequação da camada superior inserindo-se uma camada de brita. Dessa forma, os cálculos de corrente de choque serão modificados. A máxima corrente de choque poderá ser calculada conforme (45).

$$I_{pmcb} = \frac{1000 \times E_{per}}{1000 + 6 \times (\rho_1 + \rho_s)} \text{ (mA)} \quad (45)$$

De forma similar à seção 2.6.3, a condição de validação do projeto da malha será tal que " I_{pmcb} " seja inferior a " I_{ch} ".

2.5.5. Corrente de choque devido à tensão de toque (sem camada de brita)

Condição similar deve ser atendida se houver o choque ocasionado pelo toque, quando não há camada de isolamento (46).

$$I_{tmsb} = \frac{1000 \times E_{te}}{1000 + 1,5 \times \rho_1} \text{ (mA)} \quad (46)$$

A condição de validação da malha proposta será dada desde que " I_{tmsb} " seja inferior a " I_{ch} ".

2.5.6. Corrente de choque devido à tensão de toque (com camada de brita)

Para esta situação, a corrente de choque é proveniente do toque a superfícies submetidas à diferença de potencial com o solo, porém com camada adicional de brita visando atender a condição de validação da malha (47).

$$I_{tmcb} = \frac{1000 \times E_{te}}{1000 + 1,5 \times (\rho_1 + \rho_s)} \text{ (mA)} \quad (47)$$

Similar à 2.6.6, a condição de validação da malha será dada desde que " I_{tmcb} " seja inferior a " I_{ch} ".

2.5.7. Corrente de acionamento do sistema de proteção

Determinada em função de (48).

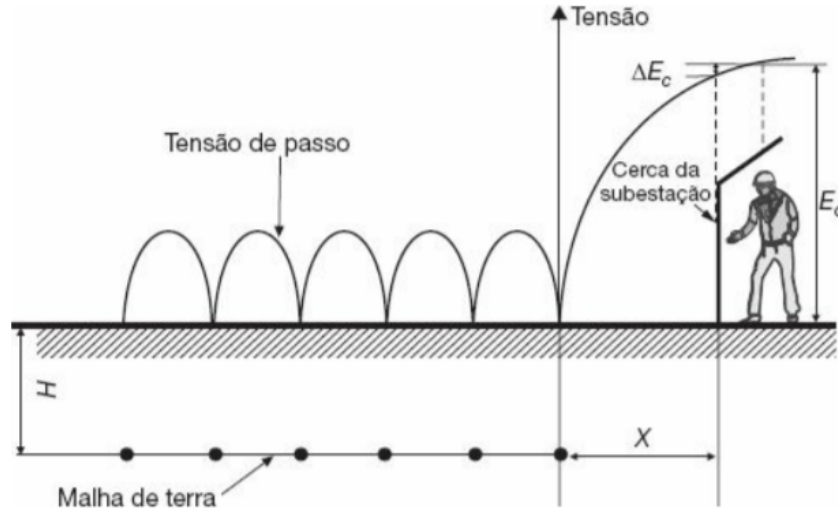
$$I_a = \frac{(R_{ch} + 1,5 \times \rho_s) \times 9 \times L_{cm}}{1000 \times K_m \times K_i \times \rho_1} \text{ (A)} \quad (48)$$

A resistência do corpo humano R_{ch} usualmente utiliza-se 1000 Ω . Deve-se considerar o maior produto entre K_m e K_i na mesma direção.

2.5.8. Potenciais da região externa à malha

É comum que cercas metálicas sejam utilizadas para a restrição de acesso à região da subestação. As cercas podem ou não estar aterradas, entretanto, para garantir a atuação do sistema de proteção, é essencial que a mesma esteja interligada à terra. Entretanto, não dá segurança à pessoa que estiver em contato com a cerca durante o defeito, pois a mesma ficará submetida a um potencial " E_c " [3]. Essa situação pode ser visualizada na Figura 28.

Figura 28 - Potenciais externos à malha de terra.



Fonte: [3].

Diante disso, deve-se estimar os níveis que esse potencial externo pode assumir para se garantir total segurança durante o defeito. O potencial em que um operador possa estar submetido ao tocar na cerca de delimitação não aterrada é dado por (49).

$$\Delta E_c = [K_{c(x)} - K_{c(x-1)}] \frac{\rho_1 \times I_{cft}}{L_c} \text{ (V)} \quad (49)$$

$$K_{c(x)} = \frac{1}{2 \times \pi} \times \ln \left\{ \frac{(H^2 + X^2) \times [H^2 + (D+X)^2]}{H \times D_{ca} + (D^2 + X^2)} \right\} + \frac{1}{\pi} \times \ln \left[\left(\frac{2 \times D + X}{2 \times D} \right) \times \left(\frac{3 \times D + X}{3 \times D} \right) \times \dots \times \left(\frac{(N-1) \times D + X}{(N-1) \times D} \right) \right] \quad (50)$$

A variável “X”, dada em metros, corresponde ao afastamento da cerca em relação à malha e “D”, também em metros, corresponde à distância entre os eletrodos horizontais na direção considerada. Para o caso da cerca não interligada ao aterramento, a condição de validação do projeto é tal que ΔE_c seja menor que E_{te} .

Dependendo da distância da cerca esse cálculo pode-se tornar extenso e como contém muitos parâmetros as chances de erros são elevadas, motivo pelo qual o sistema especialista torna-se necessário.

2.5.9. Resistência de uma malha com eletrodos horizontais e verticais

Resistência da malha correspondente aos condutores horizontais é dada por (51).

$$R_{mc} = \frac{\rho_a}{4 \times R} + \frac{\rho_a}{L_{cm}} (\Omega) \quad (51)$$

Em (51), “ R ”, em metros, equivale ao raio do círculo cuja área seja a mesma da malha projetada. As condições de validação são $R_{mc} \leq 10\Omega$, para subestações de 15 a 36 kV, e $R_{mc} \leq 5\Omega$ para subestações com tensões iguais ou maiores a 69 kV.

Quando se trabalha com malhas do tipo quadrado cheio pode-se utilizar o coeficiente de redução K_h para estimar o valor da resistência de um conjunto de eletrodos verticais conectados em paralelo. Em (52), “ N_h ” corresponde à quantidade de hastes, o coeficiente “ A ” é determinado pela Tabela 9 em função de parâmetros físicos dos eletrodos do distanciamento médio entre eles e “ B ”, dado pela Tabela 10, é obtido em função do número de hastes. Novamente, o uso de interpolações é bastante importante para se obter resultados mais adequados.

$$K_h = 1 + \frac{A \times B}{N_h} \quad (52)$$

Tabela 9 - Coeficiente A.

Diâmetro do eletrodo	Distância entre eletrodos (m)					
	2	3	4	5	9	12
Para eletrodo de comprimento igual a 3 m						
1/2"	0,2292	0,1528	0,1149	0,0917	0,0509	0,0382
3/4"	0,2443	0,1629	0,1222	0,0977	0,0543	0,0407
1	0,2563	0,1709	0,1282	0,1025	0,0570	0,0427
Para eletrodo de comprimento igual a 2,4 m						
1/2"	0,1898	0,1266	0,0949	0,0759	0,0422	0,0316
3/4"	0,2028	0,1352	0,1014	0,0811	0,0450	0,0338
1	0,2132	0,1421	0,1066	0,0853	0,0474	0,0355

Fonte: [3].

Tabela 10 - Coeficiente B.

Nº eletrodos	B
4	2,7071
9	5,8917
16	8,5545
25	11,4371
36	14,065
49	16,8933

Fonte: [3].

Obtendo-se o valor de " K_h ", a resistência de aterramento de um conjunto de eletrodos verticais pode ser expressa por (53).

$$R_{ne} = K_h \times R_{el} (\Omega) \quad (53)$$

Novamente as técnicas de interpolação são necessárias, visto que, na Tabela 9 não há todas as distâncias possíveis para os eletrodos e o mesmo ocorre na Tabela 10 para o número de eletrodos. Logo, nessas etapas a utilização de um sistema de automatização se torna útil.

2.5.10. Resistência mútua

Há ainda a resistência denominada mútua " R_{mu} ", que é consequência do acoplamento entre hastes e condutores. Para se obter o valor de " R_{mu} ", pode-se utilizar (57), levando-se em conta a necessidade de (54) a (56) que lidam, exclusivamente, com os aspectos construtivos da malha.

$$K = \frac{C_m}{L_m} \quad (54)$$

$$K_1 = 1,14125 - 0,0425 \times K \quad (55)$$

$$K_2 = 5,49 - 0,11443 \times K \quad (56)$$

$$R_{mu} = \frac{\rho_a}{\pi \times L_{cm}} \times \left[\ln \left(\frac{2 \times L_{cm}}{L_{th}} \right) + \frac{K_1 \times L_{cm}}{\sqrt{S}} - K_2 + 1 \right] \quad (57)$$

2.5.11. Resistência da malha de aterramento

Finalmente, tendo-se em mãos os valores da resistência da malha composta exclusivamente por eletrodos horizontais " R_{mc} ", a resistência decorrente dos eletrodos verticais " R_{ne} " e a resistência mútua " R_{mu} ", obtém-se a resistência total da malha de terra conforme (58).

$$R_{tm} = \frac{R_{mc} \times R_{ne} - R_{mu}^2}{R_{mc} + R_{ne} - 2 \times R_{mu}} (\Omega) \quad (58)$$

2.6. Procedimento 5

Para subestações de consumidor, classes de isolamento de 15 kV a 36 kV, se ao final dos cálculos as condições de validação não atenderem aos critérios e a resistência total da malha " R_{tm} " não alcançar valor inferior a 10 Ω , o projeto deverá passar por revisão. Caberá ao projetista alterar os parâmetros da proposta inicial de malha de aterramento como o espaçamento entre os eletrodos, o comprimento ou largura da malha (conforme a disponibilidade e custos), profundidade e, se necessário, propor um procedimento de tratamento do solo para diminuir a resistividade do solo.

2.7. Procedimento 6

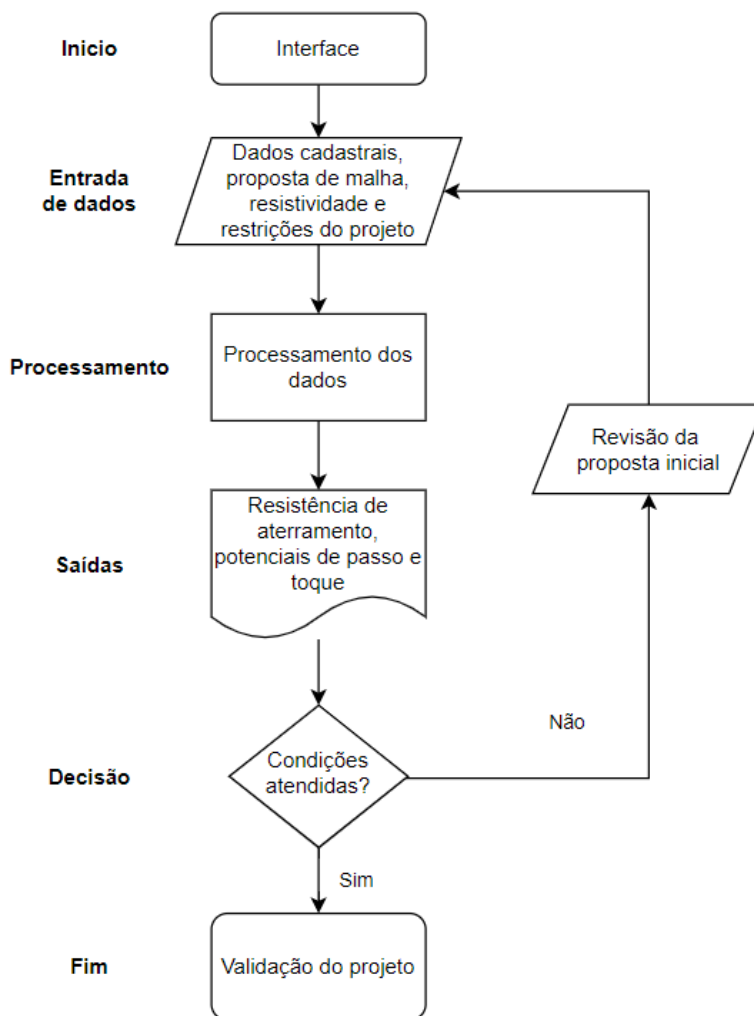
Atendendo todas as condições de validação o projeto é pré-aprovado e poderá ser implementado. Posteriormente, após implementado, será submetido à avaliação da concessionária local que realizará os testes devidos para a aprovação final.

3. ARQUITETURA E FERRAMENTAS DE PROGRAMAÇÃO

Com base no capítulo anterior, nota-se o quanto o projeto de malhas pode tornar-se árduo. Ao mesmo tempo em que os cálculos necessários para o projeto de uma malha de aterramento de subestação não são complexos e, inclusive, poderiam ser facilmente obtidos por meio de ferramentas computacionais que lidam com equações matemáticas, a consulta por inúmeras tabelas, a necessidade de interpolação e de cálculos recorrentes tornam o trabalho bastante exaustivo e passivo de erros. Sendo assim, além de estudar detalhadamente como proceder para realizar um bom projeto de aterramento, a proposta fundamental deste trabalho é desenvolver um sistema especialista, com boa interface com o usuário, a partir da programação em *VBA* (*Visual Basic for Applications*).

A consulta das tabelas e os cálculos mais avançados são realizados a partir do *VBA*, utilizando-se de uma estrutura de programação para realizar essas etapas. A programação em *VBA* permite criar rotinas de verificação em linhas e colunas subsequentes. O desafio no desenvolvimento do sistema foi implementar uma rotina capaz de verificar ambos. A visão geral da ferramenta em *VBA* desenvolvida segue a sequência lógica presente na Figura 29.

Figura 29 - Visão geral do sistema especialista.



Fonte: autora.

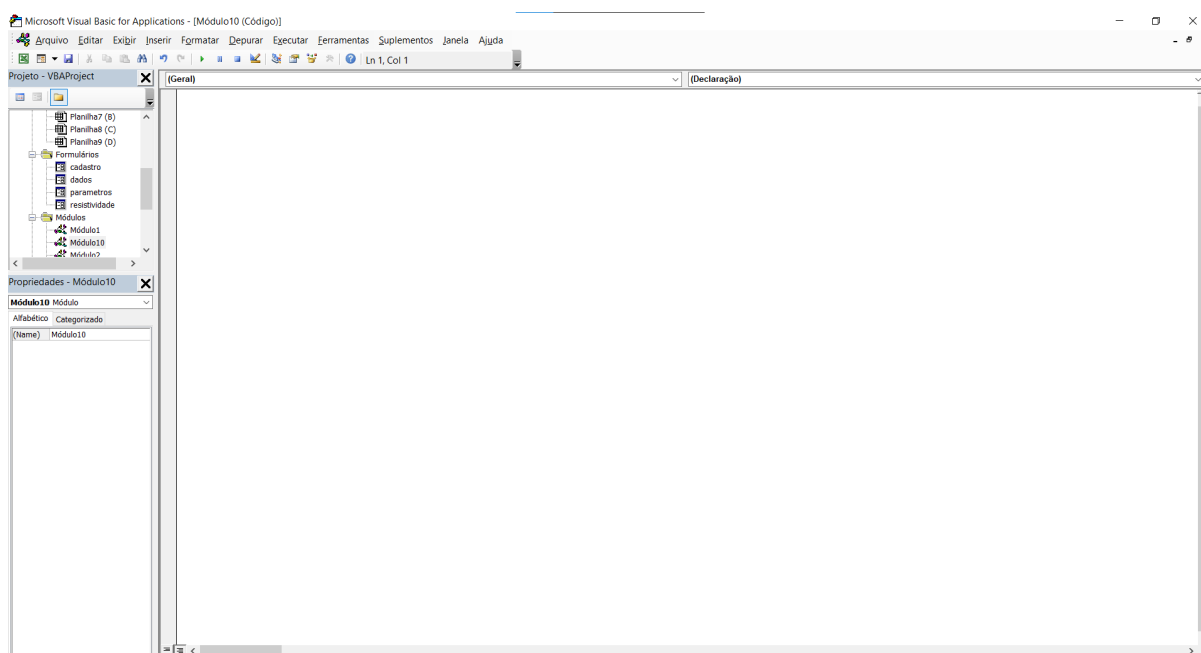
Na etapa de processamento de dados, o Microsoft Excel ® e a programação em VBA atuam em paralelo. O Excel ® desenvolve os cálculos mais básicos e, ao necessitar de algum dado tabelado ou cálculo mais aprofundado, chama a rotina programada no VBA que retorna a informação demandada.

3.1. *VBA - Visual Basic for Applications*

Trata-se de uma linguagem de programação que tem como principal função estender e personalizar os aplicativos Office ® [14]. O *VBA* vem ganhando espaço onde a

automatização dos processos é uma necessidade. Em resumo, é a linguagem de programação por trás dos aplicativos Office ®. Ao utilizar o atalho Alt + F11 dentro dos aplicativos Office ® abre a janela de programação do *Visual Basic*. A interface gráfica do *VBA* pode ser visualizada na Figura 30.

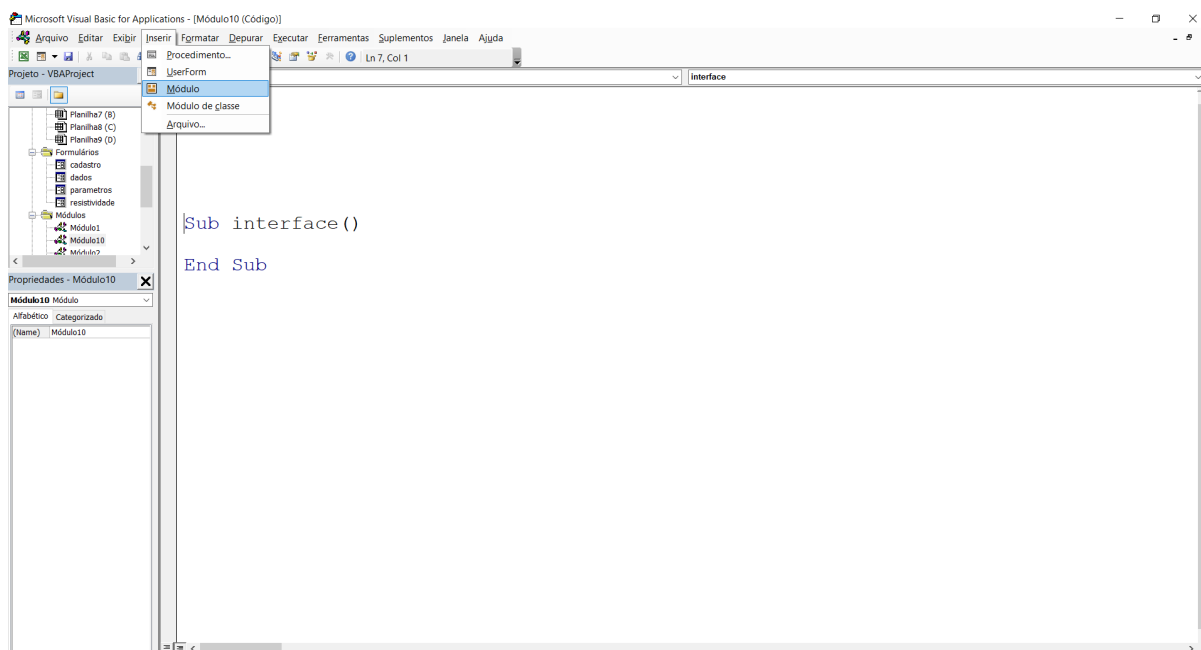
Figura 30 - Interface de programação em *VBA*.



Fonte: autora.

Para iniciar-se a programação insere-se um novo módulo. Iniciando a rotina com “sub”, logo após o nome da rotina, seguido por “()” e finalizando com “end sub”. Conforme representado na Figura 31.

Figura 31 - Módulo de programação em *VBA*.



Fonte: autora.

3.1.1. Buttons

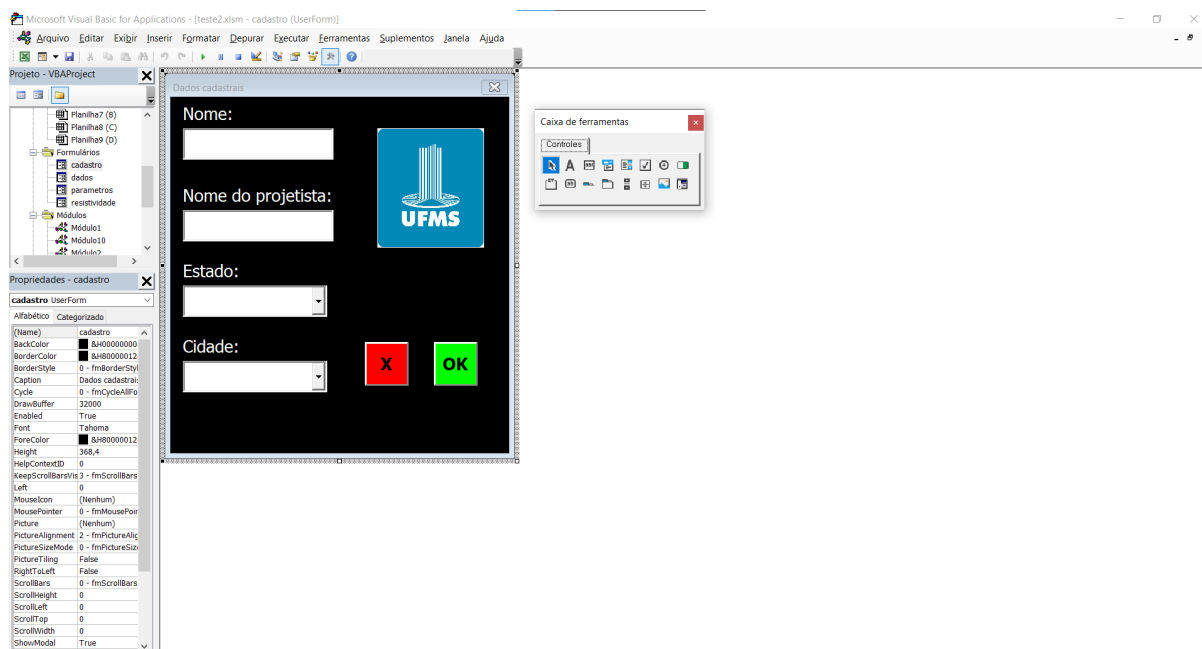
Uma das funcionalidades associada à programação em *VBA* é a possibilidade de criação de botões responsáveis por dar início à compilação dos códigos presentes na programação [14]. Ao “click” do usuário no botão iniciar, a lógica de programação abre um formulário onde o usuário deverá inserir todas as informações relevantes ao projeto.

3.1.2. UserForm

As janelas de diálogo estabelecem o contato inicial do usuário com o sistema [14]. Ao clicar no botão de início na planilha do Excel ® o usuário recebe uma mensagem solicitando as informações de entradas, sendo, os dados cadastrais do cliente e projetista, as informações de resistividade, dados do local e as restrições impostas ao projeto. Por meio de uma rotina de

programação foi possível selecionar onde essas informações coletadas serão armazenadas. A interface de criação de formulários no *Visual Basic* pode ser visualizada na Figura 32.

Figura 32 - Interface de criação de formulários.



Fonte: autora.

3.1.3. MsgBox

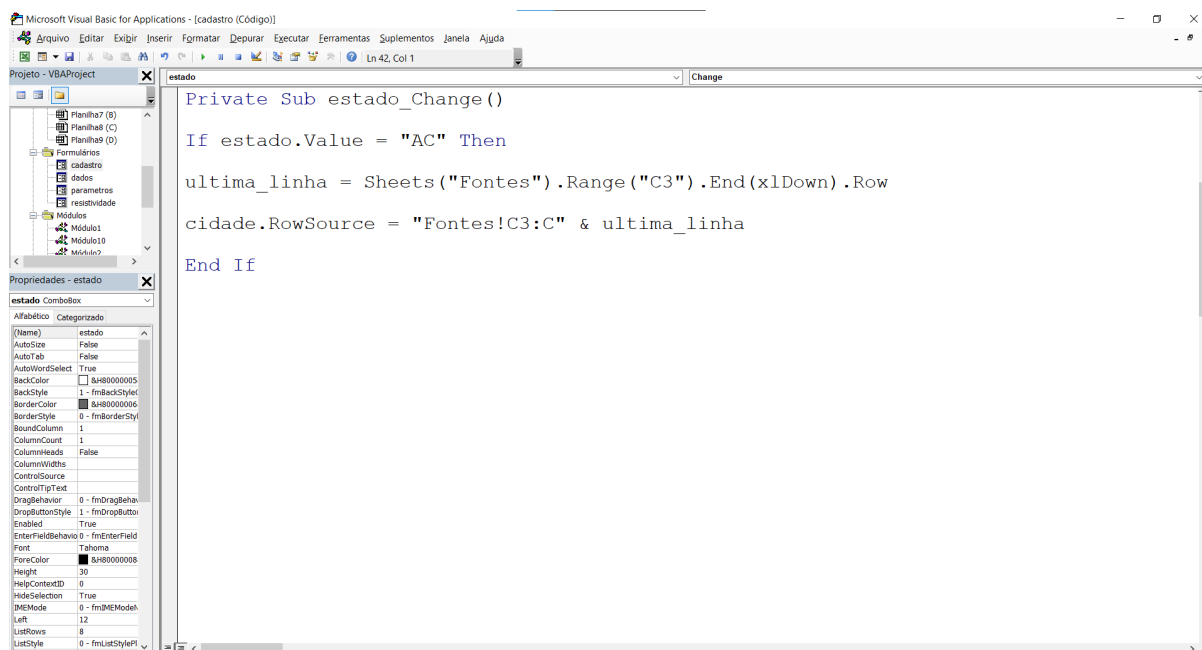
Assim como *UserForm* tem como função estabelecer contato com o usuário, o *MsgBox* refere-se a uma caixa de diálogo, responsável por prestar informações ao usuário [14]. Após inserir os dados de projeto no sistema especialista, é retornada uma mensagem informando a validação do armazenamento dos dados.

3.1.4. Estruturas condicionais “IF” e “Else”

A programação utiliza-se principalmente de estruturas condicionais, responsáveis por executar instruções, desde que, a condição de entrada imposta na programação seja atendida. A sintaxe de programação segue um padrão: inicia-se com “*if*” para delimitar a condição, ao

fim das condições de projeto “*then*”. Utiliza-se “*else*” para estabelecer a condição contrária e finaliza-se a função com “*end if*”. Um exemplo de aplicação dessa sintaxe de programação pode ser visualizado na Figura 33.

Figura 33 - Rotina de programação utilizando *if*.



Fonte: autora.

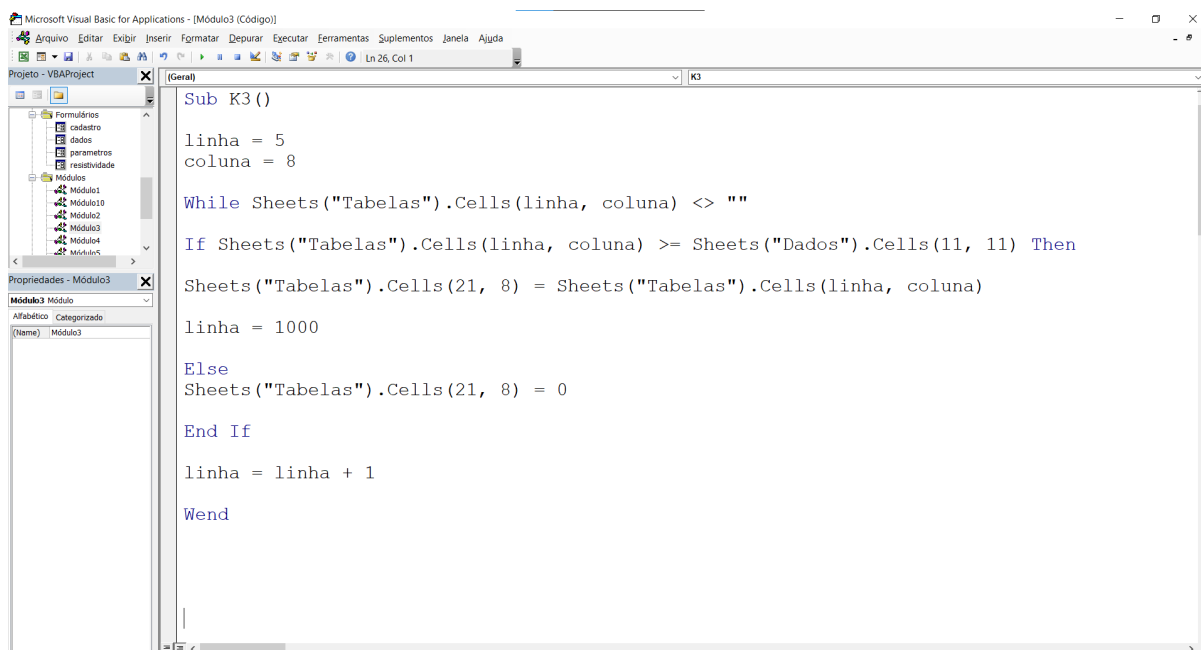
Essas linhas de código são referentes ao formulário da Figura 32, quando o usuário seleciona uma opção de estado, por exemplo, “AC” (Acre) a rotina seleciona a última célula preenchida e esse comando é feito por “.End(xlDown).Row”. Esse comando dá início a uma verificação a partir da célula “C3” na aba “Fontes” da planilha do Excel ®. E o número da última linha preenchida é armazenado na variável “ultima_linha”. A caixa de seleção referente a cidade recebe os dados armazenados na aba “Fontes” da célula “C3” até a última linha preenchida. E a mesma rotina é executada para os outros estados.

3.1.5. Estruturas de loop

Através das estruturas de repetição é possível executar repetidas vezes as linhas de código. Com tal estrutura, as instruções são executadas várias vezes até que a condição

imposta seja satisfeita [14]. Utilizou-se principalmente da estrutura de repetição “*while*” com a finalidade de percorrer as informações das tabelas até encontrar um valor que satisfizesse a condição estabelecida e finalizasse com “*wend*”.

Figura 34 - Rotina de programação utilizando *while*.



Fonte: autora.

Na Figura 34 é possível observar uma rotina utilizando “*while*”. Inicia-se o código com “Sub”, o nome do módulo “K3” seguido por “()”. As variáveis “linha” e “coluna” são inicializadas em um valor referente a uma linha e coluna da planilha do Excel ®. O *while* tem como a finalidade de percorrer na aba “Tabelas” todas as células preenchidas (< > ” “), iniciando na célula “H5”, pois as variáveis “linha” e “coluna” foram inicializadas em 5 e 8 respectivamente.

O “*if*” estabelece a condição de verificação, se uma das células percorridas conter um valor maior ou igual ao que o armazenado na aba “Dados” na célula “K11” (célula de linha 11 e coluna 11) esse valor será armazenado em "H21"(célula de linha 21 e coluna 8). Para garantir o fim do “*loop*”, a variável “linha” recebe 1000, pois “H1000” é uma célula vazia. E o “*else*” estabelece condução contrária, se a célula percorrida conter um valor menor “H21”

recebe zero. Ao fim das condições “*if*” e “*else*” a variável “linha” é incrementada para partir para próxima célula da planilha.

3.2. Banco de dados

O Microsoft Excel ® é um editor de planilhas, com a função de controlar e organizar informações. Neste trabalho, utilizou-se desta ferramenta computacional para armazenar, tratar os dados de entrada e realizar cálculos básicos do projeto da malha de aterramento. As informações pertinentes ao projeto estão armazenadas em sua base de dados, sendo, principalmente, as tabelas de coeficientes multiplicadores, as informações dadas pelos usuários, dados construtivos e diversos parâmetros construtivos.

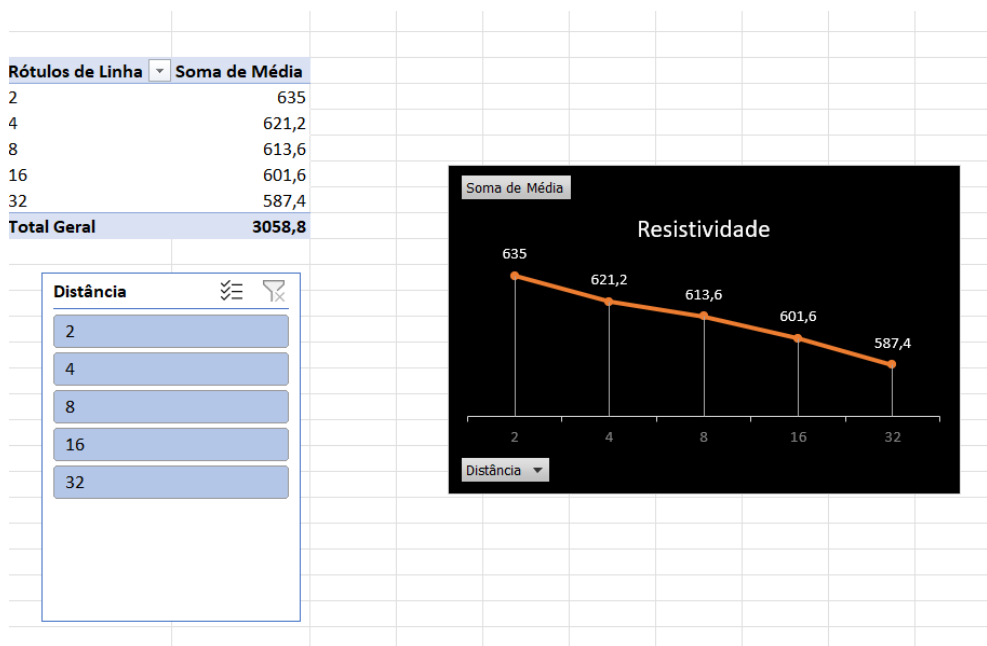
3.2.1. Formatação como tabela

No Microsoft Excel ®, ao formatar um conjunto de dados como tabela, permite-se a melhor visualização e manipulação dos dados [15]. Nessa formatação, é possível utilizar filtros para ocultar dados e tabelas dinâmicas, abordado na seção seguinte.

3.2.2. Tabela dinâmica

Ferramenta utilizada para calcular, analisar e resumir dados [15]. Através dela é possível criar tabelas e gráficos interativos. Ao segmentar os dados, é possível ocultar ou mostrar instantaneamente o dado de uma tabela, permitindo assim a melhor visualização das informações dispostas. A tabela dinâmica construída para os dados de resistividade média de um solo pode ser observada na Figura 35.

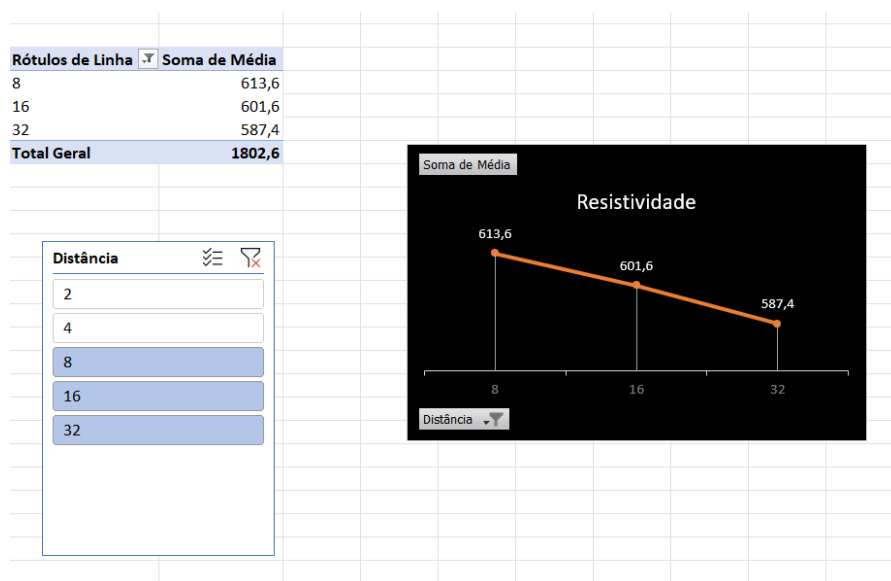
Figura 35 - Tabela dinâmica.



Fonte: autora.

Utilizando da ferramenta de segmentação de dados é possível visualizar na Figura 36 a interação da curva de resistividade.

Figura 36 - Segmentação de dados pela tabela dinâmica.



Fonte: autora.

3.2.3. Dashboard

O “*dashboard*” promove a visualização dos dados num só lugar [15]. Neste é possível realizar análises das informações totais, como também filtrar os dados mais relevantes. Sua implementação é possível unindo informações e gráficos das tabelas dinâmicas. O capítulo subsequente aborda em maiores detalhes o *dashboard* implementado no sistema especialista em projetos de malhas de aterramento.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A fim de se validar o sistema desenvolvido, submeteu-se o mesmo a testes, utilizando como parâmetro uma malha de aterramento hipotética apresentada em [3]. Trata-se de de uma instalação com as seguintes características:

Tabela 11 – Dados das instalações da Indústria Kelvin.

Dados da subestação da Indústria Kelvin - Fortaleza		
Potência nominal	5	kVA
Tensão nominal	15	kV
Largura da malha	41	m
Comprimento da malha	57	m
Profundidade da malha	0,5	m
Número de hastes	12	-
Diâmetro das hastes	3/4	pol
Largura das hastes de aterramento	3	m
Espaçamento entre eletrodos de junção	3,4	m
Espaçamento entre os condutores principais	3,35	m
Superfície coberta por pedra brita 15 cm	3.000	$\Omega \cdot m$
Corrente de curto-circuito fase-terra máxima	55	kA
Corrente de curto-circuito fase-terra mínima	871	A
Espaçamento entre a cerca e a malha de aterramento	5	m

Fonte: [3].

Tabela 12 - Dados de resistividade medida do solo.

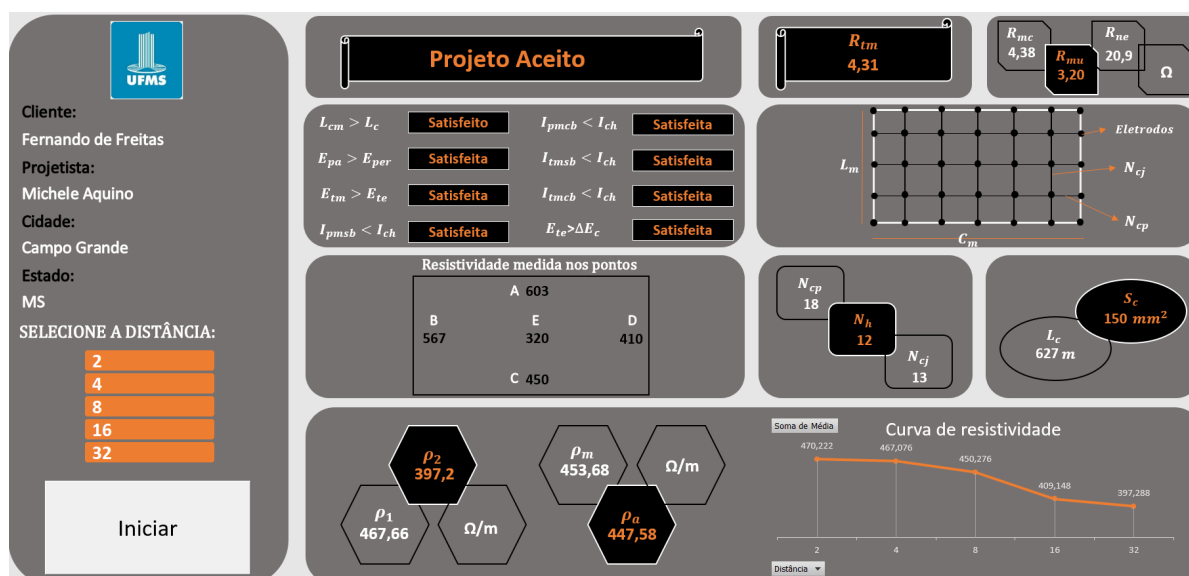
Subestação da Indústria Kelvin - Fortaleza						
Resistividade medida						
Distância (m)	A	B	C	D	E	Média ($\Omega \cdot m$)
2	603,21	567,20	450,20	410,00	320,50	470
4	562,23	526,10	476,11	425,04	345,90	467
8	538,23	496,10	446,11	425,04	345,90	450
16	516,19	437,58	394,58	362,98	334,41	409
32	468,89	415,58	374,58	372,98	354,41	397

Fonte: [3].

4.1. Interface do sistema especialista

4.1.1. Entrada de dados

Para apresentação dos resultados, criou-se um *dashboard* da ferramenta desenvolvida, onde, destacam-se as informações pertinentes à implementação do projeto e os resultados. A Figura 37 traz a interface do sistema especialista.

Figura 37 - Interface do sistema especialista.

Fonte: autora.

Para inserir os dados de projeto, o usuário deve “clique” no botão iniciar, que abre sequencialmente as janelas de formulários. A Figura 38 apresenta o formulário de dados

cadastrais do cliente e do projetista. Já na Figura 39, mostra-se o formulário de proposta inicial de malha de terra. Na Figura 40, apresenta-se o formulário de medição de resistividades. Por fim, na Figura 41 consta o formulário de parâmetros e dados da instalação.

Figura 38 - Formulário de dados cadastrais.

The screenshot displays the software interface for the registration form. On the left sidebar, the client information is listed: **Cliente:** Fernando de Freitas, **Projetista:** Michele Aquino, **Cidade:** Campo Grande, **Estado:** MS. Below this, a section titled **SELECIONE A DISTÂNCIA:** shows a list of distance options: 2, 4, 8, 16, and 32. A large **Iniciar** button is at the bottom of the sidebar. The main area features a grid diagram with labels L_m and C_m , and a **Curva de resistividade** graph. A central dialog box titled **Dados cadastrais** is open, containing fields for **Nome:**, **Nome do projetista:**, **Estado:**, and **Cidade:**, along with **X** and **OK** buttons. The background shows various resistivity parameters like R_{tm} , R_{mc} , R_{mu} , R_{ne} , Ω , N_h , N_{cj} , N_{cp} , S_c , L_c , ρ_1 , ρ_2 , ρ_a , and Ω/m .

Fonte: autora.

Figura 39 - Formulário de proposta inicial de malha de terra.

The screenshot displays the software interface for the initial mesh proposal form. The layout is similar to Figure 38, but the central dialog box is titled **UserForm1** and contains fields for **Comprimento:**, **Largura:**, **Profundidade:**, **Espaçamento DI:**, and **Espaçamento Dc:**, along with **X** and **OK** buttons. The background shows various resistivity parameters and a grid diagram with labels L_m and C_m .

Fonte: autora.

Figura 40- Formulário de resistividades.

Cliente: Fernando de Freitas
 Projetista: Michele Aquino
 Cidade: Campo Grande
 Estado: MS
 SELECIONE A DISTÂNCIA:
 2
 4
 8
 16
 32
 Iniciar

Resistividade: A B C D E

Distância de 2 m:

Distância de 4 m:

Distância de 8 m:

Distância de 16 m:

Distância de 32 m:

467,66 Ω/m 447,58

Curva de resistividade

Distância

Fonte: autora.

Figura 41 - Formulário de dados do local e parâmetros.

Projeto Aceito

Cliente: Fernando de Freitas
 Projetista: Michele Aquino
 Cidade: Campo Grande
 Estado: MS
 SELECIONE A DISTÂNCIA:
 2
 4
 8
 16
 32
 Iniciar

Largura da haste:

Diâmetro da haste:

Ex: 3/4 para haste de 3/4".

Resistividade ps:

Iftmin:

Iftmax:

Espaçamento da cerca:

467,66 Ω/m 447,58

Curva de resistividade

Distância

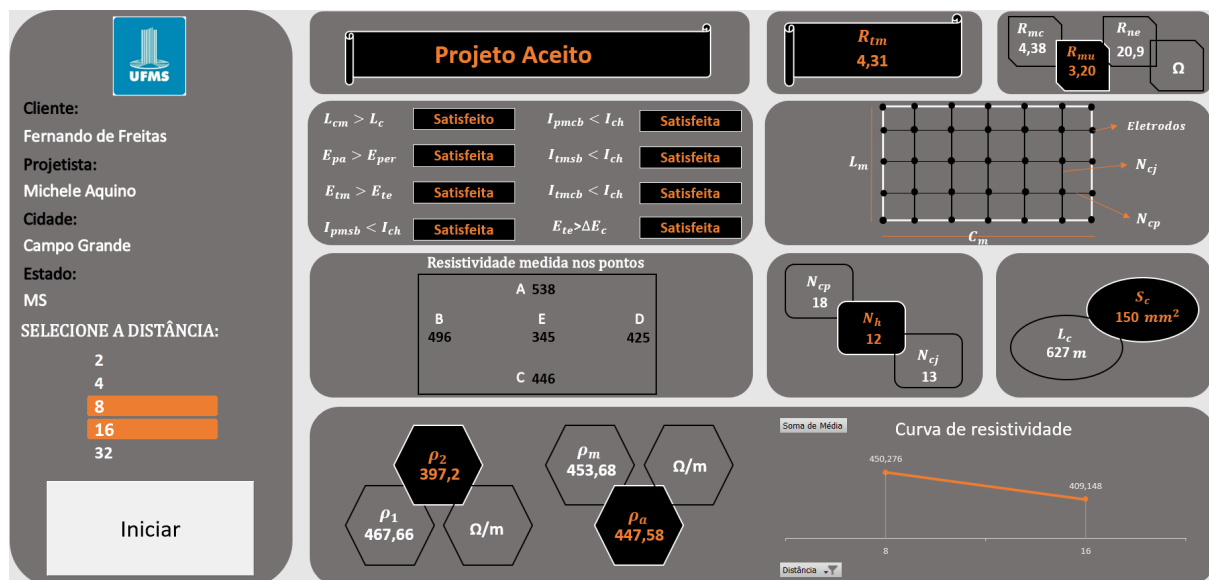
Fonte: autora.

4.1.2. Disposição das informações

Após a finalização da etapa de entrada de dados, as informações prestadas são armazenadas e inicia-se a compilação dos códigos desenvolvidos. À esquerda do *dashboard*, destacam-se as informações do contratante, do projetista e dados básicos da localização geográfica de implementação do sistema.

Abaixo dos dados cadastrais, inseriu-se uma caixa que permite a segmentação de dados. Ao ser selecionada uma distância, a curva de resistividade e as resistividades medidas nos pontos A, B, C, D e E do local variam. Dessa forma, os dados referentes às distâncias selecionadas são apresentados, permitindo interação visual com o usuário. Na Figura 42, é possível verificar a mudança na curva de resistividade e a resistividade medida nos pontos.

Figura 42 - Segmentação de dados.



Fonte: autora.

Na parte superior do *dashboard*, destaca-se a aprovação ou a reprovação do projeto. À direita, evidencia-se a resistência total obtida para a malha de terra. Adiante, a resistência da malha de condutores, a resistência mútua do acoplamento entre eletrodos verticais e horizontais e a resistência dos eletrodos verticais. Abaixo das informações de resistência, às condições de validação do projeto são apresentadas como satisfeitas ou não. Na sequência, abaixo das condições de validação, apresenta-se a geometria do sistema e os valores parametrizados, tais como, número de condutores principais, de condutores de junção, número de hastes, seção do condutor e o comprimento total do condutor. Ao fim do

dashboard, são apresentadas as resistividades de cada camada, a resistividade média e a resistividade aparente.

4.2. Resultados

Inserindo no sistema especialista os parâmetros referente a indústria Kelvin em Fortaleza, conforme mostra a Figura 37, os dados obtidos estão dispostos na Tabela 13.

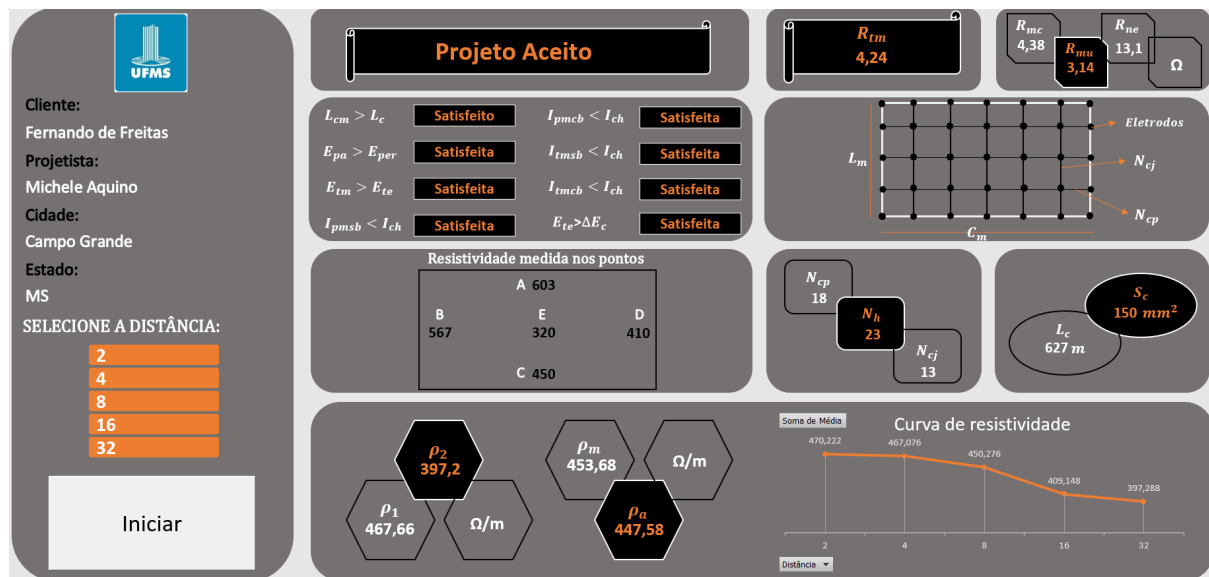
Tabela 13 – Resultado do sistema especialista.

Malha de terra para a subestação da Indústria Kelvin		
Resistência total da malha de aterramento	4,31	Ω
Resistência da malha de condutores	4,38	Ω
Resistência mútua do sistema	3,20	Ω
Resistência dos eletrodos verticais	20,9	Ω
Número de condutores principais	18	-
Número de condutores de junção	13	-
Seção do condutor de aterramento	150	mm ²
Comprimento do condutor de aterramento	627	m
Resistividade da primeira camada	467,66	$\Omega \cdot m$
Resistividade da segunda camada	397,20	$\Omega \cdot m$
Resistividade média	453,68	$\Omega \cdot m$
Resistividade aparente	447,58	$\Omega \cdot m$

Fonte: autora.

Vale destacar que, para ser possível a comparação com o autor, fixou-se o número de eletrodos como 12, conforme ele evidencia no desenvolvimento dos cálculos. Entretanto, a ferramenta desenvolvida trata o número de eletrodos como uma saída, que relaciona a quantidade de condutores principais e de junção. Sem essa parametrização, o sistema projeta 23 eletrodos e obtém como resistência total da malha 4,24 Ω , conforme Figura 43.

Figura 43 - Resultados do sistema especialista.



Fonte: autora.

4.3. Discussões

No desenvolvimento dos cálculos dado por [3], obtém-se os seguintes valores:

Tabela 14 – Resultados da malha de terra.

Malha de terra da subestação da Indústria Kelvin		
Resistência total da malha de aterramento	4,21	Ω
Resistência da malha de condutores	4,30	Ω
Resistência mútua do sistema	3,18	Ω
Resistência dos eletrodos verticais	16,3	Ω
Número de condutores principais	18	-
Número de condutores de junção	13	-
Seção do condutor de aterramento	150	mm ²
Comprimento do condutor de aterramento	627	m
Resistividade da primeira camada	472	$\Omega \cdot m$
Resistividade da segunda camada	395	$\Omega \cdot m$
Resistividade média	452	$\Omega \cdot m$

Malha de terra da subestação da Indústria Kelvin		
Resistividade aparente	445	$\Omega \cdot m$

Fonte: [3].

Os valores apresentaram-se próximos aos encontrados pelo sistema especialista. A diferença existente pode ser explicada, principalmente, porque a ferramenta implementada retira as informações de resistividade da primeira e da segunda camada de um polinômio de quarto grau e [3] retira as informações da curva de resistividade por inspeção visual. Outro ponto importante a se destacar é que o Microsoft Excel ® trabalha com precisão de 15 dígitos em todos os cálculos.

Com base na comparação entre os resultados, constata-se que a ferramenta atua de forma adequada, projetando malhas para solos estratificados em duas camadas. Conclui-se que o sistema especialista apresenta respostas satisfatórias quando comparadas ao projeto de malha de aterramento desenvolvido por [3]. As divergências de valores não foram significativas e são justificadas por algumas variações no procedimento de cálculo.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O projeto de malhas de aterramento para subestações é uma exigência normativa aos consumidores primários. Por se tratar de um projeto trabalhoso, a redução de tempo no seu desenvolvimento é útil aos engenheiros projetistas.

Diante disso, a pesquisa teve como objetivo geral desenvolver um sistema especialista na automatização de projetos de malha de terra. Constata-se que o objetivo geral foi atingido, pois obteve-se êxito no desenvolvimento do sistema especialista que desenvolve projetos de malha de aterramento.

O objetivo específico inicial era de implementar uma ferramenta que pudesse ser utilizada nos casos mais recorrentes, solos que pudessem ser estratificados em duas camadas. O objetivo foi alcançado, o sistema especialista apresentou bom desempenho no projeto de solos estratificados em duas camadas.

Após a etapa inicial de desenvolvimento da ferramenta foi necessário adequá-la às exigências normativas. E esse objetivo também foi atendido, pois implementou-se um sistema especialista que recusa projetos onde a resistência de aterramento está fora dos limites exigidos ou que as condições de validação não sejam atendidas.

O terceiro objetivo específico contava com a implementação deste para a redução no tempo e dificuldade do projeto e isso foi alcançado, pois sem o sistema especialista o projetista deve realizar todos os cálculos inúmeras vezes até obter êxito. Com a ferramenta o usuário altera somente os parâmetros de entrada e todos os cálculos são realizados pelo sistema especialista.

A metodologia empregada contou com a revisão bibliográfica para delimitar o estudo de caso, com a finalidade de aplicar os conhecimentos adquiridos no desenvolvimento de um produto, partindo da aplicação dos métodos matemáticos estudados.

As principais limitações enfrentadas foram de recursos e tempo para submeter a ferramenta a testes em campo, onde poderiam ser realizadas medições para desenvolver um estudo de caso aprofundado. Outra dificuldade enfrentada foi a partir da criação da interface

do sistema especialista, o objetivo inicial era desenvolver no Microsoft PowerBI ®, entretanto a ferramenta não lida com a linguagem de programação *VBA*, sendo necessária a criação de um protocolo para a comunicação entre as duas linguagens.

Recomenda-se que pesquisas como a proposta inicial semelhante parta do desenvolvimento de um sistema especialista que atende casos mais amplos, como por exemplo, solos estratificados em três camadas ou mais. Sugere-se também o desenvolvimento de um sistema especialista implementado como forma de aplicativo para uso em dispositivos móveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABNT, *NBR 15751 - Sistemas de aterramento de subestações*. 2013. [Online]. Disponível em: www.abnt.org.br.
- [2] ABNT, *NBR 14039 - Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kV a 36,2 kV*. 2005, pp. 70–110. [Online]. Disponível em: www.abnt.org.br.
- [3] J. M. Filho, *Instalações elétricas industriais*, 9 ed., vol. 1. Rio de Janeiro, 2017.
- [4] G. Kindermann; J. M. Campagnolo, *Aterramento Elétrico*, 3 ed., vol. 1. Porto Alegre, 1995.
- [5] S. V. Filho, *Aterramentos elétricos conceitos básicos técnicas de medição e instrumentação filosofias de aterramento*, 1 ed., vol. 1. São Paulo, 2002.
- [6] E. Geografia, “Solo na Escola Geografia - USP,” 11 de junho de 2016. Acesso: 18 de outubro de 2021. Disponível em: <http://solonaescolageografiausp.blogspot.com>.
- [7] B. Duarte E Silva *et al.*, “Desenvolvimento de software para elaboração de projetos de aterramento elétrico,” *Engenharias On-line*, pp. 1–10, 17 de agosto de 2015. Acesso: 7 de outubro de 2021. [Online]. Disponível em: <http://revista.fumec.br>.
- [8] L. M. de R. Raggi, “Projeto de malhas de aterramento: contribuição ao cômputo da estratificação do solo”, Belo Horizonte, 2009. Acesso: 27 de agosto de 2021. [Online]. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/BUOS-8CUEJG>.
- [9] ABNT, *NBR 5410 - Instalações elétricas de baixa tensão*. 2004. [Online]. Disponível em: www.abnt.org.br.
- [10] Energisa, *NDU 001 - Norma de Distribuição Unificada*. 2019, pp. 44–77.
- [11] Energisa, *NDU 002 - Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Primária*. 2019.
- [12] H. Creder, *Instalações Elétricas*, 16 ed., vol. 1. Rio de Janeiro, 2016.

- [13] K. P. Sengar; K. Chandrasekaran, “Comparative Analysis of Grounding Grid Configurations with Equal and Unequal Spaced Design,” in *2019 IEEE 1st International Conference on Energy, Systems and Information Processing (ICESIP)*, junho de 2019, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICESIP46348.2019.8938216.
- [14] Microsoft, “Introdução a VBA,” 7 de junho de 2021. Disponível em: <https://docs.microsoft.com>. Acesso: 25 de setembro de 2021.
- [15] Microsoft, “Introdução a Excel,” 15 de junho de 2021. <https://docs.microsoft.com> Acesso: 15 de junho de 2021.