

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
COMPUTAÇÃO

MÉTODO COMPUTACIONAL PARA ELABORAÇÃO DE PROJETOS
ELETROMECAÑICOS DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
COM CONDUTORES DE ALUMÍNIO NU

DENNER MONTEIRO DE CARVALHO

GOIÂNIA

2017

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR
VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES
NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: Dissertação [] Tese

2. Identificação da Tese ou Dissertação:

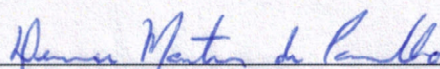
Nome completo do autor: DENNER MONTEIRO DE CARVALHO

Título do trabalho: MÉTODO COMPUTACIONAL PARA ELABORAÇÃO DE PROJETOS ELETROMECÂNICOS DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM CONDUTORES DE ALUMÍNIO NÚCLEO

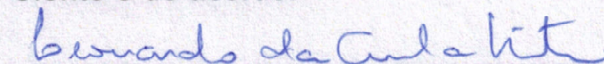
3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento SIM [] NÃO¹

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.


Assinatura do(a) autor(a)²

Ciente e de acordo:


Assinatura do(a) orientador(a)²

Data: 16 / 11 / 17

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

² A assinatura deve ser escaneada.

DENNER MONTEIRO DE CARVALHO

**MÉTODO COMPUTACIONAL PARA ELABORAÇÃO DE PROJETOS
ELETROMECAÂNICOS DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
COM CONDUTORES DE ALUMÍNIO NU**

Dissertação de Mestrado apresentada à Comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação - UFG, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Computação.

Área de Concentração: Engenharia Elétrica
Orientador: Prof. Dr. Leonardo da Cunha Brito.

Goiânia
2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Carvalho, Denner Monteiro de
Método Computacional para Elaboração de Projetos
Eletromecânicos de Redes de Distribuição de Energia Elétrica com
Condutores de Alumínio Nu. [manuscrito] / Denner Monteiro de
Carvalho. - 2017.
84 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo da Cunha Brito.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola
de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Cidade de
Goiás, 2017.

Bibliografia.

Inclui abreviaturas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Redes de Distribuição. 2. Otimização Computacional. 3. Projetos
Eletromecânicos. 4. Heurística. 5. Hill Climbing. I. Brito, Leonardo da
Cunha, orient. II. Título.

CDU 621.3



Ata de Defesa de Dissertação de Mestrado

Ata da sessão de julgamento da Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação, área de concentração Engenharia de Computação, do candidato **Denner Monteiro de Carvalho** realizada em 28 de setembro de 2017.

Aos vinte e oito dias do mês de setembro de dois mil e dezessete, às 14:00 horas, na sala Caryocar Brasiliensis nas dependências da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Universidade Federal de Goiás (UFG), reuniram-se os seguintes membros da Comissão Examinadora designada pela Coordenadoria do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e de Computação: os Doutores Leonardo da Cunha Brito – Orientador (EMC/UFG), Adson Silva Rocha IFGoiano e Geyverson Teixeira de Paula – EMC/UFG, para julgar a Dissertação de Mestrado de **Denner Monteiro de Carvalho**, intitulada “**Método Computacional para Elaboração de Projetos Eletromecânicos de Redes de Distribuição de Energia Elétrica com Condutores de Alumínio Nu**”, apresentada pelo candidato como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre, em conformidade com a regulamentação em vigor. O Professor Doutor Leonardo da Cunha Brito, Presidente da Comissão, abriu a sessão e apresentou o candidato que discorreu sobre seu trabalho, após o que, foi arguido pelos membros da Comissão na seguinte ordem: Prof. Dr. Adson Silva Rocha e Prof. Dr. Geyverson Teixeira de Paula. A parte pública da sessão foi então encerrada e a Comissão Examinadora reuniu-se em sessão reservada para deliberar. A Comissão julgou então que o candidato, tendo demonstrado conhecimento suficiente, capacidade de sistematização e argumentação sobre o tema de sua Dissertação, foi considerado **aprovado** e deve satisfazer as exigências listadas na Folha de Modificação, em anexo a esta Ata, no prazo máximo de 60 dias, ficando o professor orientador responsável por atestar o cumprimento dessas exigências. Os membros da Comissão Examinadora descreveram as justificativas para tal avaliação em suas respectivas Folhas de Avaliação, anexas a esta Ata. Nada mais havendo a tratar, o presidente da Comissão declarou encerrada a sessão. Nos termos do Regulamento Geral dos Cursos de Pós-graduação desta Universidade, a presente Ata foi lavrada, lida e, julgada conforme, segue assinada pelos membros da Comissão supracitados e pelo candidato. Goiânia, 28 de setembro de 2017.

Comissão Examinadora designada:

Leonardo da Cunha Brito
Prof. Dr. Leonardo da Cunha Brito – Orientador (EMC/UFG) (Avaliação: Aprovada)

Adson Silva Rocha
Prof. Dr. Adson Silva Rocha IFGoiano (Avaliação: APROVADO)

Geyverson
Prof. Dr. Geyverson Teixeira de Paula – EMC/UFG (Avaliação: APROVADO)

Prof. Dr. Leonardo R. A. X. de Menezes – UnB (Avaliação: _____)

Prof. Dr. Gélson da Cruz Júnior – EMC/UFG (Avaliação: _____)

Candidato

Denner Monteiro de Carvalho
Denner Monteiro de Carvalho

Dedico este trabalho à minha família, em especial, aos meus pais Ana e Sivaldo e à minha avó Geracina que me proporcionaram o suporte e incentivaram meus estudos. Aos meus amigos que contribuíram para minha formação profissional.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Leonardo da Cunha Brito por ter me recebido e mostrado a direção correta a ser percorrida. Pela amizade, confiança, paciência e disponibilidade durante o desenvolvimento desta pesquisa. E também, ao incentivo à pesquisa científica para contribuição à sociedade.

Aos professores do programa de Pós-Graduação da Escola de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Federal de Goiás que me proporcionaram suporte e conhecimento contribuindo para elaboração desse trabalho;

À equipe do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) ANEEL número 318 pelos conhecimentos e contribuições para desenvolvimento do trabalho;

Aos meus pais, Ana e Sivaldo, a quem devo minha formação e caráter, que sempre incentivaram e apoiaram as minhas conquistas, e por compreenderem minha ausência durante certos momentos para que tudo fosse concretizado;

Registro também meu agradecimento a minha Avó Geracina e meus tios Celso e Luene pelo incentivo constante, suporte e carinho em todos os passos de minha jornada até o presente momento, contribuindo assim mais essa etapa de minha vida.

Por fim, agradeço a todos meus amigos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

"Cada pessoa deve trabalhar para o seu aperfeiçoamento e, ao mesmo tempo, participar da responsabilidade coletiva por toda a humanidade."

(Marie Curie).

“Não é o mais forte que sobrevive, nem o mais inteligente. Quem sobrevive é o mais disposto à mudança”.

(Charles Darwin).

RESUMO

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um método computacional destinado à otimização de processos na elaboração de projetos eletromecânicos de redes de distribuição convencional de energia elétrica. O processo atual de elaboração de projetos de redes de distribuição que possui interferências topográficas é lento e depende de *softwares* com defasagem tecnológica que necessitam de pós processamento dos dados para gerar o projeto final, além de demandar conhecimento técnico específico e demasiado tempo de elaboração. Esse tempo de elaboração, bem como os erros ocorridos na etapa de pós processamento, dificultam o processo de aprovação dos projetos nas concessionárias de energia elétrica, e atrasam a ligação dos consumidores finais.

Para modelagem do processo, são verificados primeiramente as tipologias do terreno onde se deseja definir o caminhamento da rede através de levantamentos dos dados topográficos. Após, são observados os esforços e solicitações mecânicas pontualmente em cada tipo de estrutura eletromecânica, definindo as distâncias mínimas de montagem em observância às normas técnicas relacionadas, e também, variáveis incidentes como a velocidade do vento e variações mecânicas dos condutores durante a operação.

Realizada a modelagem das variáveis de decisão é aplicado um método heurístico recursivo com a aplicação do método de otimização *Hill Climbing*, que varre toda a linha definida pela topografia, realizando as avaliações e cálculos mecânicos com a otimização de critérios técnicos orçamentários, gerando soluções uniformizadas e automatizadas.

O método computacional é desenvolvido em plataforma *Web* com interface amigável e atualizada, podendo ser utilizada através de um navegador qualquer. O *software* além de proporcionar a elaboração do projeto com critérios normativos embutidos, pode ser facilmente utilizada para análise de projetos, proporcionando visualização integrada dos perfis planialtimétricos através *Google Maps*, otimizando o processo de avaliação visual.

Palavras-chave: Redes de Distribuição, Otimização Computacional, Projetos Eletromecânicos, Dimensionamento Mecânico de Estruturas, Heurística, *Hill Climbing*.

ABSTRACT

The present work presents the development of a computational tool for the optimization of processes in the elaboration of electromechanical projects of conventional electricity distribution networks. The current process of elaboration of distribution network projects that has significant topographical interferences is slow and depends on software with a technological lag that requires post processing of the data to generate the final project, besides demanding specific technical knowledge and too much elaboration time. This elaboration time, as well as the errors occurred in the post-processing stage, hinder the approval process of the projects in the electric power concessionaires, and delay the connection of final consumers.

For modeling the process, the typologies of the terrain where the network path is to be determined through surveys of the topographic data are verified first. Afterwards, mechanical forces and stresses are observed in each type of electromechanical structure, defining the minimum mounting distances in compliance with related technical norms, as well as incident variables such as wind speed and mechanical variations of the conductors during the operation.

The modeling of the decision variables is applied a recursive heuristic method with the application of the Hill Climbing optimization method, which sweeps the entire line defined by topography, performing the mechanical evaluations and calculations with the optimization of technical budget criteria, generating uniform solutions and Automated.

The tool obtained is developed in Web platform with friendly interface and updated, and can be used through any browser. The software, besides providing the elaboration of the project with embedded normative criteria, can be easily used for project analysis, providing integrated visualization of the planialtimetric profiles through Google Maps, optimizing the process of visual evaluation.

Key words: Distribution Networks, Computational Optimization, Electromechanical Projects, Mechanical Dimensioning of Structures, Heuristics, Hill Climbing

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1. CARACTERÍSTICAS DE UM LEVANTAMENTO PLANIALTIMÉTRICO	18
FIGURA 2.2. PERFIL ALTIMÉTRICO.....	19
FIGURA 2.3. PIQUETE	20
FIGURA 2.4. ESTAÇÃO E BALIZA.....	21
FIGURA 2.5. ÂNGULO HORIZONTAL.....	22
FIGURA 2.6. CIRCULO AZIMUTAL	22
FIGURA 2.7. A) ÂNGULO HORIZONTAL E ZENITAL B) PLANO VERTICAL - ALTIMETRIA	23
FIGURA 2.8. TIPOS DE ESTRUTURAS PARA REDES DE DISTRIBUIÇÃO CABO NU	26
FIGURA 2.9. TIPOS DE ESTRUTURAS DEVIDO AMARRAÇÕES.....	27
FIGURA 2.10 - TRAÇÃO E FLECHA.....	28
FIGURA 2.11. AFASTAMENTOS MÍNIMOS ENTRE OS CONDUTORES E O SOLO.....	29
FIGURA 2.12. TEMPERATURA MÉDIA [°C].	31
FIGURA 2.13. MÉDIA DAS TEMPERATURAS MÍNIMAS DIÁRIAS [°C].....	32
FIGURA 2.14. TEMPERATURAS MÍNIMAS [°C].....	33
FIGURA 3.1. FACES POSTES DUPLO T.....	36
FIGURA 3.2. DETALHE DE INSTALAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE TANGÊNCIA.....	38
FIGURA 3.3. DETALHE DE INSTALAÇÃO DA ESTRUTURA U3U3.....	39
FIGURA 3.4. METODOLOGIA DE LEVANTAMENTO DE DADOS DAS MONTAGENS N, M E B.....	40
FIGURA 3.5. METODOLOGIA DE LEVANTAMENTO DE DADOS DA ESTRUTURA TE	41
FIGURA 3.6. METODOLOGIA DE LEVANTAMENTO DE DADOS DAS ESTRUTURAS TIPO P - PILAR.....	41
FIGURA 3.7. DETALHE DE INSTALAÇÃO DA ESTRUTURA N1-UD 13,8kV	42
FIGURA 3.8. DETALHE DE INSTALAÇÃO DAS ESTRUTURAS U4-UD E U1-UD 13,8kV	43
FIGURA 3.9. DETALHE DE INSTALAÇÃO DAS CRUZETAS NAS ESTRUTURAS TIPO N, M E B.....	44
FIGURA 3.10. DETALHE DE INSTALAÇÃO DAS ESTRUTURAS TIPO HT E HTE.....	44
FIGURA 3.11. DETALHE DAS ESTRUTURAS DE BAIXA TENSÃO. FONTE: PRÓPRIA AUTORIA.....	45
FIGURA 3.12. DETALHE DA INSTALAÇÃO DE ESTRUTURA COM TRANSFORMADOR.....	46
FIGURA 3.13. MODELAGEM DO POSICIONAMENTO DOS ESTAIS TIPO ÂNCORA.....	48
FIGURA 3.14. SIMULAÇÃO DE UMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO COM VÁRIOS RAMAIS	49
FIGURA 3.15. PSEUDOCÓDIGO MÉTODO HILL CLIMBING	50
FIGURA .-1. TELA INICIAL	55
FIGURA 4.2. TELA DE USUÁRIOS.....	55

FIGURA 4.3. EDITAR USUÁRIOS	56
FIGURA 4.4. TABELAS DE EDIÇÃO E CADASTRO DE PARÂMETROS.....	57
FIGURA 4.5. PRÉ-CONFIGURAÇÕES.....	57
FIGURA 4.6. CADASTRO DE PROJETOS.....	58
FIGURA 4.7. DADOS INICIAIS DO PROJETO.....	59
FIGURA 4.8. CAMINHO DE REFERÊNCIA	60
FIGURA 4.9. TABELA DE ESTACAS DE REFERÊNCIA	61
FIGURA 4.10. VISUALIZAÇÃO DO CADASTRO DA CADERNETA DE CAMPO	62
FIGURA 4.11. CADASTRO DOS PONTOS TOPOGRÁFICOS	63
FIGURA 4.12. CONSOLIDAÇÃO DOS DADOS TOPOGRÁFICOS.....	64
FIGURA 4.13. PRÉ-CONFIGURAÇÕES DE MONTAGENS	65
FIGURA 4.14. TELA DE PROJETO DE MONTAGENS ELETROMECÂNICAS.....	66
FIGURA 4.15. MAPA SATÉLITE DE PROJETO DE MONTAGENS ELETROMECÂNICAS	66
FIGURA 4.16. TELA DE CONFIGURAÇÃO DA AVALIAÇÃO E/OU OTIMIZAÇÃO.....	67
FIGURA 4.17. REDE DE DISTRIBUIÇÃO AVALIADA APENAS COM MONTAGENS OBRIGATÓRIAS	68
FIGURA 4.18. RESULTADO DO PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO.....	69
FIGURA 4.19. RESULTADO COM DISTRIBUIÇÃO UNIFORME DOS VÃOS ENTRE MONTAGENS.	69
FIGURA 4.20. INDICAÇÃO DAS RESTRIÇÕES OCORRIDAS EM UMA AVALIAÇÃO	70
FIGURA 4.21. RESULTADOS DOS CÁLCULOS MECÂNICOS DE UMA ESTURURA.....	70
FIGURA 4.22. RESULTADOS DA LOCAÇÃO SEM RESTRIÇÃO.....	71
FIGURA 4.23. DETALHAMENTO DO RESULTADO FINAL NO PRIMEIRO VÃO DA REDE.....	71
FIGURA 4.24. PERFIS PLANIMÉTRICO E ALTIMÉTRICO DA LINHA PRINCIPAL.....	73
FIGURA 4.25. CADASTRO DE UM RAMAL VINCULADO A UMA REDE.....	74
FIGURA 4.26. CADASTRO DE UMA MONTAGEM VINCULADA A UMA REDE	75
FIGURA 4.27. VISUALIZAÇÃO DO MAPA GERAL DAS REDES E RAMAIS.....	76
FIGURA 4.28. RAMAIS DO PROJETO DO ESTUDO DE CASO	76
FIGURA 4.29. ALGUNS RAMAIS APENAS COM MONTAGENS OBRIGATÓRIAS.....	77
FIGURA 4.30. LINHAS OTIMIZADAS	78
FIGURA 4.31. LOCAÇÃO DA LINHA OTIMIZADA.....	79
FIGURA 4.32. RESULTADOS MECÂNICOS DA MONTAGEM 21 DA LINHA 00.....	80
FIGURA 4.33. RESULTADOS MECÂNICOS DA MONTAGEM 01 DA LINHA 07.....	80

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1. CARACTERÍSTICAS DOS CABOS CONDUTORES DE ALUMÍNIO NU.....	25
TABELA 2.2. TIPOS DE REDE DEVIDO VELOCIDADE DO VENTO.....	34
TABELA 3.1. DADOS DOS POSTES	37
TABELA 3.2. DADOS DOS PESOS E CENTRO DE MASSA DOS TRANSFORMADORES AO POSTE.....	46
TABELA 3.3. CARGA DE RUPTURA ESTAI TIPO ÂNCORA.....	47
TABELA 3.4. CARGAS DE RUPTURA DAS MÃOS FRANCESAS	47
TABELA 3.5. CARGA DE RUPTURA DOS ISOLADORES	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SIRGAS	SISTEMA DE REFERENCIA GEOCÊNTRICO PARA AS AMÉRICAS
IBGE	INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA
ABNT	ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS
GPS	<i>GLOBAL POSITIONING SYSTEM</i>
UTM	<i>UNIVERSAL TRANVERSA DE MERCATOR</i>
WGS	<i>WORLD GEODETIC SYSTEM</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 JUSTIFICATIVA	14
1.2 OBJETIVOS	15
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1 LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO	17
2.1.1 Definição	17
2.1.2 Planimetria.....	17
2.1.3 Altimetria.....	18
2.1.4 Planialtimetria.....	18
2.1.5 Equipamentos Topográficos	19
2.1.6 Ângulos Horizontais e Verticais	21
2.1.7 Coordenadas Geográficas.....	24
2.2 SOLICITAÇÕES MECÂNICAS DE UMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO	24
2.2.1 Características dos Cabos Condutores	25
2.2.2 Estruturas de Sustentação e Isolação.....	26
2.2.3 Tração e Flecha dos Cabos de Alumínio Nu	27
2.2.4 Mudança de Estado do Cabo em Vãos Isolados	29
2.2.5 Carregamentos nos Cabos Condutores.....	30
2.2.6 Efeito da Pressão dos Ventos.....	34
3. MÉTODO COMPUTACIONAL PROPOSTO.....	35
3.1 METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO MECÂNICA DAS ESTRUTURAS E MONTAGENS.....	35
3.2 MÉTODO DE AVALIAÇÃO E OTIMIZAÇÃO.....	48
4. RESULTADOS E APLICAÇÕES.....	55
4.1 APRESENTAÇÃO	55
4.2 SEÇÃO DE CADASTRO DE PROJETOS	57
4.3 SEÇÃO DE CADASTRO DE DADOS TOPOGRÁFICOS	58
4.3.1 Caminho de Referência	60
4.3.2 Levantamento Topográfico.....	61
4.4 ELABORAÇÃO DE PROJETO DE UMA REDE 3#2/0(1/0)CAA 13,8kV.....	65
4.5 ELABORAÇÃO DE PROJETO DE UMA REDE PARA ASSENTAMENTO RURAL	72
5. CONCLUSÕES	81
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83

1. Introdução

A elaboração de projetos de redes de distribuição de energia elétrica é uma das etapas dentro do processo de atendimento de uma ou diversas unidades consumidoras, podendo ser realizado por meio de interesse particular ou pela própria concessionária de energia elétrica responsável. Tipicamente, esses projetos são elaborados manualmente em *softwares* específicos para desenho, exigindo experiência de profissionais qualificados para tal serviço, avaliando as restrições normativas de acordo com sua concepção, podendo cometer erros de elaboração, ou até mesmo não perceber algum critério que tenha ficado ausente. Esses erros, em conjunto com as inconsistências entre as informações e a necessidade de locação ponto a ponto das estruturas de sustentação geram um demasiado tempo de elaboração e aprovação, necessitando de uma grande atuação dos profissionais envolvidos.

Todo projeto eletromecânico de uma rede de distribuição, assim como qualquer linha aérea de transporte de energia tem como finalidade abranger os aspectos técnicos e econômicos de viabilidade. De todas as soluções possíveis, apenas uma ou poucas satisfazem aos requisitos básicos do transporte de energia, ao menor custo, dentro de parâmetros técnicos preestabelecidos, sendo essa solução encontrada por meio de estudos de otimização conforme citado por (LABEGALINI, 1992). Portanto, ao ser encarado como um problema de otimização, mostra-se a necessidade de sua implementação computacional para homogeneizar e buscar soluções ótimas na elaboração de seus projetos.

Para um dimensionamento ótimo ou quase ótimo de uma linha aérea de distribuição de energia elétrica, é necessário verificar as variáveis de características topológicas, elétricas e de solicitações mecânicas da rede. Dentre essas, estão os valores de tensão de operação da linha, quantidade de circuitos, tipos de isoladores utilizados e suas respectivas estruturas, as características dos cabos condutores para estabelecer esforços mecânicos e forças axiais originárias a partir das questões ambientais atuantes (temperatura, vento atmosférico e condições gerais de topografia do solo).

O método proposto nessa dissertação, implementado em plataforma *Web*, desenvolve um processo de dimensionamento mecânico, avaliação e distribuição de estruturas no perfil planialtimétrico por meio de otimizações e soluções heurísticas com o método de *Hill Climbing* e algoritmos recursivos, integrando os critérios descritos nas normas técnicas correlatas e projeção do projeto no perfil lateral em 2 dimensões (distância e altura do ponto marcado) fornecido pelo *Google Maps* para análise topológica comparativa.

1.1 Justificativa

O processo atual de elaboração de projetos mecânicos de redes de distribuição é lento e depende de *softwares* que não possuem processos de otimização computacional e distribuição de estruturas de forma automatizada e padronizada. A avaliação e lançamento das estruturas atuais são feitos ainda de forma manual e intuitiva de acordo com a experiência do profissional responsável, tornando de fundamental importância a automatização do processo de elaboração com a aplicação de uma ferramenta com otimização computacional.

O processo de otimização computacional, por meio das restrições e critérios de avaliação inseridos, permite a uniformização dos projetos e verificações de erros de elaboração, diminuindo a quantidade de análises do projeto pelas concessionárias. Sendo previsto incremento de produtividade, principalmente em redes de distribuição de maior extensão, não necessitando do lançamento pontual das estruturas e avaliação pessoal do projetista

Para redes de distribuição que possuem diversas derivações de ramais no decorrer da linha tronco (configuração tipo árvore), é possível avaliar os esforços mecânicos da montagem de derivação de forma radial com aplicação das forças referentes à linha tronco e também da linha derivada, aplicação não possível em *softwares* atuais, com avaliação individual desses esforços em cada linha.

Elaboração de uma interface amigável em plataforma *web*, permitindo utilização em qualquer navegador de internet, permitindo interação entre os colaboradores internos e externos à concessionária de energia elétrica. Além de, função para análise de topografia com orientação do perfil planialtimétrico através da integração da plataforma do *Google Maps*, possibilitando um pré planejamento de caminhamentos com visualização simultânea do perfil altimétrico e vista aérea. É possível também, fazer análise comparativa dos dados levantados em campo com os dados numéricos fornecidos pela API do *Google Maps*.

Na literatura existente, nacional e internacional, não foram encontrados livros ou artigos científicos que tratam sobre o dimensionamento de mecânico de estruturas de rede de distribuição de energia elétrica aplicando-se métodos de otimização computacional. Em (MONTEIRO, 2005) e (SHU, 2012), é abordado a geração de encaminhamento geográfico para linhas de transmissão de energia elétrica, porém, não é proposto métodos de dimensionamento de estruturas eletromecânicas. Em (KIESSLING, 2003) é indicado métodos de avaliação de catenárias e cálculos de esforços mecânicos aplicados a torres de sustentação de linhas de transmissão de energia elétrica. No entanto, não foram encontrados artigos ou aplicações que

tratem os esforços mecânicos aplicados às estruturas eletromecânicas de redes de distribuição de energia elétrica com disposição em linhas, com otimização computacional.

1.2 Objetivos

O objetivo dessa dissertação é o desenvolvimento de um método para potencializar o processo de elaboração e análise de projetos de redes de distribuição de energia elétrica, propondo soluções de forma otimizada e automatizada, proporcionando avaliação dos esforços e solicitações mecânicas e auxiliando os projetistas tanto dos setores de Engenharia de Média Tensão, quanto aos profissionais externos às concessionárias de energia.

A elaboração desse método, conta com o desenvolvimento de uma ferramenta computacional que proporcionará um incremento significativo de produtividade e redução de custo de investimentos através da redução de mão de obra qualificada, tempo de elaboração dos projetos, e análise dos projetos. Além de, diminuir os equívocos e possíveis divergências com as normas técnicas, uniformizando critérios, permitindo a elaboração de projetos com maior qualidade técnica e menores custos de execução. É previsto também, um incremento de produtividade e qualitativo no levantamento topográfico com a proposta da utilização da plataforma do *Google Maps*, onde será possível realizar análises mais precisas para validação do serviço realizado em campo.

1.3 Estrutura do trabalho

O presente trabalho é realizado em um total de 5 capítulos, abordando o processo de modelagem das variáveis de decisão e levantamento de requisitos através da fundamentação teórica necessária à elaboração do método proposto, juntamente com os resultados obtidos e conclusão do trabalho.

No capítulo 1 são apresentados os objetivos, motivações e justificativas para desenvolvimento deste trabalho.

O capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica e revisão bibliográfica necessária ao entendimento das nomenclaturas, cálculos e processos topográficos e mecânicos para elaboração de projetos de rede de distribuição de energia elétrica.

O capítulo 3 apresenta as modulações necessárias à aplicação do método computacional proposto. São apresentadas as definições para as montagens eletromecânicas necessárias à aplicação dos cálculos de esforço mecânico, além da aplicação do método de otimização computacional *Hill Climbing* em conjunto com regra do 1/5 para otimização de locação interativa de estruturas.

No capítulo 4 é apresentado o produto da metodologia elaborada com interface amigável em plataforma *web*, aplicando-se exemplos práticos na elaboração de projetos de redes de distribuição de energia elétrica com análise dos processos e resultados.

Por fim, o capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2. Fundamentação Teórica

Para o dimensionamento de um projeto de rede de distribuição de energia elétrica é necessário verificar os possíveis caminhamentos *in loco*. Definindo o local de melhores condições do ponto de vista técnico-econômico, são levantadas as informações topográficas do terreno onde se deseja instalar a referida rede, afim de gerar um perfil planialtimétrico para aplicação do projetos e locação das estruturas.

2.1 LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO

2.1.1 Definição

O termo Topografia é derivado da palavra grega *Topos Graphen*, que traduzida para o português significa descrição gráfica de algum lugar. Segundo (COELHO JÚNIOR, 2012), topografia é uma ciência que estuda, projeta, representa, mensura e executa uma parte limitada da superfície terrestre não levando em conta a curvatura da Terra, até onde o erro de esfericidade poderá ser desprezível, sendo limitado por plano de raio com 20 km. Como a maioria dos equipamentos necessitam de visualização ocular e devido à aplicação pontual das estruturas com limites máximos de esticada dos cabos de 1,5 km, não é necessário a precisão de verificação da curvatura do Planeta Terra.

A topografia é subdivida em duas áreas de estudo, a topologia e a topometria. A topologia é definida pelo estudo e modelação teórica; e a topometria é responsável pelo estudo das medições das variáveis em um determinado local, sendo esta última dividida em Planimetria, Altimetria e Planialtimetria.

2.1.2 Planimetria

A planimetria como o nome sugere, é o ramo da topografia responsável pelo estudo do plano, considerando as coordenadas geográficas para gerar uma planta de situação em duas dimensões, podendo ser observados os ângulos azimutal e de deflexões do caminhamento da rede, quando esta vira para a esquerda ou direita com intuito, por exemplo, de desviar de um determinado obstáculo.

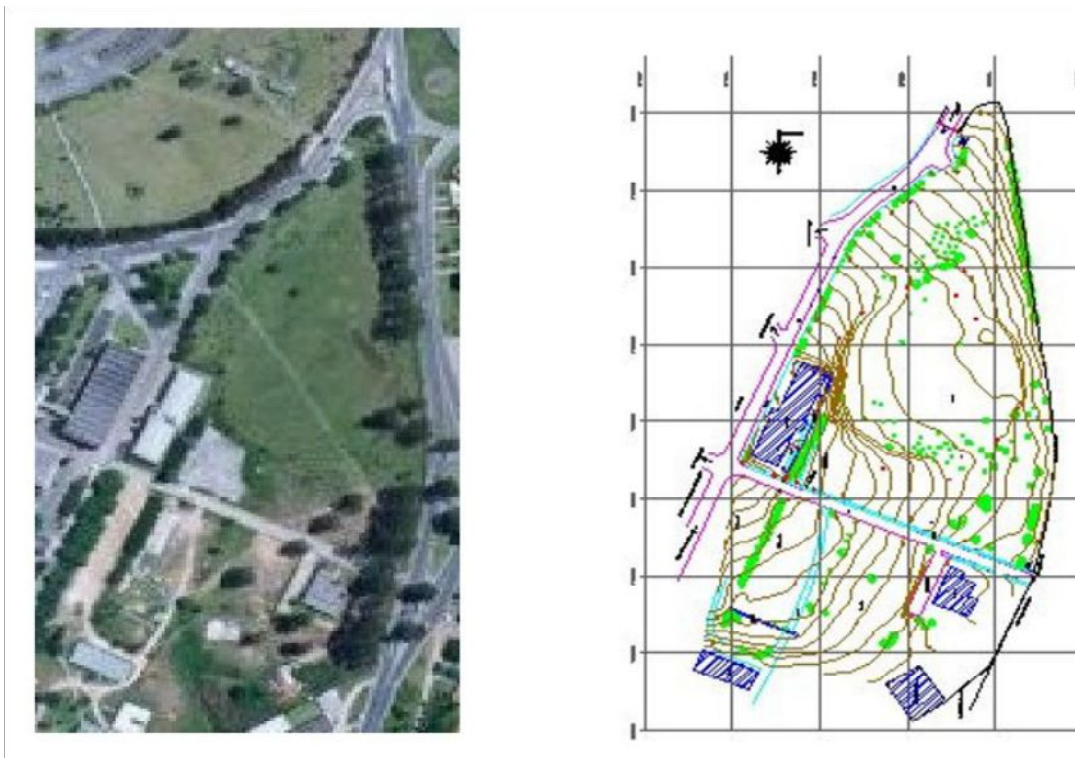
2.1.3 Altimetria

A altimetria por sua vez, estuda as informações de altura do perfil de um terreno de referência, registrando a declividade do local analisado. Esse perfil pode ser obtido por exemplo, por meio de levantamentos de curvas de níveis ou apenas dos valores da abscissa e ângulos verticais de observação nos aparelhos de medição, obtendo-se os dados das cotas de elevação em um determinado percurso no terreno.

2.1.4 Planialtimetria

A planialtimetria é a área da topografia que estuda o perfil do terreno, contemplando as informações planimétricas e altimétricas, sendo o alvo para aplicação de topografias para fins de rede de distribuição de energia elétrica. Na Figura 2.1 pode-se observar as características de um levantamento planialtimétrico com o detalhamento das curvas de níveis, proporcionando a visualização das alturas do terreno em uma área delimitada no plano (x,y).

Figura 2.1. Características de um Levantamento Planialtimétrico. Fonte: KOENIG VEIGA, 2012

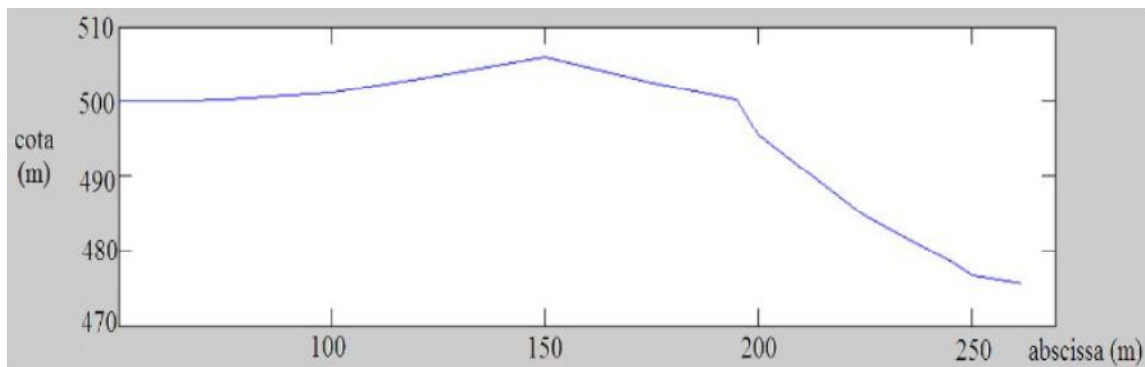


O perfil Altimétrico é um conjunto de dados de extrema relevância para a elaboração de projetos de rede de energia elétrica, pois a partir deste, é possível verificar o

atendimento às alturas mínimas do cabo condutor ao solo. Para entendimento e visualização desse plano, é necessário a observação do perfil planialtimétricos com os eixos coordenados x , y e z , sendo o conjunto (x,y) necessário para obter a distância entre os pontos topográficos e z para a altura do ponto.

Em análises altimétricas a distância entre os pontos topográficos é chamada de Abscissa, representada em um plano coordenado (x',y') pela componente x' ; e a altura de um ponto representada pela componente y' . A altura de um ponto é definida por ser a medida do comprimento perpendicular ao perfil planialtimétricos horizontal, chamado também de superfície de nível de referência. Em levantamentos topográficos as alturas desses pontos recebem a denominação técnica de Cotas ou Alturas Relativas. Um perfil altimétrico é ilustrado na Figura 2.2 a seguir:

Figura 2.2. Perfil Altimétrico. Fonte: próprio autor



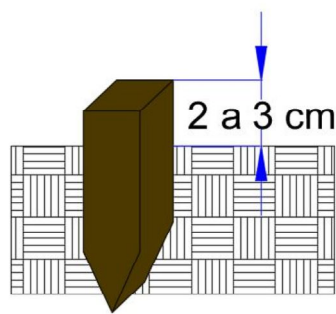
2.1.5 Equipamentos Topográficos

O processo de levantamento topográfico é realizado *in loco* com auxílio de equipamentos e acessórios, obtendo-se as principais características, que são descritas manualmente em uma caderneta de campo, ou gravadas em mídia digital através de equipamentos de medição topográfica eletrônica. Nesse momento são levantados dados tais como as coordenadas de localização dos pontos de início e fim da rede, bem como encaminhamento, ângulos de deflexões no meio da rede, obstáculos, características do solo, velocidade média do vento no local e dados da rede existente onde origina a fonte de energia elétrica dessa nova rede. Para este levantamento e marcação do serviço em campo são necessários alguns equipamentos, fundamentais para entendimento dos dados a serem processados e aplicados aos projetos de rede de energia elétrica (estacas, piquetes, trena métrica,

baliza e Estação total ou Teodolito. Para marcação dos pontos topográficos em um levantamento topográfico deve ser informado a posição dos três eixos coordenados x , y e z . Aplicado a redes de distribuição de energia elétrica, o plano (x,y) definem o encaminhamento da rede, e o eixo z define a altura do terreno onde a rede percorre.

Os piquetes são pontaletes feitos de madeira, em geral, com dimensões de 3 x 3 x 15 cm, que servem como referência de acordo com a necessidade de marcar um determinado ponto geográfico. Um exemplo de piquete é mostrado na Figura 2.3 a seguir:

Figura 2.3. Piquete. Fonte: Adaptado de COELHO JÚNIOR, 2014



As estacas por sua vez, também feitas de madeira, possuindo comprimento de 40 a 50 cm. Nos levantamentos destinados à aplicação em redes de distribuição, os estaqueamentos são marcados com piquetes e os pontos de mudança de estação são demarcados com as estacas, no entanto, as anotações desses pontos topográficos são nomeadas de estacas, realizando assim, o levantamento dos dados do estaqueamento para gerar o perfil planialtimétrico do projeto.

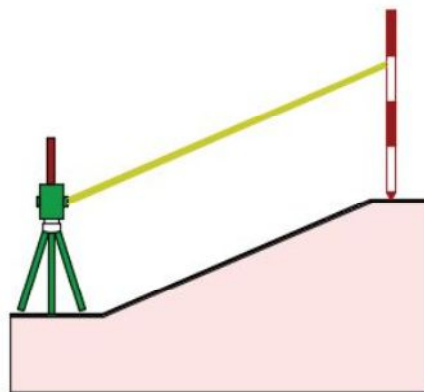
Os pontos topográficos são geralmente levantados com 50 metros entre si, podendo ser menor para locais onde se necessita uma melhor precisão ou para identificar obstáculos encaminhamento planejado. Portanto, a cada 50 metros de extensão é somado uma unidade de estaca medida, sendo o valor da extensão igual ao valor inteiro da divisão por 50 mais o resto da divisão multiplicado por 50. (Exemplo: Extensão de 173 metros = 3 estacas + 23 metros).

Os equipamentos de medição podem realizar as medições de forma manual ou eletrônica. O equipamento utilizado para medições manuais, onde o profissional de topografia dever anotar manualmente os dados em uma caderneta de campo, é chamado de Teodolito. O Teodolito realiza as medições das posições das estacas com verificação do ângulo vertical para cálculo da altimetria e ângulos horizontais para cálculo da planimetria do local. Já os equipamentos eletrônicos podem armazenar esses dados com precisão milimétrica em uma mídia, para serem utilizados em *softwares* específicos, sendo chamados de Teodolitos

Eletrônicos ou mais comumente de Estação Total. Há outros equipamentos que não necessitam de visar os pontos analisados, utilizando apenas a orientação geográfica por satélite, operando como um GPS, precisando todos os dados planialtimétricos necessários à elaboração dos projetos de redes de distribuição de energia elétrica.

Para utilização desses aparelhos de medição é necessário também um equipamento que possa servir de referência para visualização de pontos topográficos, ou seja, onde serão aplicados os piquetes e estacas da rede com auxílio de uma trena métrica para avaliação dos ângulos necessários à construção do perfil planialtimétrico. A utilização de uma baliza e um equipamento de medição podem ser observados na Figura 2.4.

Figura 2.4. Estação e Baliza. Fonte: Adaptado de COELHO JÚNIOR, 2014



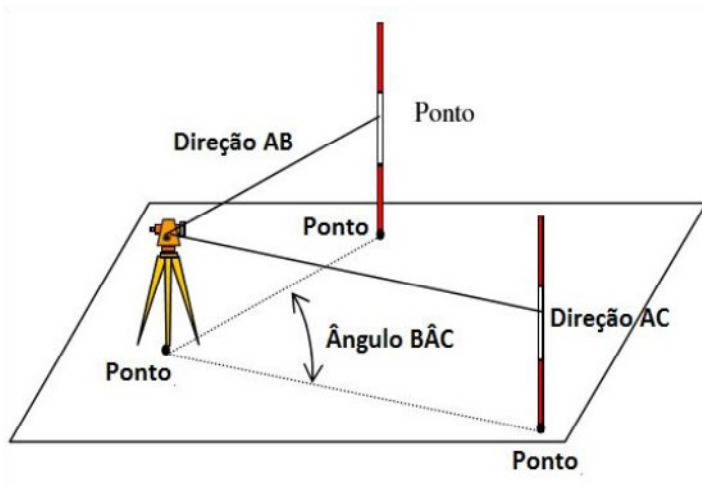
2.1.6 Ângulos Horizontais e Verticais

O Levantamento Topográfico do perfil planialtimétrico utiliza como princípios básicos a Geometria e Trigonometria para estudo e cálculos das informações para obter os pontos topográficos, por este motivo é necessário avaliar e levantar os diversos ângulos e distâncias pertinentes.

Os ângulos horizontais formam as direções do levantamento topográfico e são obtidos através de 2 pontos visados a partir de um ponto de estação, avaliando-se o ângulo no sentido horário até o segundo ponto visado, que pode ser observado na Figura 2.5. Conforme (KOEING VEIGA, 2014), esse ângulo é medido sempre na horizontal, razão pela qual o teodolito deve estar devidamente nivelado. Em redes de distribuição esse ângulo é responsável

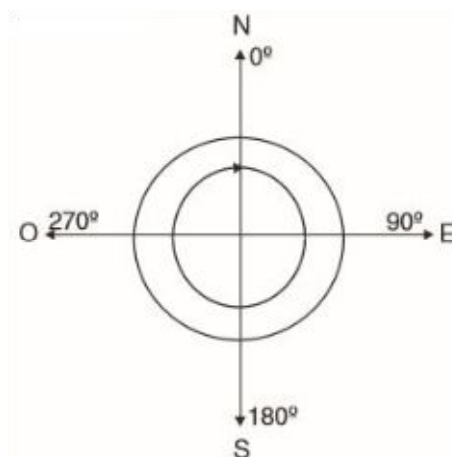
pelas deflexões necessárias para desviar dos obstáculos e percorrer um caminho com melhores condições técnico-financeiras. Em toda mudança de ponto de estação é necessário obter o ângulo horizontal, isso ocorre em pontos de deflexão da rede ou em pontos sem deflexão onde os pontos visados ficam distantes prejudicando a precisão do levantamento, que nesta ocasião, possuirá ângulo horizontal de 180° .

Figura 2.5. Ângulo Horizontal. Fonte: Adaptado de KOENIG VEIGA, 2012



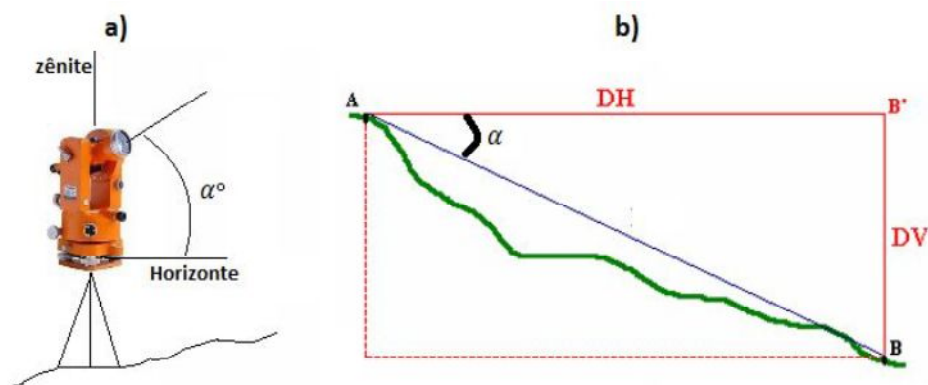
Como as redes de distribuição de energia elétrica possuem uma localização física de projeto, esta deve ser georeferenciada e utilizada como referência para os ângulos horizontais, o ângulo azimutal. O azimute é o ângulo horizontal orientado pelo norte verdadeiro ou magnético, dependendo da aplicação, sendo mais comum utilizar o verdadeiro variando de 0° a 360° conforme ilustra a Figura 2.6. No caminhamento da rede de distribuição a cada ângulo de deflexão, ou seja, a cada ocorrência de um ângulo horizontal diferente de 180° é alterado proporcionalmente o ângulo azimutal da rede, gerando o traçado final.

Figura 2.6. Circulo Azimutal. Fonte: Adaptado de KOENIG VEIGA, 2012



Os ângulos verticais, por sua vez, são responsáveis pela demonstração do perfil altimétrico, indicando a altura em cada ponto topográfico, indicando um declive ou alicive do terreno. Esses ângulos são obtidos pela observação de um ponto topográfico através de um aparelho de medição com relação ao ângulo zenital, ou seja, ângulo perpendicular ao plano horizontal do planeta Terra. Na Figura 2.7.a pode ser observado o ângulo zenital “Z” e o ângulo vertical “ α ”.

Figura 2.7. a) Ângulo Horizontal e Zenital b) Plano Vertical - Altimetria. Fonte: Adaptado de GARCIA, 1984



Os ângulos verticais observados fornecem o valor da cota altimétrica por meio de uma simples relação trigonométrica do triângulo retângulo. Na Figura 2.7.b, pode-se verificar que, a partir da distância horizontal entre os pontos topográficos DH e com o ângulo vertical α , é possível obter a diferença da distância vertical da cota altimétrica DV do ponto A para o ponto B através da equação (1), podendo assim, traçar um plano altimétrico do terreno analisado.

$$DV = \frac{tg \alpha}{DH} \quad (1)$$

No decorrer de um caminhamento planejado de uma rede de distribuição de energia elétrica são instalados os teodolitos ou estações totais em pontos fixos denominados pontos de estação. Depois são visados os pontos geográficos, anotando-se os ângulos verticais observados para cálculo das cotas altimétricas para gerar o perfil lateral do terreno. Quando ocorre uma deflexão, é necessária a alteração do ponto de estação para aquele local para definir as cotas dos novos pontos do novo sentido da rede. Nessa hora também é verificado o valor do ângulo horizontal entre os diferentes sentidos da deflexão ocorrida. É necessário também, mudar o ponto de estação quando a visão do aparelho começa a gerar imprecisão muito alta ou incapacidade de medição, além de verificar pontos com condições de relevos com vales e picos, obstáculos e possíveis interferências como cercas de arame que devem ser aterradas devido à

passagem da rede, e/ou cruzamentos com redes e linhas de transmissão de outras tensões, necessários à avaliação das alturas mínimas permitidas.

2.1.7 Coordenadas Geográficas

Outra informação de suma relevância em uma identificação de uma rede de distribuição de energia elétrica é a sua localização geográfica, bem como a situação de todos os pontos relevantes no decorrer de seu caminamento. De acordo com (IBGE, 2017), o sistema de coordenadas utilizado no Brasil desde 25 de fevereiro de 2015 é o SIRGAS2000, sendo o único sistema geodésico de referência oficialmente adotado.

Devido à necessidade de análise dos serviços de topografia tanto para validação do projetista quanto dos analistas dos projetos nas concessionárias de energia elétrica, optou-se por desenvolver a metodologia proposta em plataforma *web*, utilizando os mapas disponíveis na *API JavaScript* do *Google Maps* para melhor visualização e comparação planialtimétrica. Em (GOOGLE, 2017) é informado que o sistema padrão de coordenadas utilizado pela *API* é o WGS84, mostrando valores de latitude e longitude no formato graus decimais. Porém, nos serviços de topografia para fins de rede de distribuição de energia elétrica é comumente utilizado o formato UTM, sendo assim, foi utilizado um algoritmo de conversão disponível em (MATHWORKS, 2017) para favorecer a aplicação direta dos dados de campo.

2.2 SOLICITAÇÕES MECÂNICAS DE UMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO

Após definido o perfil planialtimétrico de uma rede de distribuição de energia elétrica, é iniciada a elaboração do projeto eletromecânico. Na elaboração do projeto de rede de distribuição é necessária a aplicação de cálculos mecânicos nos diversos tipos de montagens, a fim de se verificar as solicitações mecânicas devido às influências das variações de temperatura nos condutores, velocidade do vento incidente nas estruturas em função dos dados topográficos como ângulos de deflexão, distância dos vãos entre postes, juntamente com análise das distâncias elétricas mínimas de segurança. Neste momento, com posse de informações técnicas da rede como tensão de operação e da demanda de carga do consumidor a ser atendido, é possível determinar a bitola dos cabos utilizados e iniciar as análises das solicitações mecânicas.

2.2.1 Características dos Cabos Condutores

Nas redes tipo convencionais de energia elétrica são utilizados condutores de alumínio nu, com ou sem alma de aço de acordo com sua aplicação. Os cabos de alumínio nu com alma de aço, denominados CAA, são comumente utilizados em áreas rurais e de pouca concentração populacional, objetivando diminuir o custo de instalação da rede com a utilização de maiores vãos entre postes, já que seu coeficiente de ruptura é bem superior aos cabos sem alma de aço, que por sua vez são chamados de condutores CA.

A nomenclatura utilizada nos condutores de alumínio nu, é determinada pela quantidade de fases, bitola do condutor fase e bitola do condutor neutro. Por exemplo, uma rede de distribuição trifásica com condutores 2/0 CAA para fases e cabo 1/0 CAA para o neutro, é denominada uma rede 3#2/0(1/0) CAA.

Na Tabela 2.1, obtida através dos dados presentes nas normas (NBR 7270,2009), (NBR 7271, 2009) e (NBR 7272, 2014), são descritos alguns dos parâmetros necessários à aplicação dos cálculos mecânicos exigidos para elaboração de um projeto de uma rede de distribuição.

Tabela 2.1. Características dos Cabos Condutores de Alumínio Nu. Própria Autoria

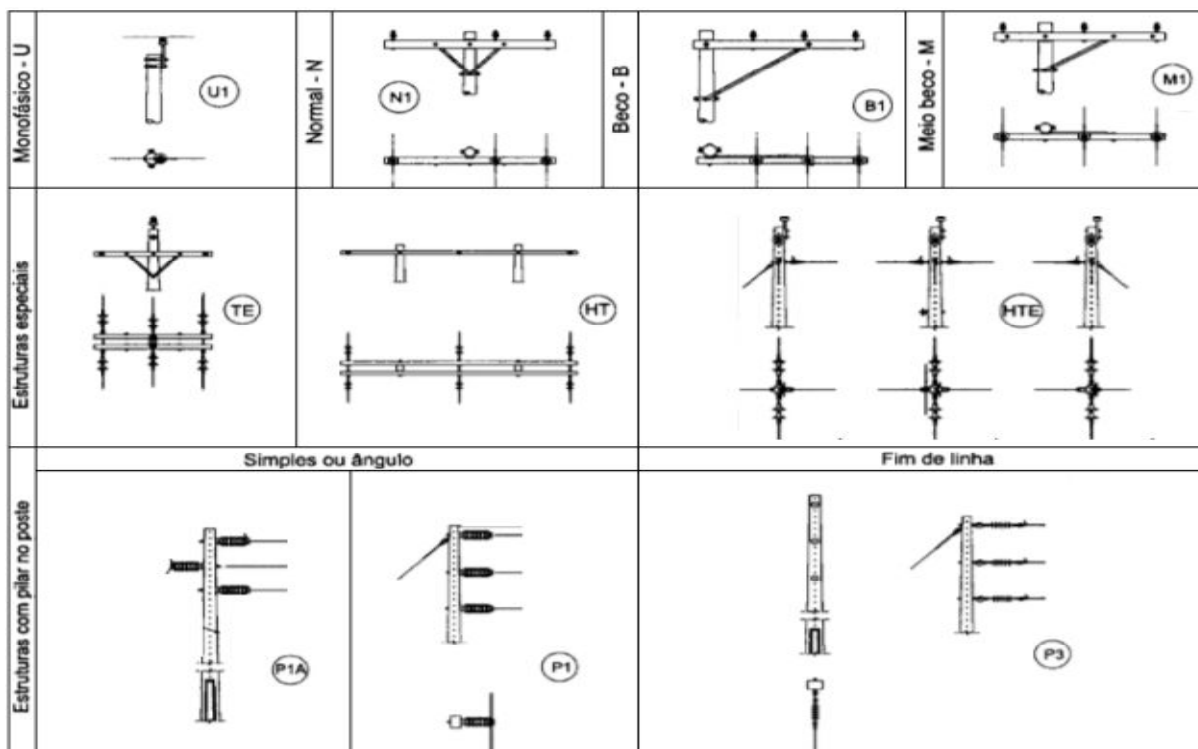
	Código	Seção (AWG/MCM)	Seção Transversal (mm ²)		Diâmetro dos Fios (mm)		Diâmetro Externo do Cabo (mm)	Massa Nominal (kg/km)	RMC (daN)	Rcc a 20°C (Ω/km)	Capacidade de Condução de Corrente (A)	Coeficiente de Dilatação Linear 1°C		Elasticidade kgf/mm ²			Conversão PESQ/KM (kg/km)
			AÇO	AL	AÇO	AL						Inicial	Final	Inicial Inferior	Inicial Superior	Final	
CABOS CA	Rose	4	0,00	21,12	0,00	1,96	5,88	58,2	3,31	1,3606	138	0	0,000023	4711	3586	6117	58,30
	Iris	2	0,00	33,54	0,00	2,47	7,41	92,5	5,99	0,8567	185	0	0,000023	4711	3586	6117	92,80
	Poppy	10	0,00	53,52	0,00	3,12	9,36	147,6	8,84	0,5369	245	0	0,000023	4711	3586	6117	147,50
	Aster	20	0,00	67,35	0,00	3,5	10,5	185,7	11,12	0,4267	286	0	0,000023	4711	3586	6117	186,00
	Orlip	40	0,00	107,41	0,00	4,42	13,26	296,1	17,01	0,2675	380	0	0,000023	4711	3586	6117	295,70
	Daisy	266,8	0,00	135,25	0,00	4,96	14,88	372,9	21,42	0,2125	443	0	0,000023	4711	3586	6117	373,10
	Tulip	336,4	0,00	170,48	0,00	3,38	16,9	470	27,27	0,1686	510	0	0,000023	4711	3586	6117	470,30
CABOS CAA	Swan	4	3,53	21,18	2,12	2,12	6,36	85,6	830	1,3545	140	0,000018	0,0000191	6890	4640	8156	85,40
	Sparrow	2	5,6	33,59	2,67	2,67	8,01	135,8	1265	0,8541	185	0,000018	0,0000191	6890	4640	8156	135,90
	Raven	10	8,92	53,52	3,37	3,37	10,11	216,2	1946	0,536	240	0,000018	0,0000191	6890	4640	8156	216,30
	Quail	20	11,22	67,33	3,78	3,78	11,34	272	2353	0,4261	275	0,000018	0,0000191	6890	4640	8156	272,30
	Penguin	40	17,87	107,22	4,77	4,77	14,31	433,2	3706	0,2676	365	0,000018	0,0000191	6890	4640	8156	433,20
	Partridge	266,8	21,99	134,87	2	2,57	16,28	545,5	5011	0,2148	455	0,0000184	0,0000189	6539	4781	7593	546,70
	Linnet	336,4	27,83	170,55	2,25	2,89	18,31	689,9	6231	0,1699	530	0,0000184	0,0000189	6539	4781	7593	688,30

2.2.2 Estruturas de Sustentação e Isolação

Nas estruturas de sustentação e isolação é necessário verificar diversas solicitações mecânicas que ocorrem na montagem das estruturas, sendo imprescindível a avaliação das distâncias elétricas mínimas, e das cargas de ruptura dos suportes dos equipamentos da mesma. De acordo com a (RTD 23, 1980) para cálculo mecânico das estruturas, deverão ser consideradas as trações e flechas finais à 50°C dos condutores, ação do vento, peso e resistência das montagens e resistência do solo, do poste. Os cálculos relativos às forças aplicadas e momentos resultantes nas montagens poste e estruturas são obtidos por meio das teorias e metodologias extraídas de (WILLIAMS, 2009).

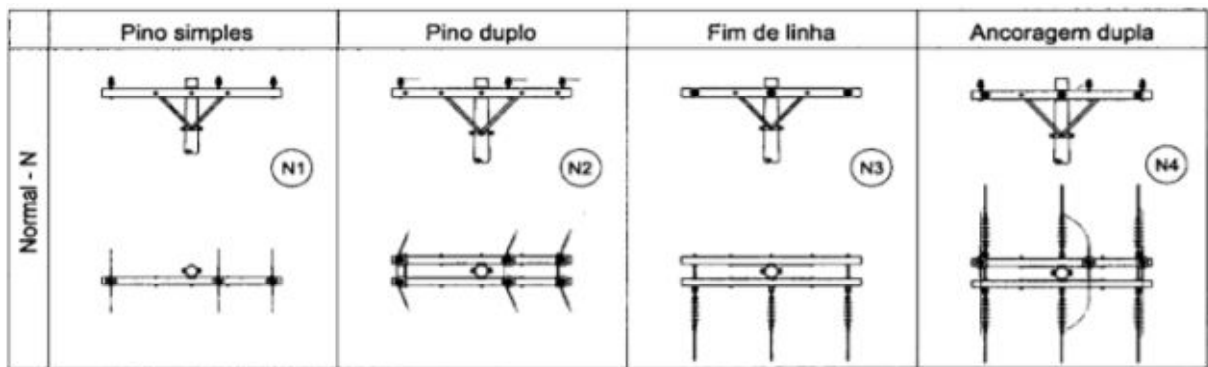
É possível verificar as distâncias elétricas de montagem dos isoladores e estruturas de isolação das estruturas primárias com base na NBR 15688 2009, que são subdivididas em tipo U para redes monofásicas, tipo N para redes trifásicas normais, tipo M para estruturas em Meio-Beco, tipo B para estruturas em beco, tipo P para redes com isolador Pilar, além das estruturas especiais tipo TE para redes trifásicas ancoradas, tipo HT com a aplicação de 2 postes e tipo HTE com aplicação de 3 postes em sua montagem. Na Figura 2.8 são mostrados alguns tipos de estruturas desses subgrupos.

Figura 2.8. Tipos de Estruturas Para Redes de Distribuição Cabo Nu. Fonte: Adaptado de NBR 15688, 2009.



Essas estruturas, por sua vez, são divididas de acordo com sua aplicação mecânica, podendo ser: em estruturas de tangência onde o cabo condutor é amarrado em pinos isoladores simples ou duplos; e em estruturas de ancoragem, onde o cabo é encabeçado na estrutura a fim de permitir o tracionamento do mesmo, sendo aplicados em fim de linha ou com ancoragem dupla no meio da rede conforme ilustrado na Figura 2.9. As estruturas são nomeadas de acordo com a Figura 2.8 alterando os números finais de acordo com a aplicação, sendo o número 1 denominado “Pino Simples”, 2 “Pino Duplo”, 3 “Fim de Linha” e 4 “Ancoragem Dupla”.

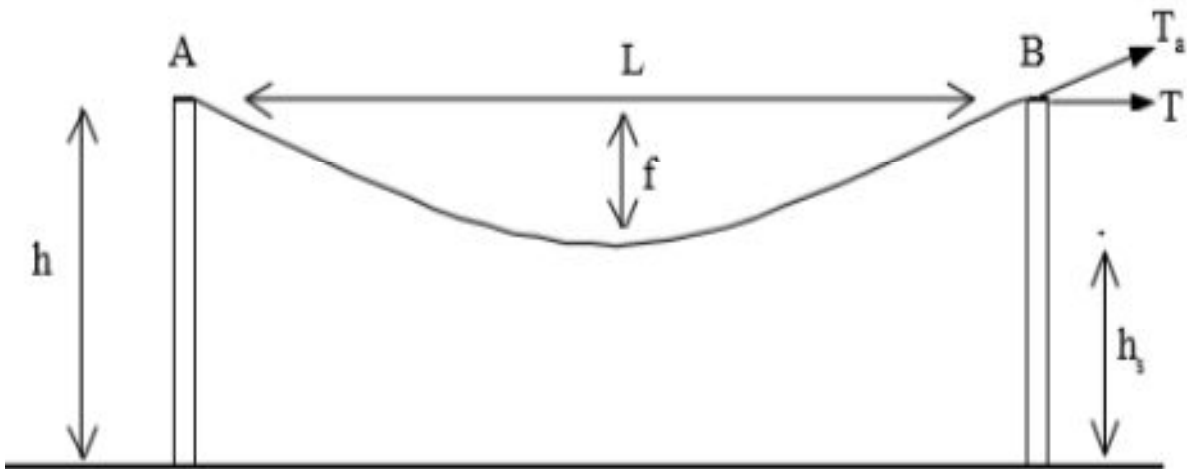
Figura 2.9. Tipos de Estruturas Devido Amarrações. Fonte: Adaptado de NBR 15688, 2009.



2.2.3 Tração e Flecha dos Cabos de Alumínio Nu

A flecha de um cabo condutor pode ser definida pela distância entre uma linha horizontal imaginária e a flexão do cabo condutor devido à tração exercida pelo peso do mesmo, quando este, for fixado por 2 pontos A e B distantes no eixo horizontal a uma distância L , como pode ser observado na Figura 2.10 a seguir:

Figura 2.10 - Tração e Flecha. Fonte: Adaptado de NBR 15688, 2009.



Ainda na Figura 2.10, pode-se verificar a existência de forças axiais geradas pelo peso do condutor, bem como, suas componentes horizontal e vertical. Além das alturas dos pontos de apoio e distâncias do condutor ao solo, de modo a não violar às distâncias mínimas da Figura 2.11, devido ao tamanho da flecha. Segundo (LABEGALINI, 1992), a Flecha do condutor pode ser calculada por meio da equação:

$$f = \frac{L^2 \cdot p}{8 \cdot T} \quad (2)$$

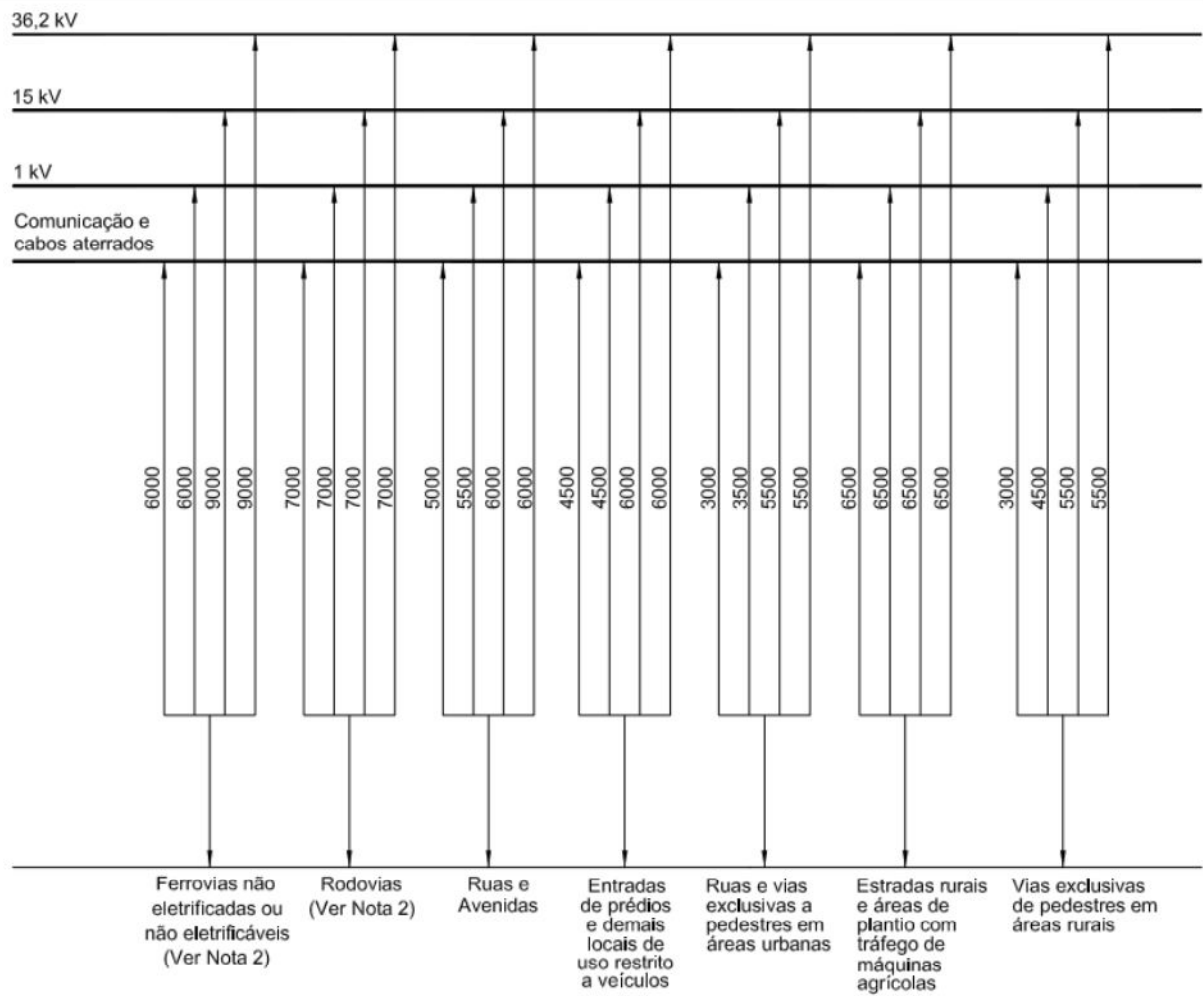
Sendo:

L – Distância horizontal entre os pontos de apoio dos condutores [m];

p – Peso unitário do condutor [N/m];

T – Componente horizontal da força axial exercida pelo cabo condutor [N];

Figura 2.11. Afastamentos Mínimos Entre os Condutores e o Solo. Fonte: Adaptado de NBR 15688, 2009.



2.2.4 Mudança de Estado do Cabo em Vãos Isolados

Apesar da representação descrita em (2) e sua aproximação para determinação hiperbólica das flechas ser bastante aceitável, há diversas imprecisões no desenho das catenárias com relação à execução da rede de distribuição, como as variações de temperatura devido às variações de carregamento dos condutores, perdas e ganhos por processos físicos de convecção, irradiação e condução, além de, variações mecânicas devido à influência da velocidade do vento. Considerando o exposto, são realizados nos cálculos mecânicos uma variação de condições, chamada de mudança de estado, onde em vãos entre postes nivelados e ancorados, são variados os valores de temperatura de operação dos cabos juntamente com a velocidade do vento de um estado inicial para um estado final, obtendo assim a variação de tração aceitável

no cabo com maior precisão. De acordo com (LABEGALINI, 1992) essa equação de mudança de estado pode ser resumida a:

$$T_2^3 + T_2^2 \left\{ \frac{E \cdot S \cdot p_1^2 \cdot L^2}{24 \cdot T_1^2} + E \cdot S \cdot \alpha_{dt} \cdot \left(t_2 - t_1 + \frac{\delta_p}{\alpha_{dt}} + \frac{\varepsilon_T}{\alpha_{dt}} \right) - T_1 \right\} - \frac{E \cdot S \cdot p_2^2 \cdot L^2}{24} = 0 \quad (3)$$

Sendo:

T_1 e T_2 – Trações no cabo nos estados 1 e 2 [daN];

T_1 e T_2 – Temperatura superficial do cabo nos estados 1 e 2 [°C];

α_{dt} – Coeficiente de dilatação térmica linear [1/°C];

E – Módulo de Elasticidade [daN/m²];

δ_p – Parcela do alongamento relativo à variação do módulo de elasticidade [m/m];

ε_T – Parcela do alongamento relativo ao efeito de fluência (*creep*) [m/m];

S – Área de seção transversal do cabo [m²].

p_1 e p_2 – Peso unitário resultante do cabo nos estados 1 e 2 [N/m];

2.2.5 Carregamentos nos Cabos Condutores

Segundo a normativa (NBR 5422, 1985) é necessário estabelecer limites de carregamento nos condutores para evitar a fadiga e desgaste dos cabos condutores. Segundo (CEPEL, 2001), devido às experiências anteriores na elaboração de projetos de redes de distribuição de energia elétrica são consideradas as condições de carregamento estipuladas são:

- Condição de Maior Duração:

É aplicada a maior temperatura média anual da região e, portanto, deverá ser uma variável editável. Para obtenção da temperatura de maior duração, foi utilizado como base a Figura 2.12.

Figura 2.12. Temperatura Média [°C]. Fonte: NBR 5422, 1985.



Além de determinar as trações nos cabos como sendo:

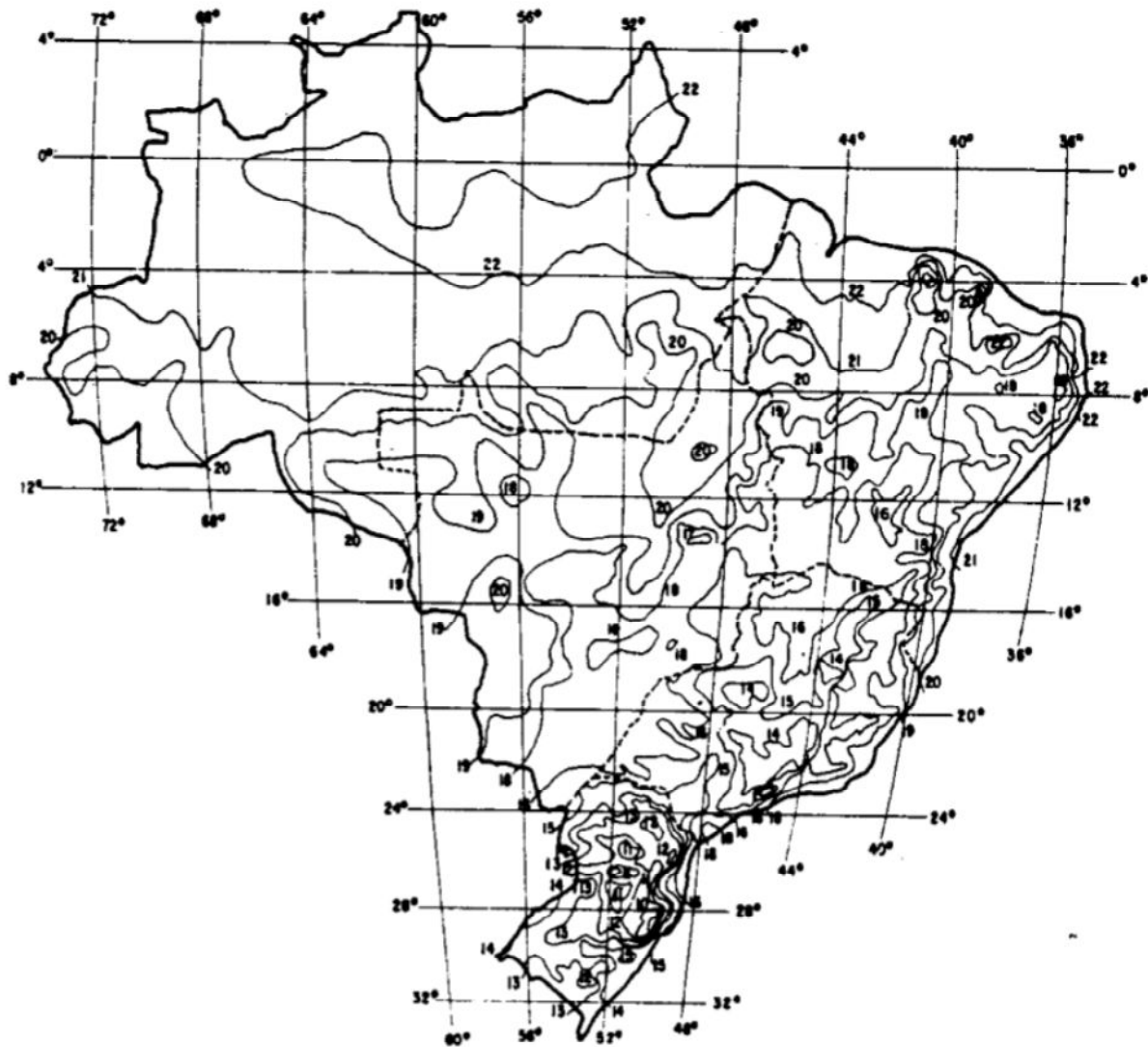
Cabos CAA: $T < 0,20 \cdot T_{rupt}$ [daN];

Cabos CA: $T < 0,21 \cdot T_{rupt}$ [daN].

- Condição de Máximo Carregamento

Nessa condição, submete-se a rede de distribuição em uma situação de intensidade de vento máxima à temperatura coincidente, ou seja, a temperatura com ocorrência mais provável que pode ser obtida na Figura 2.13. Para essa condição aplica-se em todos os cabos uma tração menor que 50% da tração de ruptura dos mesmos.

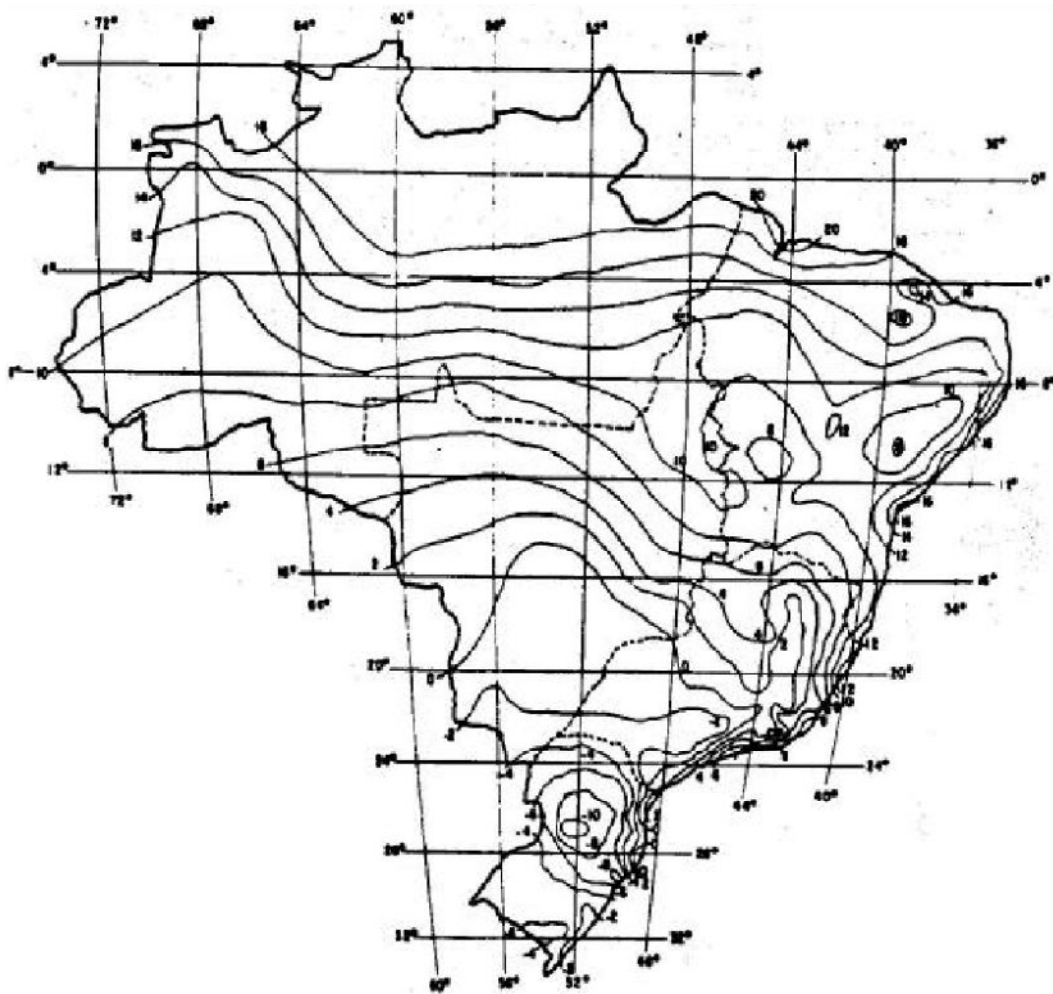
Figura 2.13. Média das Temperaturas Mínimas Diárias [°C]. Fonte: NBR 5422, 1985.



- Condição de Flecha Mínima:

É submetida a menor temperatura provável nos cálculos mecânicos da rede de distribuição. São utilizados valores médios abaixo de 10°C conforme referência da Figura 2.14. Para essa condição, deverá ser aplicada em todos os cabos uma tração menor que 33% da tração de ruptura dos mesmos.

Figura 2.14. Temperaturas Mínimas [°C]. Fonte: NBR 5422, 1985.



- Condição de Flecha Máxima:

Para a condição de Flecha Máxima é aplicada a maior temperatura nos cabos condutores a fim de se maximizar a dilatação no condutor e, conseqüentemente, aumentar a flecha do cabo, determinada pela equação a seguir:

$$t = t_{Máx} + t_{Efterm} \quad (4)$$

Sendo:

$t_{Máx}$ – Temperatura máxima nos cabos [°C];

t_{Efterm} – Temperatura devido ao efeito térmico das correntes elétrica [°C];

2.2.6 Efeito da Pressão dos Ventos

O efeito exercido pela incidência dos ventos nas estruturas e montagens é de grande relevância no cálculo das solicitações mecânicas, podendo esse, ser crítico ao ponto de definir a exequibilidade de uma rede de distribuição de energia elétrica. Esse efeito possui amplificação quando se trata de redes rurais por não possuir a proteção física de edificações, permitindo que o vento chegue a velocidades superiores incidam diretamente na rede de distribuição. Essa incidência, gera uma movimentação nos condutores, gerando esforços adicionais nas estruturas, necessitando da aplicação de estaiamentos ou postes com maiores resistências de engastamento, para suportar a influência desses esforços. A atuação do vento em superfícies cilíndricas e planas descrito em (CEPEL, 2001) é dada por (5) e (6) a seguir.

A pressão do vento dinâmica de referência q_0 é dada por:

$$q_0 = 0,05 \cdot \rho \cdot v_p^2 \text{ [daN/m}^2\text{]} \quad (5)$$

Sendo ρ a massa específica do ar dada pela equação:

$$\rho = \frac{1,293}{1 + 0,00367 \cdot t_c} \cdot \left(\frac{16000 + 64 \cdot t_c - Alt}{16000 + 64 \cdot t_c + Alt} \right) \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (6)$$

Sendo:

t_c – Temperatura coincidente – Média das temperaturas mínimas diárias [°C];

v_p – Velocidade de vento de projeto [m/s];

Alt – Altitude média da região de implantação da rede de distribuição [m].

A velocidade do vento em diversos documentos técnicos, com intuito de padronizar e limitar as variações de valores, é denominada por redes leve, média e pesada. Para o desenvolvimento deste método computacional foi adotado os dados mais utilizados pelas concessionárias, apresentados na Tabela 2.2 a seguir:

Tabela 2.2. Tipos de Rede Devido Velocidade do Vento. Própria Autoria

Tipo	Velocidade do Vento [km/h]
Leve	80
Média	100
Pesada	130

3. Método Computacional Proposto

O método computacional proposto é composto por processos de dimensionamento, avaliação e otimização de redes de distribuição com estruturas de isolamento tipo convencional e cabos elétricos de alumínio nu com e sem alma de aço em tensões de operação não superiores a 34,5kV, bem como pelas funcionalidades desenvolvidas para agilizar o processo de elaboração e análise de projeto.

3.1 Metodologia de Avaliação Mecânica das Estruturas e Montagens

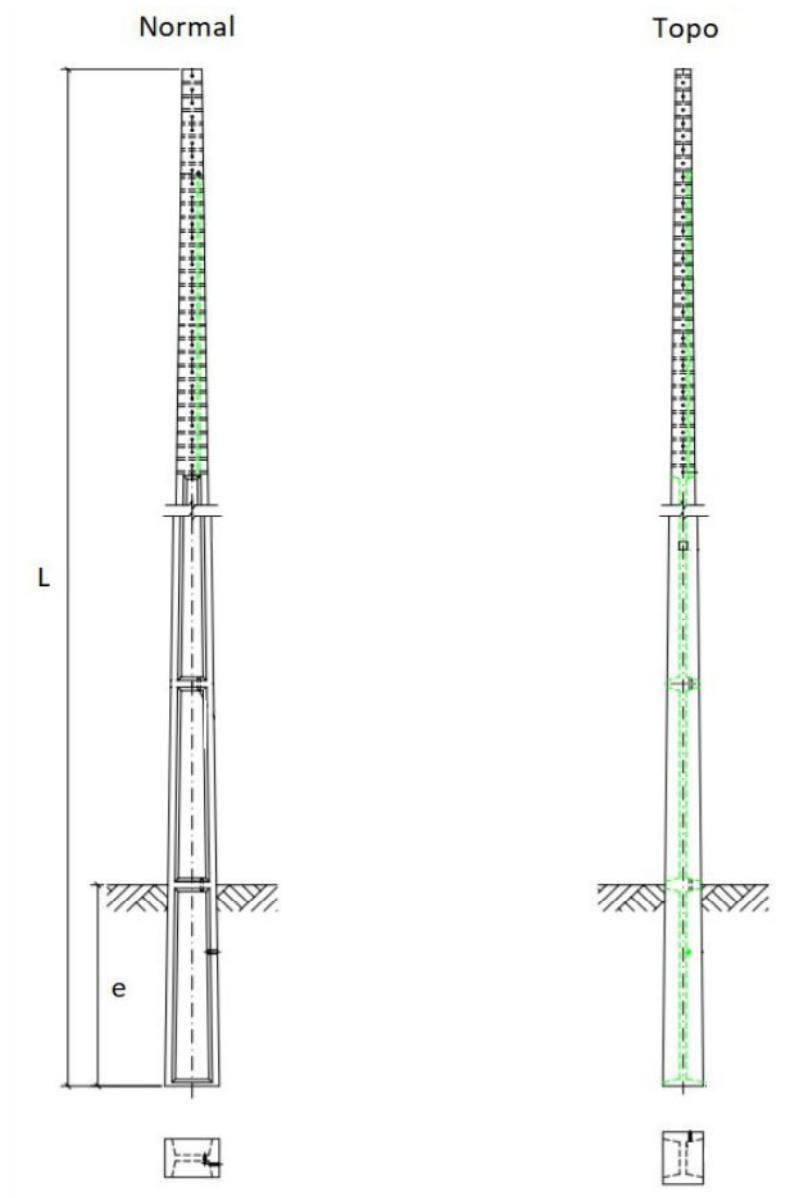
Para a avaliação mecânica, foi utilizado primeiramente um algoritmo de análise matricial de estruturas com montagens calculadas por meio das distâncias mínimas exigidas na NBR 15688 2009, utilizando os esforços aplicados pelos cabos de acordo com os cálculos mecânicos apresentados no Capítulo 2. Além de utilizar os valores limites de ruptura dos equipamentos, possibilitando determinar as violações dos esforços e momentos mecânicos máximos suportados, que são avaliadas e convertidas em um valor numérico de penalização, caso haja alguma restrição, guiando o processo de otimização computacional.

Para avaliação e utilização das montagens eletromecânicas, foi elaborado um banco de dados com formato matricial com levantamento de requisitos e dados referentes às montagens eletromecânicas de estruturas para utilização dos mesmos na implementação do método computacional. Em redes de distribuição de energia elétrica são comumente empregados postes de concreto para elevar as estruturas de isolamento, mantendo os condutores em alturas adequadas às mínimas de segurança.

Os postes de concreto são divididos em duas classes básicas, os postes circulares e os postes duplo T. Os postes circulares possuem sua resistência nominal ao momento fletor à 200mm do topo do poste, sendo esta, a mesma em toda face lateral do poste. Já os postes tipo duplo T possuem uma cava em uma de suas faces a fim de gerar economia em sua fabricação, sendo este de formato retangular como mostrado na Figura 3.1. O poste duplo T possui sua resistência nominal quando aplicado momento fletor na face de topo (menor face), enquanto a face normal (maior face e cavada) possui metade da resistência nominal indicada para o poste. Outra diferença dos postes circulares e duplo T, é a existência de furos para fixação das

estruturas, também ilustrado na Figura 3.1, onde em posição normal a montagem localiza-se a 150mm do topo, enquanto na posição topo a furação localiza-se a 200mm do topo do poste.

Figura 3.1. Faces Postes Duplo T. Fonte: Adaptado de NTC 01, 2014.



O momento fletor do poste é definido por meio do tamanho do engastamento do poste em relação ao seu tamanho total. Esse engastamento é dado por:

$$e = L * 0,1 + 0,6 [m] \quad (7)$$

Sendo:

L – Tamanho total do Poste [m];

A observância dessas furações não é muito empregada em cálculos e avaliações eletromecânicas devido à pequena variação dos resultados e utilização de grande esforço manual para tratar suas variações, porém, devido a característica matricial da metodologia empregada, permite-se uma avaliação pontual de cada situação sem exigir maior processamento, onde pode ser otimizada por exemplo a altura cabo solo, que em alguns casos pode permitir maior precisão e conseqüente ganho econômico com a supressão de montagens desnecessárias.

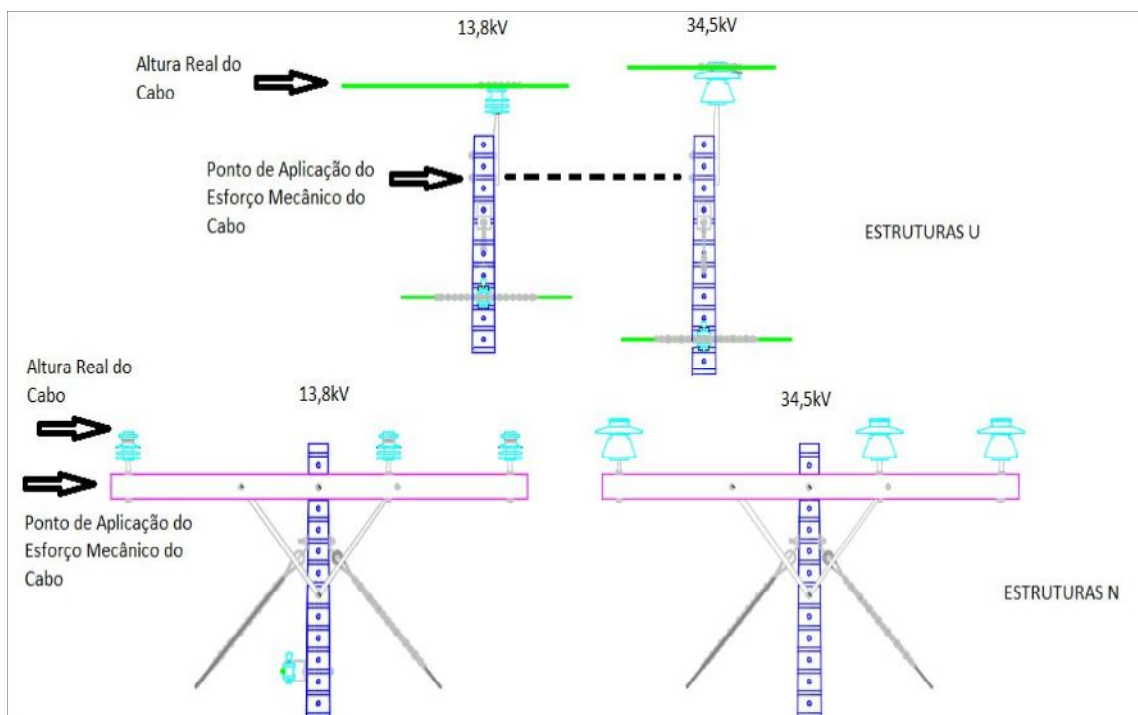
Com os dados presentes em normas e dados construtivos de fabricantes, foi elaborado uma tabela de dados dos postes com os valores das resistências nominais para aplicação dos esforços mecânicos e com as dimensões para desenho técnico do projeto. Alguns desses valores podem ser observados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Dados dos Postes. Própria Autoria

Comprimento Nominal (m)	Tipo	Carga Nominal (daN)		Massa (Kg)	Dimensões (mm)			
		Normal	Topo		Topo do Poste		Base do Poste	
					Normal	Topo	Normal	Topo
9	Circular	150	150	670	140	140	320	320
		300	300	820	170	170	350	350
		600	600	1000	190	190	370	370
	Duplo t	75	150	470	120	100	264	264
		100	200	470	120	100	264	264
		150	300	750	140	110	392	392
		200	400	750	140	110	392	392
300	600	750	140	110	392	392		
10	Circular	150	150	750	140	140	340	340
		300	300	910	170	170	370	370
		600	600	1090	190	190	390	390
		1000	1000	1350	230	230	430	430
	Duplo t	75	150	550	120	100	280	280
		150	300	900	140	110	420	310
		300	600	900	140	110	420	420
500	1000	1150	182	140	462	462		
11	Circular	200	200	870	140	140	360	360
		300	300	1030	170	170	390	390
		600	600	1260	190	190	410	41
		1000	1000	1600	230	230	450	450
		1500	1500	2100	290	290	510	510
	Duplo t	100	200	680	120	100	296	296
		150	300	1050	140	110	448	448
		200	400	1050	140	110	448	448
		300	600	1050	140	110	448	448
500	1000	1330	182	140	490	490		

Outra questão observada e não caracterizada de forma detalhada nas normas, é a definição das montagens das estruturas de isolamento em tangência. Onde, na Figura 3.2, é verificado que o ponto de aplicação do esforço pelo cabo fase se dá abaixo da altura do topo do poste, porém para verificação da altura cabo solo foram aplicadas as distâncias reais do pino isolador e do isolador tipo pino, que por sua vez, está acima do topo do poste. Com a utilização dessa informação com dados precisos, geralmente não observados em elaboração de projetos de rede de distribuição, é possível observar e calcular as alturas do condutor ao solo com maior precisão.

Figura 3.2. Detalhe de Instalação das Estruturas de Tangência. Fonte: Própria Autoria.

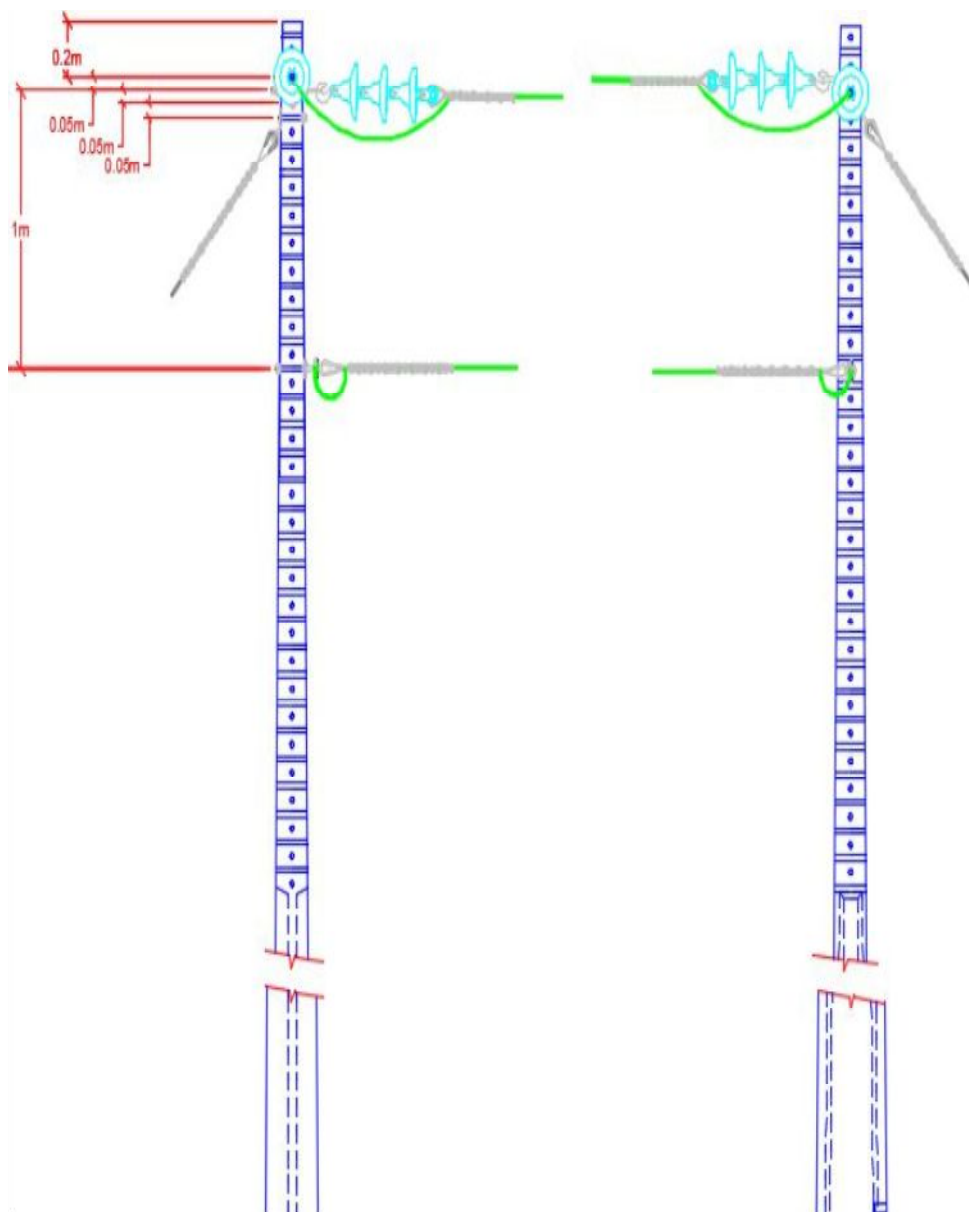


Nota-se também que as normas observadas trazem as distâncias mínimas, porém, devido às furações dos postes, a aplicação dos estais âncora e da colocação do condutor neutro, essas distâncias não são praticadas nas montagens e, portanto, foram ajustadas para seus valores reais, analisando cada caso de forma pontual em cada montagem executiva, sempre em observância aos valores mínimos estabelecidos normativos abrangentes para todos os casos.

Em outros casos, há a combinação de dois tipos de estrutura para formação de uma determinada montagem não prevista nas normas técnicas. No caso da estrutura monofásica U3U3, que ocorre com a união de duas estruturas terminais tipo U3, se faz necessária para

deflexões fechadas no caminhamento da rede, ou seja, em casos onde têm-se ângulos superiores a 60° . Devido à característica da cadeia de isoladores de disco, em observância às distâncias elétricas mínimas, é necessário a instalação de outra cadeia de isoladores na outra face do poste duplo T em segundo nível, diferente da estrutura U4 com duas cadeias de isoladores na mesma face do poste em lados opostos, porém permitindo ângulos de deflexão menores. Portanto, foi elaborada a montagem dessa estrutura conforme Figura 3.3 através de experiências de montagens anteriores.

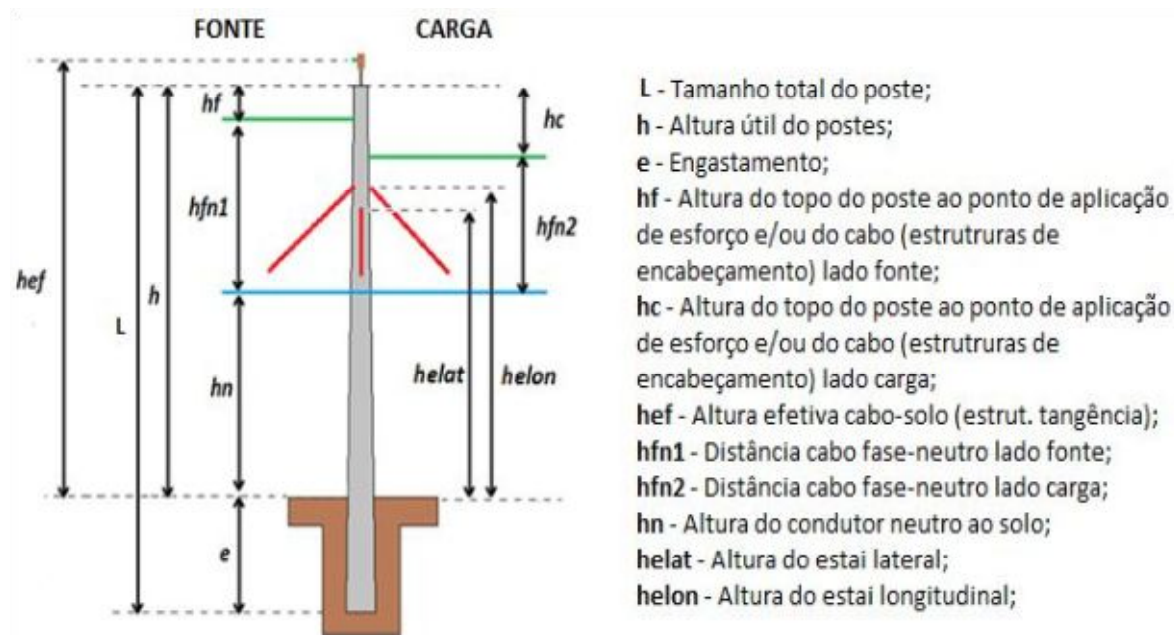
Figura 3.3. Detalhe de Instalação da Estrutura U3U3. Fonte: Própria Autoria.



Devido a essas combinações com dois tipos de estruturas, como as U3U3 e U2-3, ocorre diferença no ponto de aplicação do esforço e altura do cabo condutor dos lados fonte e

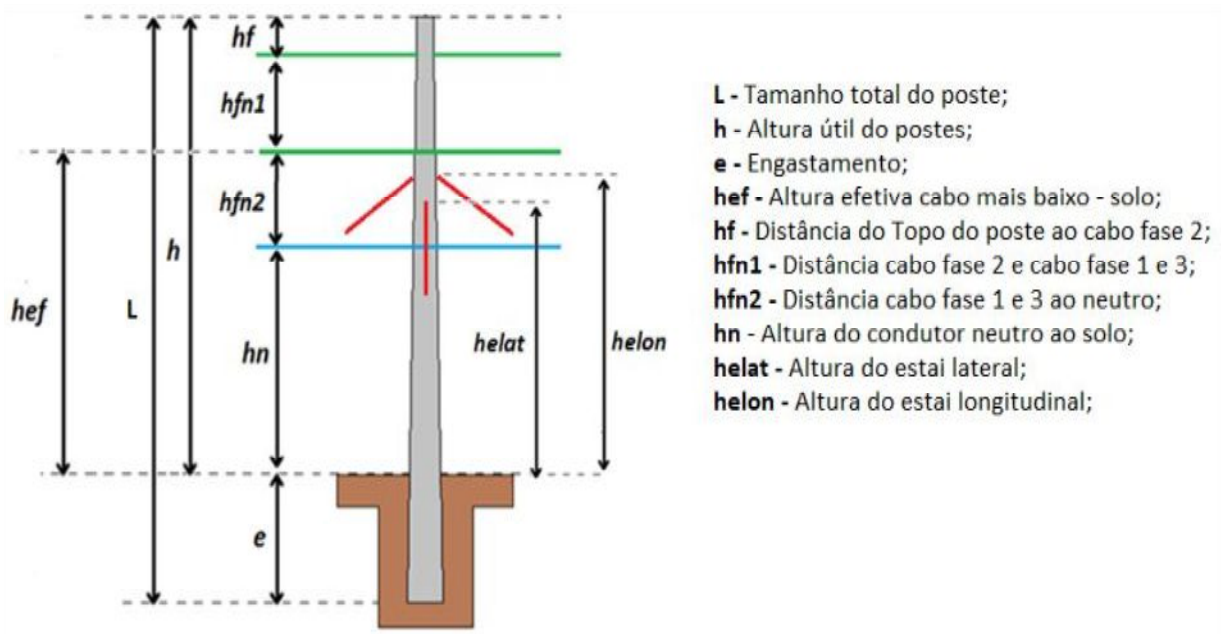
carga das estruturas, sendo necessária a uma avaliação diferenciada para cada um dos lados. Após definidos os pontos de montagem das estruturas nos postes, foram levantados os dados das distâncias padrões para as estruturas de isolamento e sustentação a serem utilizadas. A fim de padronizar as variáveis para utilização de todas as estruturas de maneira agrupada e facilitar a busca computacional, as estruturas do tipo Normal, Meio Beco e Beco, monofásicas e trifásicas foram agrupadas conforme ilustra a Figura 3.4.

Figura 3.4. Metodologia de Levantamento de Dados das Montagens N, M e B. Fonte: Própria Autoria.



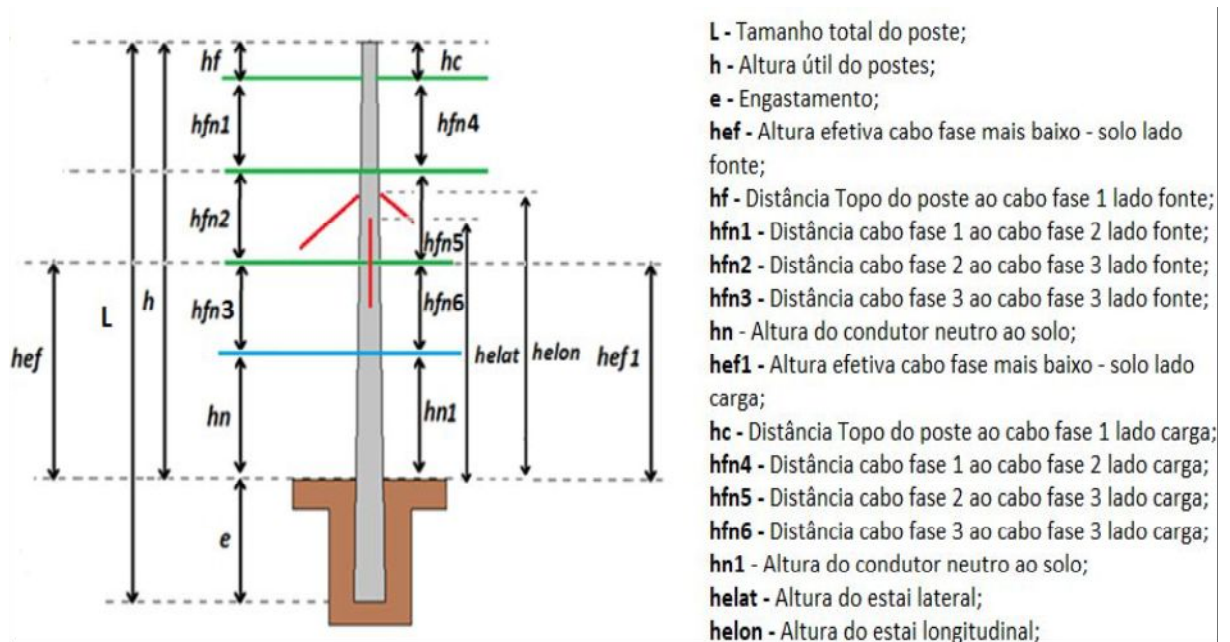
A estrutura TE por se tratar de uma estrutura especial onde possui um dos cabos posicionado acima dos demais, com intuito de aumentar a distância entre os condutores e permitir aplicação de vãos com maiores extensões sem ocorrer curto-circuito devido ao balanço mecânico desses condutores, não apresenta o mesmo padrão das estruturas tipo N, M e B e, portanto, foi elaborada uma nova metodologia utilizando as mesmas variáveis da Figura 3.4 para esta estrutura seguindo a montagem da Figura 3.5.

Figura 3.5. Metodologia de Levantamento de Dados da Estrutura TE. Fonte: Própria Autoria.



Para as estruturas tipo P com utilização de isoladores pilar fixados aos postes, foi necessário a inclusão novas variáveis conforme ilustrado na Figura 3.6.

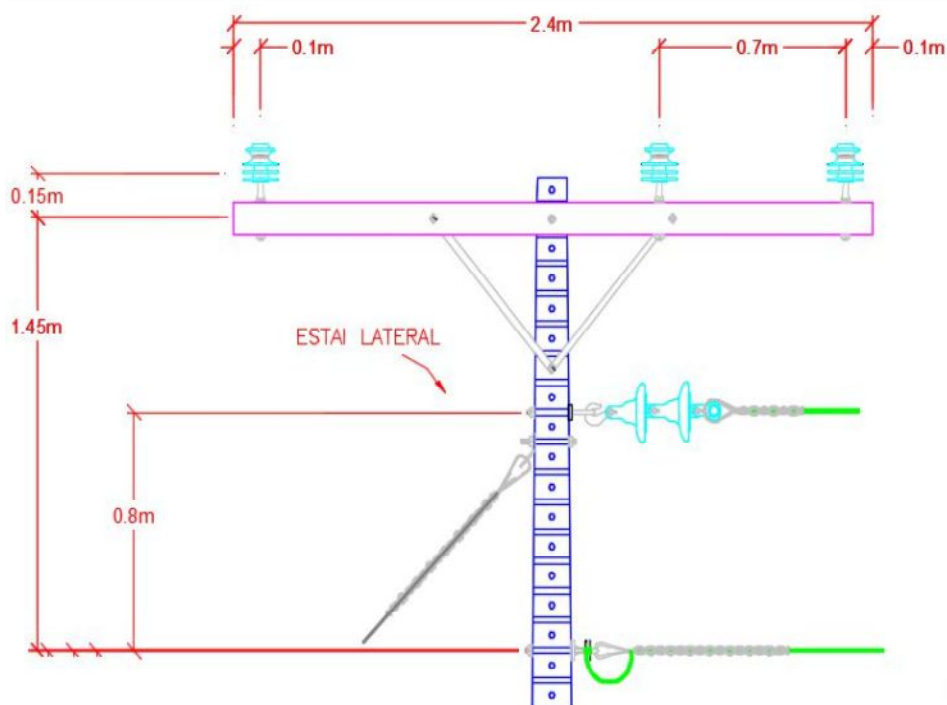
Figura 3.6. Metodologia de Levantamento de Dados das Estruturas Tipo P - Pilar. Fonte: Própria Autoria.



Outra verificação na montagem eletromecânica das estruturas de média tensão foi a variação das distâncias cabo-solo que ocorre quando há uma derivação de rede para um ramal.

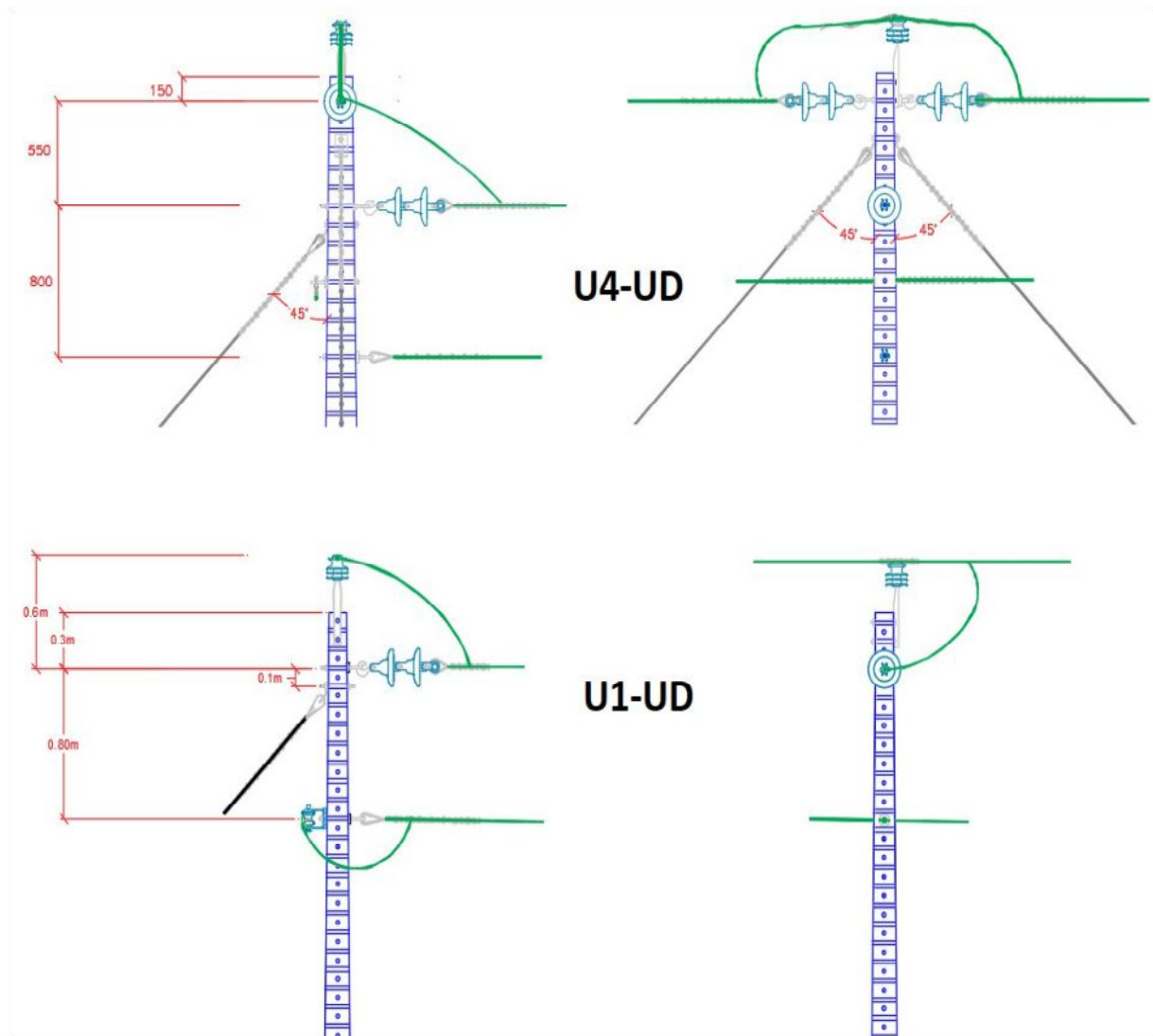
Para essa situação, as estruturas utilizadas possuem nomenclatura com final 3, por exemplo a estrutura U3, aplicada em encabeçamentos no começo ou fim de linha, porém, devido à necessidade de que esta seja montada um nível abaixo, ou seja, em nível 2, é denominada UD (U – Monofásica, D – Derivação). A altura de montagem dessa estrutura varia de acordo com a estrutura que está em nível 1. A Figura 3.7 ilustra a montagem de uma rede monofásica derivando de uma rede trifásica, denominada N1-UD (a montagem de derivação também se aplica às combinações N2-UD e N4-UD). Portanto, para cada caso específico de derivação, foi utilizada a metodologia utilizada na Figura 3.4.

Figura 3.7. Detalhe de Instalação da Estrutura N1-UD 13,8kV. Fonte: Própria Autoria.



Essas estruturas, quando se deriva de redes de distribuição monofásicas há uma variação de montagem entre as U1/U2 - UD e U4-UD, onde é necessário o deslocamento da estrutura UD para uma furação inferior no poste devido posicionamento dos estais longitudinais, que de acordo com o ângulo de deflexão da rede e consequente posicionamento dos estais no sentido oposto desta deflexão, pode não atender às distâncias mínimas de segurança exigidas pelas normativas, conforme ilustrado na Figura 3.8.

Figura 3.8. Detalhe de Instalação das Estruturas U4-UD e U1-UD 13,8kV. Fonte: Própria Autoria.



Como descrito anteriormente para as redes trifásicas de distribuição de energia elétrica há uma variação quanto ao seu tipo e utilização da cruzeta de sustentação na estrutura de isolamento, podendo ser normal, meio beco, ou beco e variando também o tamanho da cruzeta polimérica de 2400mm para 3300mm e 5000mm de acordo com a aplicação. Essa classificação é referente ao posicionamento das cruzetas para montagem das estruturas nos postes, sendo necessária a definição das distâncias horizontais de montagem para os cálculos dos momentos resultantes no poste e mão francesa referente ao peso dos equipamentos e esforço dos cabos. Nas Figuras 3.9 e 3.10 são apresentados os dados necessários aos cálculos dos momentos ocasionados pelos esforços e peso dos condutores.

Figura 3.9. Detalhe de Instalação das Cruzetas Nas Estruturas Tipo N, M e B. Fonte: Própria Autoria.

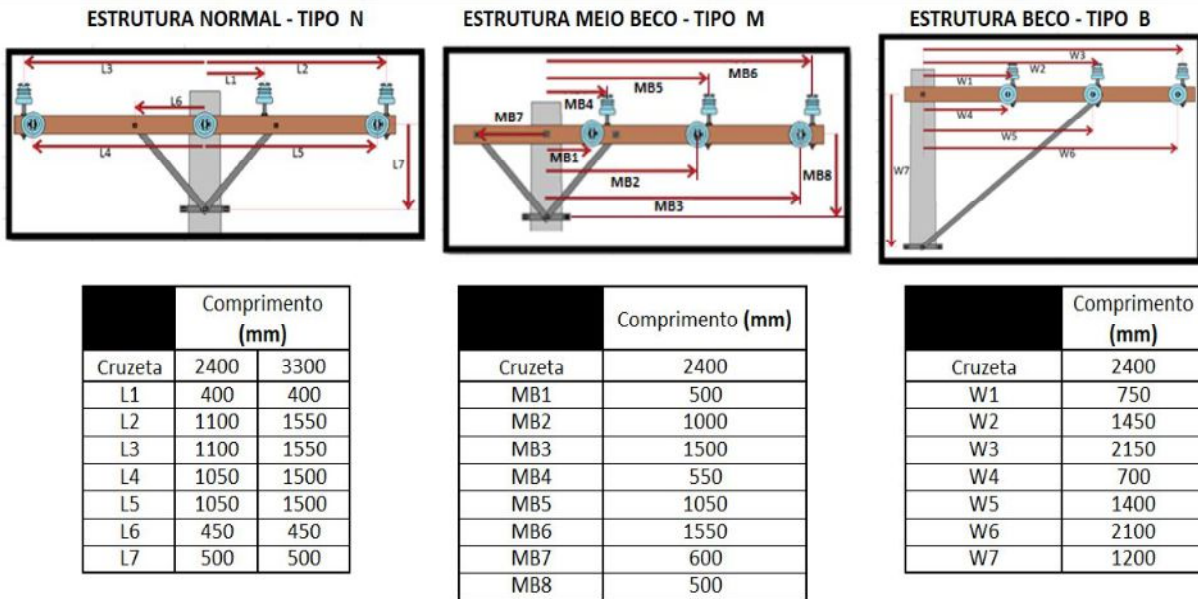
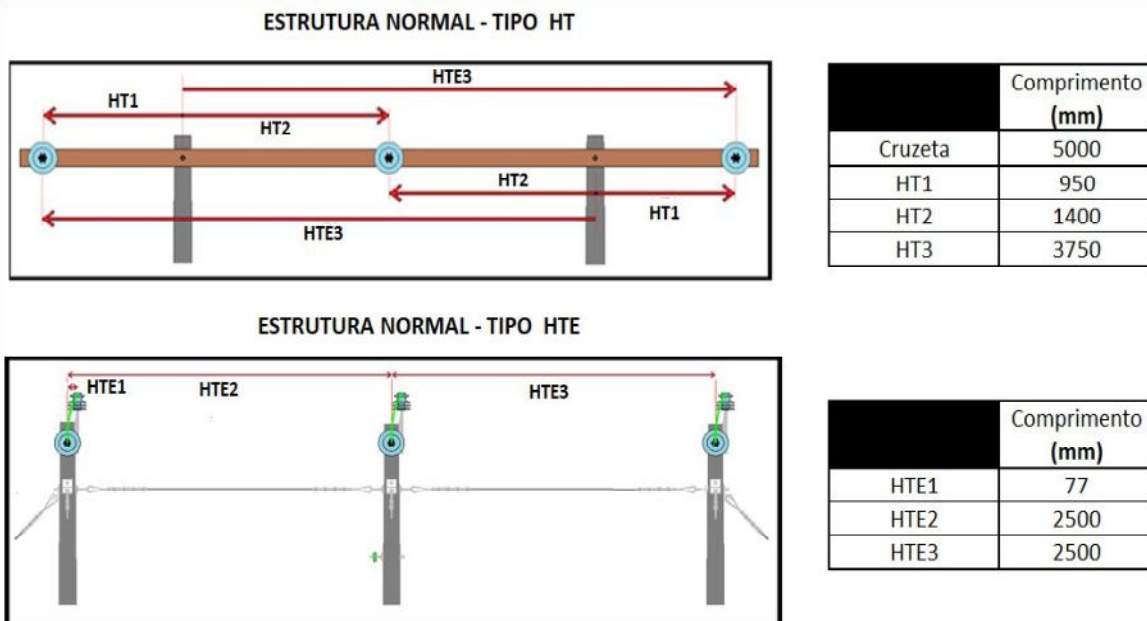


Figura 3.10. Detalhe de Instalação das Estruturas Tipo HT e HTE. Fonte: Própria Autoria.

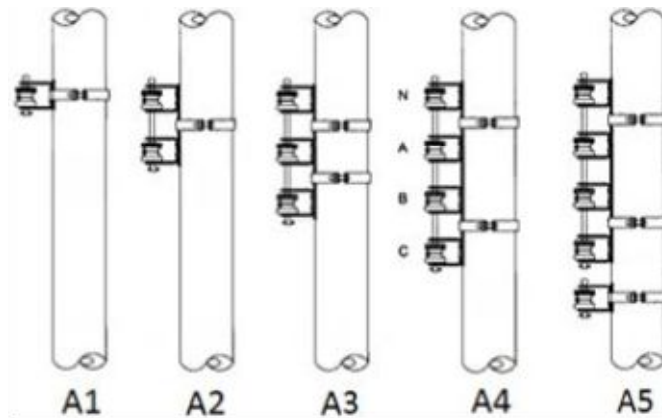


As redes de média tensão (tensão primária) são muito importantes na distribuição para fornecer um ponto de conexão elétrica entre as subestações de distribuição até os transformadores rebaixadores para tensão secundária em baixa tensão para aplicação e utilização pelos consumidores com maior segurança.

As redes de baixa tensão (redes secundárias), por serem comumente utilizados cabos de alumínio sem alma de aço (CA), conforme NTC 18 2006 sua altura cabo solo é

padronizada com referência na sua montagem em poste de 9000mm e, portanto, considera 7300mm de altura cabo-solo em relação ao cabo neutro e as fases a cada 200mm abaixo do neutro de acordo com a quantidade de fases. Sua nomenclatura, assim como nas estruturas primárias, possuem a letra A indicando armação secundária, seguidos da numeração relativa a quantidade de isoladores roldana, mostradas na Figura 3.11.

Figura 3.11. Detalhe das Estruturas de Baixa Tensão. Fonte: Própria Autoria.



A altura do condutor neutro nos casos em que há apenas rede de média tensão, acompanha a altura da estrutura da fase de acordo com a altura do poste de acordo com Figura 3.4. Porém, este condutor fica com altura fixa de 7300mm quando houver apenas baixa tensão ou quando houver Média e Baixa tensão no mesmo poste.

Quando essa rede de distribuição em baixa tensão é derivada de uma rede de média tensão ou mesmo quando ocorre o ponto de entrega de um consumidor na área rural, é necessário a instalação de um transformador de distribuição para reduzir a tensão de operação para que esta possa ser utilizada com segurança pelos consumidores. Para os cálculos de dimensionamento mecânico de uma rede de distribuição é necessária também, a verificação de dados dos equipamentos elétricos da rede como por exemplo um poste com transformador. Neste caso foi utilizado a montagem da Figura 3.12 como referência, onde foi levantado juntamente com o com o setor de materiais da concessionária local, os pesos médios respectivos para todas as potências de transformadores que são apresentados na Tabela 3.2.

Figura 3.12. Detalhe da Instalação de Estrutura com Transformador. Fonte: Própria Autoria.

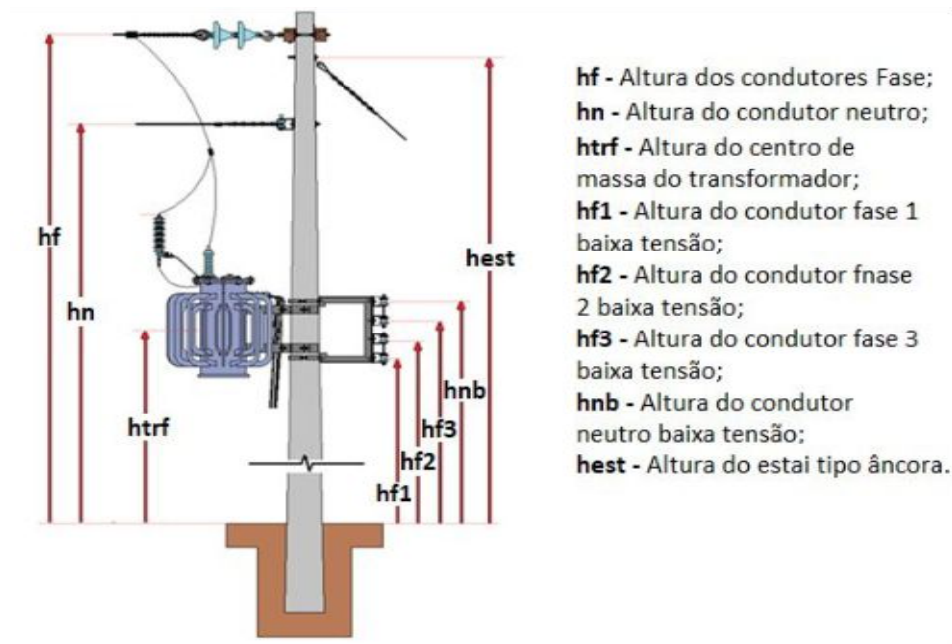


Tabela 3.2. Dados dos Pesos e Centro de Massa dos Transformadores ao Poste. Própria Autoria

TENSÃO	POTÊNCIAS (kVA)	PESO (kg)	Distância Centro de Massa ao Poste (mm)
13,8kV Monofásico	5	86	300
	10	108	300
	15	133	300
	25	165	300
	37,5	210	350
13,8kV Trifásico	15	225	300
	30	283	350
	45	345	450
	75	449	450
	112,5	562	450
	150	683	450
	225	858	450
	300	1093	450
34,5kV Monofásico	5	95	300
	10	113	300
	15	141	300
	25	178	300
	37,5	228	350
34,5kV Trifásico	15	255	300
	30	319	350
	45	372	450
	75	478	450
	112,5	584	450
	150	730	450

Também no levantamento de requisitos de rede, foram verificados os valores comerciais dos materiais e serviços de cada estrutura e equipamento, sendo aplicado como item de avaliação no processo de otimização para buscar a melhor avaliação técnico-financeira.

As cargas de ruptura por sua vez, definem os limitantes dos esforços de tração e momentos fletores suportados por cada estrutura. Além das resistências nominais dos postes de concreto utilizados, devem ser analisadas as cargas de ruptura dos isoladores, das cruzetas utilizadas nas redes trifásicas, das mãos francesas que sustentam essas cruzetas contra torção vertical devido ao momento causado pelo peso dos condutores e da cordoalha de aço dos estais tipo âncora. Nas Tabelas 3.3, 3.4 e 3.5 são apresentados os dados de rupturas desses itens.

Tabela 3.3. Carga de Ruptura Estai Tipo Âncora. Própria Autoria

Estai de Cordoalha de Aço 7 fios	
Diâmetro (mm)	9,53
Carga de Ruptura (daN)	3160

Tabela 3.4. Cargas de Ruptura das Mãos Francesas. Própria Autoria

Mão Francesa Plana		Mão Francesa Perfilada			
Resistência à Tração		Resistência à Tração		Resistência à Compressão	
Ruptura Mínima (daN)	Nominal (daN)	Ruptura Mínima (daN)	Nominal (daN)	Flexão (daN)	Nominal (daN)
2000	1000	2000	1000	1000	500

Tabela 3.5. Carga de Ruptura dos Isoladores. Própria Autoria

Isoladores	Carga Mínima de Ruptura (daN)
Isolador Bastão	5000
Isolador Pilar	800
Isolador roldana (Sem afastador)	1350
Isolador Roldana (Com Afastador)	600
Isolador Pino 13,8kV e 34,5kV	1360
Isolador Disco Vidro	5000
Isolador Disco Porcelana	4500

Os estais por sua vez, exercem papel fundamental na sustentação da maioria das redes de distribuição com cabos de alumínio nu com alma de aço, fornecendo oposição à

resistência mecânica dos esforços mecânicos aplicados às estruturas. Para posicionamento dos estais tipo âncora em relação às montagens e locação dos postes foram aplicadas as opções permitidas nos gabaritos da NTC 07 2016. A Figura 3.13 traz alguns desses posicionamentos para orientação da modelagem.

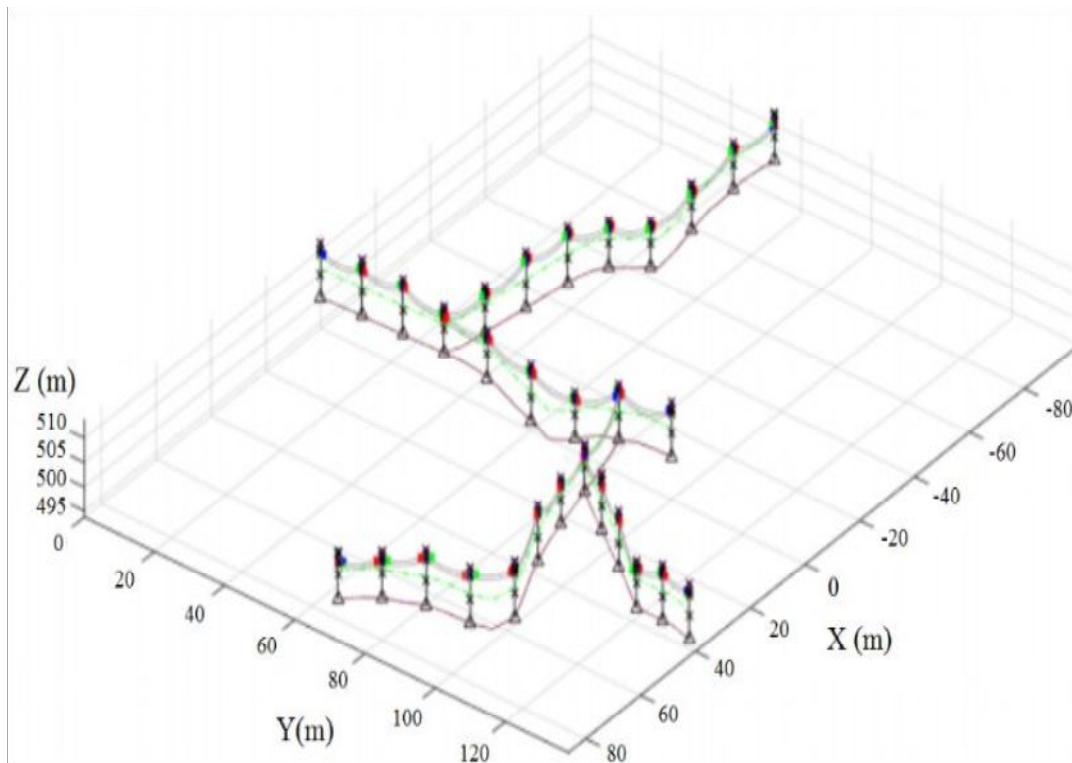
Figura 3.13. Modelagem do Posicionamento dos Estais Tipo Âncora. Fonte: Própria Autoria.

POSICIONAMENTO DOS ESTAIS						
TIPO	MODELAGEM		MODELAGEM		REFERÊNCIAS PARA CÁLCULO	
	POSIÇÃO NORMAL	APLICAÇÃO	POSIÇÃO TOPO	APLICAÇÃO	ALTURAS	ESTRUTURAS UTILIZADAS
3 ESTAIS COM ÂNGULO PARA ESQUERDA		USUAL		NÃO - USUAL	2 ELON 1 ELAT	N4 EM ÂNGULO TE EM ÂNGULO
8 ESTAIS PARA ESTRUTURAS FORMATO H DEFLEXÃO DIREITA		USUAL		NÃO - USUAL	4 ELON 4 ELAT	HT 8 ESTAIS C/ ÂNGULO
8 ESTAIS PARA ESTRUTURAS FORMATO H DEFLEXÃO ESQUERDA		USUAL		NÃO - USUAL	4 ELON 4 ELAT	HT 8 ESTAIS C/ ÂNGULO

3.2 Método de Avaliação e Otimização

Após serem definidos os dados do levantamento topográfico e das características elétricas da rede de distribuição desejada, o método computacional elaborado utiliza os dados das montagens eletromecânicas, aplicando os cálculos das solicitações mecânicas se baseando nas distâncias mínimas cabo-solo, nas cargas de ruptura, e nas características do vento da região para avaliar as soluções. Além de contar com um algoritmo recursivo que “varre” a rede de distribuição dos ramais para as suas derivações de modo a calcular os esforços resultantes dessa linha em sua estrutura inicial e também seus esforços relativos à sua linha tronco, caso este ramal derive de outra linha, como no caso de configurações com vários ramais como da Figura 3.14.

Figura 3.14. Simulação de Uma Rede de Distribuição com Vários Ramais. Fonte: Própria Autoria.



A solução apresentada para o problema de locação de estruturas para elaboração de projetos de redes de distribuição de energia elétrica se baseia em um algoritmo utilizado em otimizações matemáticas, denominado *Hill Climbing*. Esse método é adequado ao processo de locação interativa devido a sua característica de tratamento para buscas locais onde se deseja determinar valores máximos e mínimos baseando-se em critérios de decisão a partir de soluções vizinhas com melhor avaliação. Nesse processo de iterações, as soluções vizinhas com classificação melhor, vão se substituindo até encontrar uma solução potencialmente ótima, ou até chegar ao fim dessas iterações. Na Figura 3.15 é apresentado um pseudocódigo para aplicação geral do método de *Hill Climbing*.

A otimização de *Hill Climbing* é um método de interações que inicia seu processo a partir de uma solução aleatória e, portanto, é gerado uma solução de alocação de estruturas com base no vão médio determinado para cada tipo de cabo condutor. A partir desta solução o algoritmo busca e avalia novas soluções.

Figura 3.15. Pseudocódigo Método Hill Climbing. Fonte: Traduzido de MICHALEWICZ, 2004.

```

Procedimento Iteração Hill Climbing
Iniciar
   $t \leftarrow 0$ 
  inicializa melhor
  repetir
     $local \leftarrow \text{FALSO}$ 
    seleciona ponto atual  $v_c$  aleatoriamente
    avalia  $v_c$ 
    repetir
      seleciona todos novos pontos da vizinhança de  $v_c$ 
      seleciona o ponto  $v_n$  do conjunto de novos pontos
      com melhor valor para função de avaliação  $eval$ 
      Se  $eval(v_n)$  for melhor que  $eval(v_c)$ 
        Então  $v_c \leftarrow v_n$ 
        Senão  $local \leftarrow \text{VERDADEIRO}$ 
      até  $local$ 
       $t \leftarrow t + 1$ 
      Se  $v_c$  for melhor avaliado que solução vencedora
        Então  $melhor \leftarrow v_c$ 
    até  $t = MAX$ 
Fim

```

Para evitar que as soluções aleatórias geradas para locação das posições dos postes possuam passo de variação muito elevado, foi empregada a “regra do 1/5” associada ao algoritmo de otimização, visando convergência mais rápida e robusta. Ou seja, de acordo com (MICHALEWICZ, 2004) o desvio σ é ajustado ao longo das iterações, onde este tem seu valor dobrado quando a taxa de sucesso de geração de soluções vizinhas é grande (maior ou igual a 1/5), ou então, é reduzido à metade quando tal taxa é pequena. O procedimento de atualização do seu valor na metodologia proposta é realizado a cada 30 iterações.

No decorrer das iterações do processo de otimização, ocorre uma avaliação numérica de penalização, que é impactada pelas diversas restrições às violações dos esforços mecânicos, sendo altamente penalizada numericamente caso não ocorra atendimento às alturas mínimas cabo-solo da Figura 2.11. Assim, é utilizada a equação (8) para avaliação mecânica da linha, a qual envolve as trações nos condutores T , os momentos de engastamento nos postes de concreto M_b , os momentos nas mãos-francesas M_f , as forças aplicadas nos isoladores F_p , os quais são comparados com os valores nominais de resistência mínima à tração do condutor T_{nom} , momento máximo suportado pelo engastamento $T_{b\,nom}$, o momento máximo tolerado na mão-francesa $T_{f\,nom}$ e esforço máximo suportado pelo isolador $F_{p\,nom}$. Além das distâncias cabo-solo D nos vãos, que não podem ser inferiores ao limite mínimo D_{min} .

$$\begin{aligned}
h(X) = & \sum_{i=1}^n \left[\left(M_b^{(i)} - M_{b,nom}^{(i)} \right) - \left(M_f^{(i)} - M_{f,nom}^{(i)} \right) \right] + \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=i}^{k^{(i)}} \left(F_p^{(i,j)} - F_{p,nom}^{(i,j)} \right) \right] \\
& + \sum_{i=1}^m \left[\sum_{j=i}^{l^{(i)}} \left(T^{(i,j)} - T_{nom}^{(i,j)} \right) + \left(D_{min}^{(i,j)} - D^{(i,j)} \right) \right]
\end{aligned} \quad (8)$$

Na equação (8), o operador $(v) = \text{máx}(0, v)$, maior valor entre 0 (zero) e v , fornece a intensidade numérica em que a restrição foi violada. A variável X representa a avaliação da montagem (estruturas, cabos e suas disposições físicas), n é o número de montagens (postes e suas estruturas), k^i é a quantidade de isoladores do poste i , m é a quantidade de vãos e l^i é a quantidade de cabos por vãos i . Com isso, deseja-se minimizar a função $h(X)$, com intenção de chegar esse valor a zero, significando que nenhuma restrição técnica foi violada.

Se não houver violação técnica, o custo financeiro se torna o fator de decisão para a escolha da melhor solução. Esse custo é avaliado pela equação (9), na qual: V_{mont} é o custo estimado da montagem, obtido através da soma dos preços dos postes, estruturas, isoladores e demais elementos que compõem a rede de distribuição de energia elétrica. A variável U_{cabo} é o custo da rede empregado por unidade de comprimento; e L é o comprimento do cabo de alumínio no vão avaliado.

$$f(X) = \sum_{i=1}^n V_{mont}^{(i)} + \sum_{i=1}^m \left[\sum_{j=i}^{l^{(i)}} \left(U_{cabo}^{(i,j)} \cdot L^{(i,j)} \right) \right] \quad (9)$$

Portanto, o problema de otimização pode ser expresso na forma da equação (10).

$$\begin{aligned}
& \text{minimize } f(X), \\
& \text{sujeito a } h(X) = 0.
\end{aligned} \quad (10)$$

Quanto ao método de otimização empregado, é apresentado a seguir o procedimento principal recursivo, o qual permite varrer a rede de distribuição, iniciando nas estruturas terminais de cada rede/ramal e finalizando no seu ponto inicial de derivação, que também pertencente à linha principal de onde essa deriva. O método para a geração da solução inicial através da inserção dos vãos médios padrões para cada tipo de condutor utilizado, impacta fortemente na qualidade da solução final com um menor número de iterações, e

utilizando a regra do 1/5 para diminuir o passo de variação, reduz o número de soluções devido a vizinhança avaliada, permitindo uma maior capacidade de convergência para o método proposto.

O procedimento principal, o qual permite varrer a rede de distribuição de energia elétrica, é apresentado sob a denominação “*Otimiza_linha*”. Este, recursivamente, acessa os ramais (linhas derivadas) da linha corrente, caso existam, até encontrar linhas que não tenham derivações para efetuar suas otimizações de forma independente. Os resultados são, então, retro-propagados para as linhas das quais essas derivaram, otimizando-as recursivamente.

O procedimento “*Gera_Solução_Inicial*” corresponde a gerar uma proposta inicial onde os postes são alocados seguindo uma distribuição aproximadamente uniforme ao longo do trajeto, sendo o número inicial de postes calculado a partir do vão médio típico correspondente ao cabo pré-selecionado para o projeto.

O procedimento “*Aloca_Estruturas*”, apresentado em seguida, insere ou remove postes iterativamente, de forma que a configuração mínima em perfeita conformidade, no sentido de satisfação de todos os critérios técnicos, seja alcançada. Este procedimento permite reduzir o número necessário de montagens, o que conseqüentemente o custo da solução.

O procedimento “*Itera_Otimização*” é responsável por fornecer uma resposta ótima ou quase-ótima, ao variar e avaliar iterativamente as soluções correntes.

A variação denotada por “*Varia_Linha*”, a princípio, define de forma aleatória se a variação se dará por alteração da altura do poste, por alteração do tipo de estrutura ou por reposicionamento de um poste, também selecionado aleatoriamente, em uma posição vizinha à corrente, dentro da trajetória pré-estabelecida inicialmente. Em seguida, a modificação na linha é realizada. Por exemplo, seria possível empregar n tipos de estrutura, bem como n configurações de postes, cada um com uma altura e resistência associadas. Caso a alteração seja de estrutura, uma opção é sorteada após excluir a configuração corrente do conjunto. O mesmo se dá se a alteração se der alterando-se o poste empregado. Assim, uma das opções de poste e resistência é selecionada, desconsiderando-se o poste correntemente empregado. Além disso, se a alteração se der por posição da montagem, uma posição vizinha à posição corrente é gerada empregando-se a expressão (11).

$$x_n = x_c + \sigma \cdot N(0,1) \quad (11)$$

Na equação (11), x_n é a nova posição da montagem, x_c é a posição corrente da montagem, $N(0,1)$ é um número aleatório gerado a partir da função densidade de probabilidade normal (ou gaussiana) canônica, com média zero e variância unitária. O parâmetro σ é o desvio-padrão aplicado à distribuição normal, o qual é dado por uma fração do vão médio (média entre os valores do vão anterior e do vão posterior à montagem em questão). Cabe ressaltar que as montagens que delimitam o início e o fim da rede de distribuição, bem como aquelas alocadas em pontos de deflexão e de ramificações de rede, não podem ter suas posições alteradas, por serem pontos de locação obrigatória.

Procedimento *Otimiza_Linha* (entrada: **Rede**)

```

Linha ← Gera_Solução_Inicial (Rede);
  Se Linha tem ramais
    Para cada Ramal da Linha
      Ramal ← Otimiza_Linha (Ramal);
    Fim Para
  Fim Se
  RedeOtimizada ← Aloca_Estruturas (Linha);
  Retorna RedeOtimizada

```

Fim Procedimento

Procedimento *Aloca_Estruturas* (entrada: **Linha**)

```

Linha ← Itera_Otimização (Linha);
  Se Linha está em conformidade
    LinhaNova ← Linha;
    Enquanto LinhaNova está em conformidade
      LinhaNova ← Remove_Estrutura (Linha);
      LinhaNova ← Itera_Otimização (LinhaNova) ;
      Se LinhaNova está em conformidade
        Linha ← LinhaNova;
    Fim Se
  Fim Enquanto
  Senão
    Enquanto Linha não está em conformidade
      Linha ← Insere_Estrutura (Linha);
      Linha ← Otimiza_Estais(Linha);
      Linha ← Itera_Otimização (Linha);

```

```

    Fim Enquanto

    Fim Se

    Retorna Linha

Fim Procedimento


---




---


Procedimento Itera_Otimização (entrada: Linha)


---


    Enquanto condição de parada não é satisfeita

        LinhaViz ← Varia_Linha (Linha);

        Se Avalia (LinhaViz) < Avalia (Linha)

            Linha ← LinhaViz;

        Fim Se

    Fim Enquanto

    Retorna Linha;

Fim Procedimento


---




---


Procedimento Otimiza_Estais (entrada: Linha)


---


    Para cada Poste da Linha

        Estais ← Poste.Estais;

        Enquanto Poste não estiver em conformidade e houver configurações possíveis de Estais

            EstaisViz ← Varia_Estais (Poste);

            Se Avalia (EstaisViz) < Avalia (Estais)

                Poste.Estais ← EstaisViz;

            Fim Se

        Fim Enquanto

    Fim Para

    Retorna Linha;

Fim Procedimento


---



```

O procedimento “*Otimiza_Estais*” gera, seguindo metodologia apresentada na Figura 3.13, uma configuração adequada para os estais tipo âncora responsáveis pela contribuição ao esforço resistente dos postes.

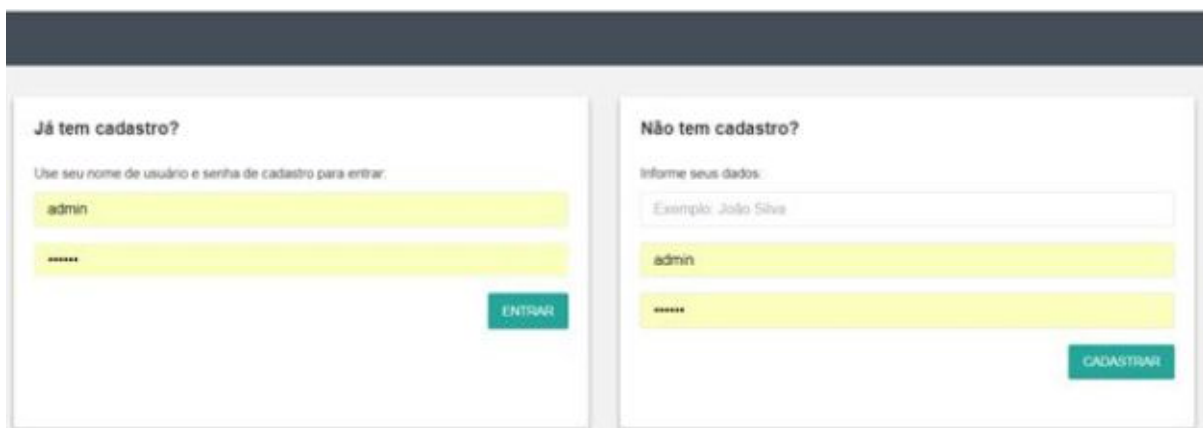
A cada iteração o algoritmo pontua numericamente a nova proposta a fim de compará-la com outra, seguindo primeiramente o critério de violação dos cálculos mecânicos, seguido pela violação dos custos financeiros da linha; onde se ambas apresentarem violação de restrição técnica, a menor pontuada será elegida; no caso de apenas uma proposta apresentar violação, a não penalizada é elegida; e no caso de as duas soluções não apresentarem violação técnica, a solução mais econômica é elegida.

4. Resultados e Aplicações

4.1 Apresentação

A metodologia computacional desenvolvida para elaboração de projetos de redes de distribuição de energia elétrica foi realizada em plataforma *web* utilizando a API do *Google Maps* para aplicações em elaboração e análise de topografia e projeto. Na Figura 4.1 é apresentada a tela inicial com a interface necessária ao acesso dos profissionais para operar a mesma, podendo cadastrar um novo usuário ou apenas entrar com seu *login* previamente cadastrado.

Figura .-1. Tela Inicial. Fonte: próprio autor



A imagem mostra a tela inicial do sistema, dividida em duas seções principais. À esquerda, sob o título "Já tem cadastro?", há um formulário de login com o texto "Use seu nome de usuário e senha de cadastro para entrar:". Os campos de entrada contêm o texto "admin" e "*****". Um botão verde "ENTRAR" está posicionado abaixo dos campos. À direita, sob o título "Não tem cadastro?", há um formulário de cadastro com o texto "Informe seus dados:". Um campo de entrada contém o exemplo "Exemplo: João Silva". Abaixo dele, os campos de usuário e senha contêm "admin" e "*****". Um botão verde "CADASTRAR" está posicionado abaixo dos campos.

Após realizar o *login* do usuário, na tela apresentada na Figura 4.2 foram inseridas 5 abas para administração dos usuários, clientes, tabelas de dimensionamento, pré-configurações de estruturas e painel de projeto. Na aba "Usuários" também ilustrado na Figura 4.2 é possível verificar todos os usuários cadastrados e poder realizar ações sobre os mesmos.

Figura 4.2. Tela de Usuários. Fonte: próprio autor



A imagem mostra a interface de administração de usuários. No topo, há uma barra de navegação com as abas "Painel", "Pré-configuração", "Tabelas", "Usuários" (selecionada) e "Cliente". Abaixo, o título "Usuários" está exibido, acompanhado de um botão "ADICIONAR USUÁRIO". A lista de usuários mostra dois itens: "ADMINISTRADOR" e "DENNER_MONTEIRO", cada um com um ícone de usuário e um botão de ação.

Ao clicar sobre algum dos usuários cadastrados, é disponibilizado ao administrador a tela apresentada na Figura 4.3. Neste momento é possível criar, excluir e editar usuários por parte do administrador, sendo permitido deixar o usuário ativo ou inativo e dar permissão de administrador a outro usuário. Nessa seção são direcionados apenas os projetos de interesse de um usuário específico, evitando que outros possam ter acesso e alterar qualquer condição do projeto.

Figura 4.3. Editar Usuários. Fonte: próprio autor

A imagem mostra a interface de usuário para editar um usuário. No topo, há uma barra de navegação com os itens: Painel, Pré-configuração, Tabelas, Usuários (selecionado) e Cliente. Abaixo, o título da página é "Editar Usuário". O formulário contém os seguintes campos e controles:

- Nome Completo:** Campo de texto com o valor "Denner_Monteiro".
- Nome de Usuário:** Campo de texto com o valor "denner".
- Está Ativo:** Grupo de botões de rádio com "Sim" selecionado e "Não" desselecionado.
- É Administrador:** Grupo de botões de rádio com "Não" selecionado e "Sim" desselecionado.
- Projetos:** Menu suspenso com o texto "Selecione..." e uma seta para baixo.
- Botões de Ação:** Três botões: "SALVAR" (em verde), "EDITAR SENHA" e "EXCLUIR" (em cinza).

Na aba “Tabelas” é possível cadastrar novos parâmetros mecânicos, como inserir um novo cabo condutor que possa ser criado a posteriori aplicada em uma *interface* amigável, bem como alteração dos parâmetros das estruturas cadastradas e, também, as características mecânicas e limites de ruptura para alguns itens como os isoladores. Conforme descrito anteriormente, devido ao algoritmo matricial utilizado para padronizar os parâmetros das diferentes estruturas, as tabelas inseridas deverão possuir formato “.csv” e seguir o padrão de sequência dos dados para que a aplicação não ocorra algum erro e, portanto, será permitido alteração desses campos apenas pelo perfil de administrador. Na Figura 4.3 é ilustrada a tela com as tabelas de alguns dos parâmetros que podem ser alterados via *interface*.

Figura 4.4. Tabelas de Edição e Cadastro de Parâmetros . Fonte: próprio autor

Arquivo TABELA_Solo_compressibilidade.csv	Escolher arquivo Nenhum arquivo selecionado	ENVIAR
Arquivo TABELA_Estr.csv	Escolher arquivo Nenhum arquivo selecionado	ENVIAR
Arquivo TABELA_EstrBAIXA.csv	Escolher arquivo Nenhum arquivo selecionado	ENVIAR
Arquivo TABELA_Trafo_peso_distancia.csv	Escolher arquivo Nenhum arquivo selecionado	ENVIAR
Arquivo TABELA_CruzetaN.csv	Escolher arquivo Nenhum arquivo selecionado	ENVIAR

No intuito de diminuir o número de iterações do otimizador/avaliador foi elaborada a aba “Pré-Configuração”. Nesta seção, o usuário lançando mão de sua experiência pode selecionar por exemplo, as estruturas e o tipo de combinação que mais ocorre em um determinado tipo de rede de distribuição, podendo montar redes de tensão de operação específica com cabos condutores pré-determinados, auxiliando o otimizador na escolha e avaliação das estruturas e esforços mecânicos solicitantes.

Figura 4.5. Pré-Configurações. Fonte: próprio autor

Pré-configurações ADICIONAR PRÉ-CONFIGURAÇÃO

Principal » Pré-configurações

- MONOFÁSICA - 4CAA - 13,8KV
- PADRÃO
- TRIFÁSICA - 2/0CAA - 13,8KV
- TRIFÁSICA 4CAA - 13,8KV

4.2 Seção de Cadastro de Projetos

No item “Painel” estão situados as opções de cadastro e edição dos projetos de rede de distribuição de energia elétrica do tipo convencional aplicados ao método desenvolvido. Ao acionar o botão “Adicionar Projeto”, conforme ilustrado na Figura 4.6, é disponibilizada a tela

de cadastro dos dados básicos do projeto, onde o usuário poderá escolher o nome identificador do projeto, parâmetros de dimensionamento mecânico como: temperatura, coeficientes de carregamento, resolução de pontos por vão, e também, condições típicas de velocidade do vento para a região do projeto elaborado, podendo ser classificada como rede leve, média ou pesada.

Figura 4.6. Cadastro de Projetos. Fonte: próprio autor

The screenshot shows a web application interface for project registration. The main page is titled "Lista de Projetos/Redes" and features a search filter and a table of projects. A modal window titled "Adicionar/Editar Projeto" is open, displaying various input fields for project parameters.

The modal window contains the following fields:

- Identificador do Projeto: (text input)
- Hipótese de Cálculo: Carga Máxima (dropdown menu)
- Número de Pontos por Vão: 100 (text input)
- Temperatura Inicial: 10 (text input)
- Temperatura de Maior Duração: 80 (text input)
- Percentual de Maior Duração: 20 (text input)
- Temperatura de Máximo Carregamento: 15 (text input)
- Percentual de Máximo Carregamento: 35 (text input)
- Temperatura Coincidente: 25 (text input)
- Velocidade do Vento: 100 km/h - Rede Média (dropdown menu)

Buttons for "SALVAR" and "CANCELAR" are located at the bottom right of the modal.

4.3 Seção de Cadastro de dados Topográficos

Como visto no Capítulo 2, os dados dos levantamentos topográficos são a base para elaboração de projetos de rede de distribuição de energia elétrica. Em um primeiro momento, é identificada a intenção e necessidade de um determinado consumidor de ser atendido. Em um pré estudo, são verificadas as necessidades de consumo desse determinado cliente e por meio desse planejamento, são definidas as variáveis iniciais do levantamento in loco. Na Figura 4.7 são inseridos os dados do cliente a ser atendido, município, ponto de referência do local e obra, nome do Topógrafo contratado para realização do levantamento topográfico, coordenadas geográficas em formato *UTM* do ponto de derivação e ângulo azimutal para direcionamento planimétrico da rede.

Também na Figura 4.7, são apresentados os campos necessários ao preenchimento dos dados de dimensionamentos elétricos da rede, como a quantidade de circuitos alimentadores, quantidade de cabos condutores da fase, existência ou não de rede em tensão secundária, com suas respectivas tensões de operação, e cabos condutores identificados por sua capacidade de corrente à carga elétrica demandada pelo consumidor.

Ainda na Figura 4.7, é apresentado o campo “Poste de Derivação” para situações onde há derivações de novas redes de distribuição no decorrer de uma linha tronco já cadastrada, caracterizando diversificadas ramificações com formato análogo de uma árvore. Nessa situação, no ponto de derivação, haverá uma estrutura definida na linha tronco, e no mesmo poste de sustentação haverá uma estrutura para a ramificação denominado ramal. Esse ponto poderá ser vinculado através do campo “Poste de Derivação”, onde o ponto possuirá as mesmas coordenadas geográficas e cota altimétrica identificada na linha tronco, permitindo assim que possa ser calculado os esforços e solicitações mecânicas relativos às duas redes naquele determinado ponto. É possível também, identificar e vincular, no caso de circuito duplo, qual circuito irá continuar ou derivar para a novo ramal definido por uma nova caderneta.

Figura 4.7. Dados Iniciais do Projeto. Fonte: próprio autor

Editar Caderneta de Campo PROJETOS

Principal » Caderneta de Campo

Projeto P80003	Identificador/Ramal Ramal	Data 20/07/2017
Cliente ABEL DE OLIVEIRA ALVES	Estado GO	Cidade Goiânia
Topógrafo Topógrafo	Obra Obra	Cota Inicial 700.0
Estação Total Estação Total	Azimute	Fuso 22
		K
Poste de Derivação*	Tipo de Circuito Duplo	Fases Trifásica
		Possui Rede Secundária? <input type="radio"/> Não <input checked="" type="radio"/> Sim
		Coordenada X 695857.63
		Coordenada Y 8144178.49

*A linha pode ter início em uma montagem de uma linha pré-existente (ramal). Nesse caso, selecione o ponto inicial na lista poste de derivação. Aparecem nessa lista apenas montagens que tenham o campo circuito de derivação preenchido.

Configurações

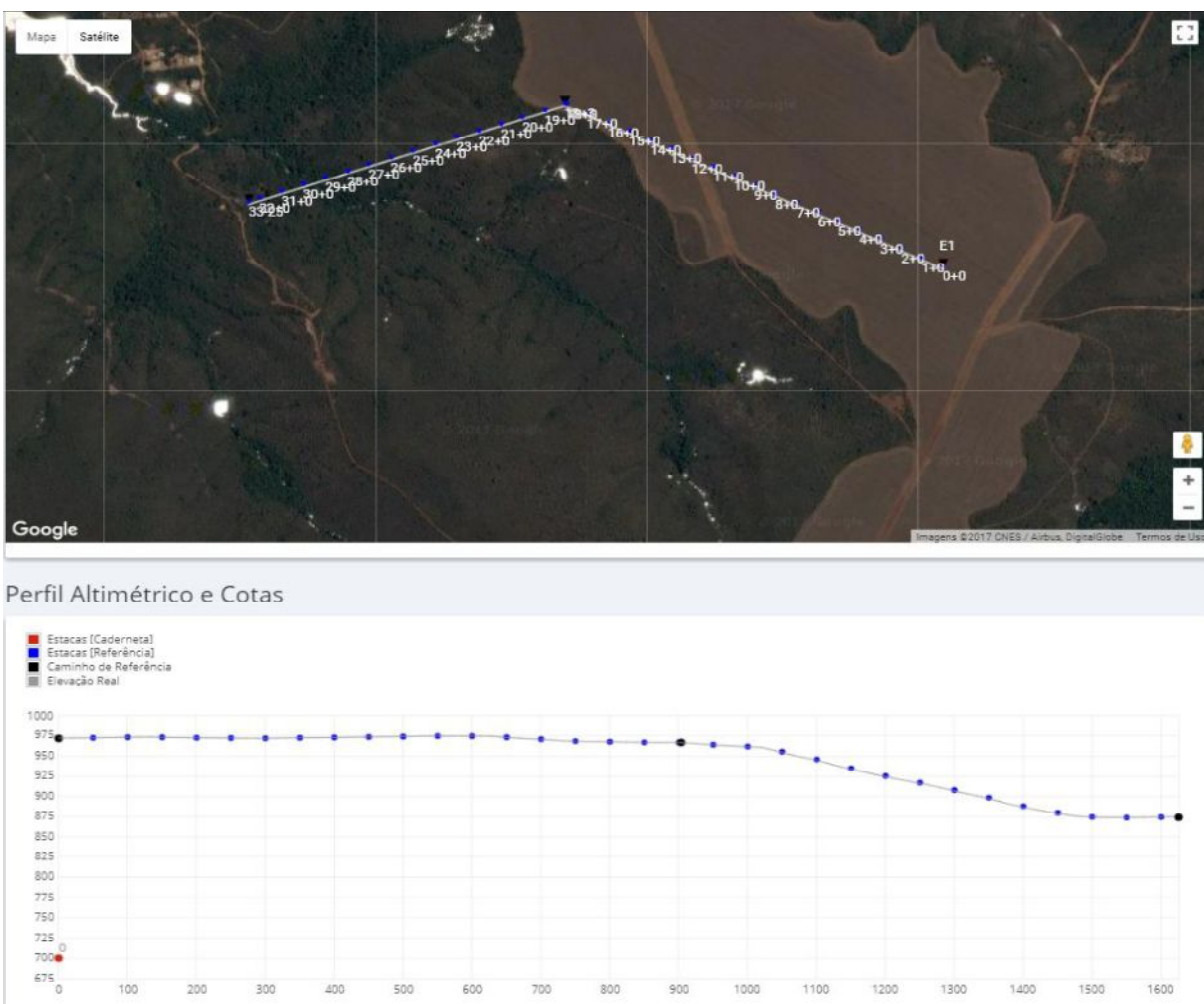
Rede Primária - Nivel 1 Seção <input type="text"/> Tensão <input type="text"/>	Rede Primária - Nivel 2 Seção <input type="text"/> Tensão <input type="text"/>	Rede Secundária Seção <input type="text"/> Tensão <input type="text"/>	Neutro e Tipo de Estai Seção <input type="text"/> Resistência dos Estais EstCord7 - 3160 daN
---	---	---	---

SALVAR

4.3.1 Caminho de Referência

No processo de elaboração de projetos de rede de distribuição de energia elétrica, é necessário primeiramente, a definição de demanda e ponto de entrega para atendimento ao interessado. Após ser definida a carga demandada pelo cliente, é realizado um estudo para identificar o posicionamento geográfico mais próximo de uma rede de distribuição existente e é avaliado se a mesma suporta o aumento da carga demanda por esse cliente. Definidos esses quesitos, a rede está apta a ser projetada. Para os projetistas de rede auxiliarem na escolha de um caminhamento visando a otimização técnico econômica, foi aplicada a metodologia de sobreposição de dados sobre plataforma *web*, utilizando os mapas com vista aérea do *Google Maps*, montando interativamente caminhos propostos chamados de caminho de referência. Assim, na Figura 4.8, pode-se criar encaminhamentos apresentados na cor azul, bem como as cotas de elevação do *Google Maps* para ter a referência em estudos com terrenos muito acidentados, evitando escolhas de caminhamentos não factíveis.

Figura 4.8. Caminho de Referência. Fonte: próprio autor



A *interface* também disponibiliza os dados numéricos da elevação altimétrica real dos dados das estacas de referência, demarcadas de 50 em 50 metros, em tabela com extensão *.xls*, podendo esses dados serem avaliados também na interface como mostra a Figura 4.9.

Figura 4.9. Tabela de Estacas de Referência. Fonte: próprio autor

Tabela de Estacas de Referência							EXPORTAR
	Distância		Altitude (m)		Ângulo (°)		
	Metros	X+Y	Absoluta	Relativa	Absoluto	Relativo	
0	0	0-0	972,50	-	-65°	-65°	
1	50	1+0	972,71	0	-65°	0°	
2	100	2+0	973,48	-1	-65°	0°	
3	150	3+0	973,50	0	-65°	0°	
4	200	4+0	972,81	-1	-65°	0°	
5	250	5+0	972,52	0	-65°	0°	
6	300	6+0	972,18	0	-65°	0°	
7	350	7+0	972,77	+1	-65°	0°	
8	400	8+0	973,21	0	-65°	0°	
9	450	9+0	973,83	+1	-65°	0°	
10	500	10+0	974,30	0	-65°	0°	
11	550	11+0	974,97	+1	-65°	0°	
12	600	12+0	974,89	0	-65°	0°	
13	650	13+0	973,48	-1	-65°	0°	
14	700	14+0	971,10	-2	-65°	0°	
15	750	15+0	968,67	-2	-65°	0°	
16	800	16+0	967,91	-1	-65°	0°	
17	850	17+0	967,12	-1	-65°	0°	
18	900	18+0	967,07	0	-66°	-1°	
19	903	18+3	967,08	0	-109°	-43°	
20	950	19+0	964,24	-3	-109°	0°	
21	1000	20+0	961,98	-2	-109°	0°	
22	1050	21+0	955,62	-6	-109°	0°	
23	1100	22+0	945,99	-10	-109°	0°	
24	1150	23+0	935,12	-11	-109°	0°	
25	1200	24+0	925,46	-10	-109°	0°	
26	1250	25+0	917,17	-8	-109°	0°	
27	1300	26+0	908,02	-9	-109°	0°	
28	1350	27+0	898,33	-10	-109°	0°	
29	1400	28+0	887,94	-10	-109°	0°	
30	1450	29+0	879,70	-8	-109°	0°	
31	1500	30+0	874,41	-5	-109°	0°	
32	1550	31+0	873,68	-1	-109°	0°	
33	1600	32+0	874,29	+1	-109°	0°	
34	1625	33-25	874,59	0	-	-	

4.3.2 Levantamento Topográfico

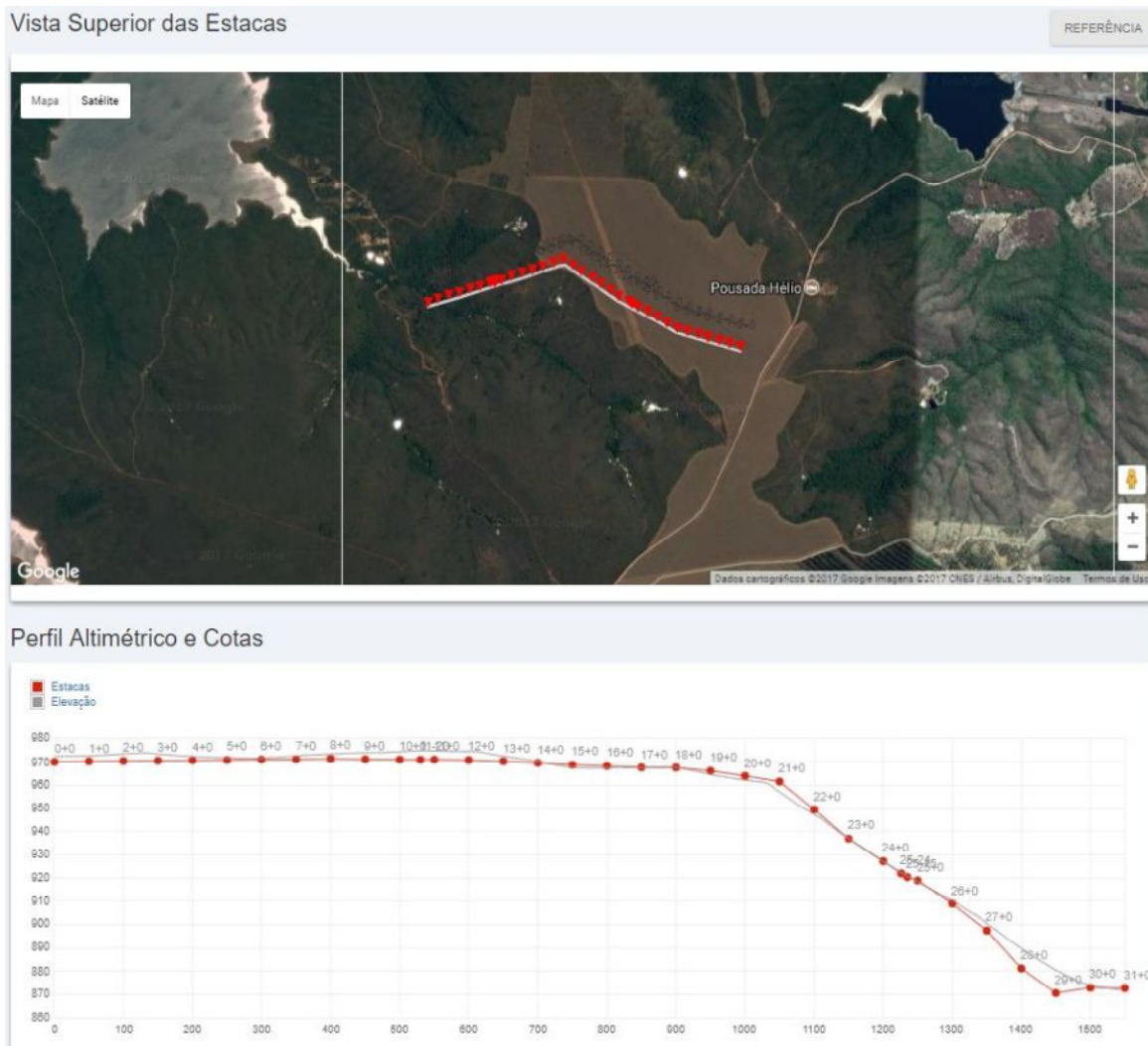
Esse caminho de referência auxilia o técnico agrimensor na determinação do caminhamento executivo, evitando que o levantamento topográfico possa ser reprovado posteriormente, o que acarretaria em um grande atraso o processo de elaboração de projeto.

A etapa de levantamento topográfico é de grande relevância no processo de elaboração e aprovação de projeto, sendo atualmente, executada exclusivamente por profissionais agrimensores. No momento do levantamento dos dados topográficos *in loco*, esse profissional, que na maioria das vezes não possui acompanhamento de um técnico especialista em projeto de redes de distribuição de energia elétrica a fim de reduzir os custos pelas empresas executoras, acaba sendo forçado a realizar decisões significativas para a etapa de

dimensionamento mecânico do projeto, podendo acarretar até mesmo na inviabilidade do mesmo. Com isso, ocorrem retrabalhos e, em sua maioria, sendo necessário novos levantamentos em campo, gerando maiores custos agregados ao projeto e novamente atrasando o processo.

Com essa aplicação em plataforma *web*, é possível que esse levantamento topográfico seja acompanhado remotamente por todos os profissionais envolvidos no processo através da tela da Figura 4.10. A medida em que o profissional cadastra as estacas, o caminhamento executivo é atualizado em tempo real, possibilitando uma análise do caminho de referência com o caminho executivo realizado à distância, podendo ser aprovado nessa etapa evitando deslocamentos futuros desnecessários, gerando uma economia de tempo e custo.

Figura 4.10. Visualização do Cadastro da Caderneta de Campo. Fonte: próprio autor



O cadastro das estacas (pontos topográficos) pode ser realizado de duas maneiras diferentes, a primeira manualmente, onde através da tela de cadastros da Figura 4.11 o usuário

insere os dados da posição da abscissa, a cota altimétrica, declara o tipo da vegetação e terreno, além de apresentar os possíveis obstáculos situados em um determinado ponto do levantamento topográfico, bem como o ângulo horizontal de deflexão da rede de distribuição, presença de ramificação (derivação) de rede e o nome do proprietário do terreno naquele ponto para identificação de necessidade de apresentação de documento de autorização de passagem para aprovação na concessionária de energia elétrica. A outra opção é realizada por importação dos dados através de mídia digital para casos onde o levantamento topográfico seja feito por equipamento eletrônico de medição, sendo obrigatório a manipulação desses dados para o padrão e extensão do arquivo desenvolvido.

Figura 4.11. Cadastro dos Pontos Topográficos. Fonte: próprio autor

Estaca	Abscissa	Cota	Azimute	Ângulo Horizontal	Terreno	Vegetação	Obstáculo	Ângulo do Obstáculo	Ângulo Vertical	É derivação	Proprietário
28+0	1400.0m	881,12m	253°00'50"	000°00'00"	Sem Obstáculo	Mato	Comum		000°00'00"	Não	ABEL DE OLIVEIRA
29+0	1450.0m	870,56m	253°00'50"	000°00'00"	Areia fina		SEOBS - Sem Obstáculo	000°00'00"			
30+0											
31+0											

Adicionar/Editar Estaca

Abscissa: Cota:

Obstáculo:

Ângulo do Obstáculo: Terreno:

Vegetação: Ângulo Horizontal:

Nome do Proprietário:

Possui derivação? Sim Não

Importação
 Padrão: accumulatedDistance;quota,markerObstacle;latitude;longitude;azimuth;horizontalAngle;verticalAngle;obstacleAngle;vegetationType
 Nenhum arquivo selecionado

Ainda na Figura 4.11 é possível identificar no canto lateral direito a representação gráfica dos obstáculos da rede caso seja cadastrado, facilitando a visualização de análise da topografia. Com os dados das estacas apresentados na Figura 4.11 em conjunto com a análise dos perfis planialtimétricos auxiliados pelos mapas interativos da Figura 4.10 em um mesmo local, se torna de grande aplicabilidade para análises dos serviços contratados tanto no meio

particular quanto pela concessionária de energia elétrica, podendo ser utilizado agregando ganho de produtividade e qualidade técnica à análise de projetos submetidos para aprovação.

Na Figura 4.12 possui um exemplo de um levantamento topográfico caracterizado como aprovado, onde pode-se avaliar também a veracidade dos dados topográficos cadastrados destacado em “vermelho”, através de uma análise do desvio padrão desses dados com os dados fornecidos pelo *Google Maps* destacados na cor “cinza”. Após a validação é necessário consolidar a caderneta aplicando uma pré-configuração que pode ser cadastrada na tela 4.13, se fazendo necessário para orientar a distribuição das estruturas do otimizador, como por exemplo utilizar maior número de estruturas de ancoragem nos pontos de locação obrigatória devido uma possível característica de uma rede com várias deflexões acentuadas no percurso da rede.

Figura 4.12. Consolidação dos Dados Topográficos. Fonte: próprio autor

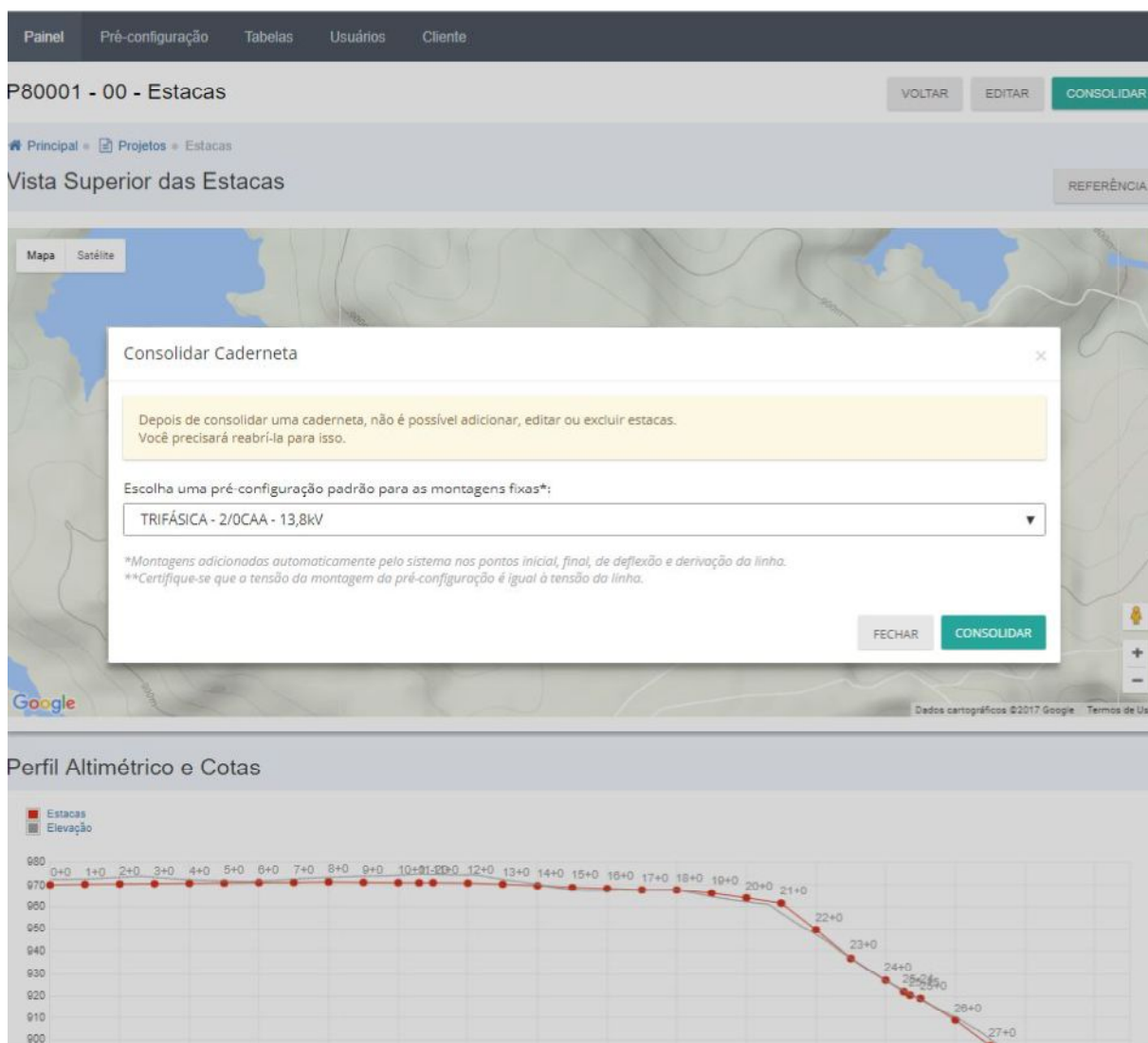


Figura 4.13. Pré-configurações de Montagens. Fonte: próprio autor

Editar Pré-configuração

Principal • Pré-configs

Nome: RD COM DEFLEXÕES 13,8kV - MON Fases: Monofásica Tipo de Poste: Concreto, 10.0m, Circular, 600.0daN

Rede Primária - Nível 1 Rede Primária - Nível 2 Rede Secundária

Tensão: 13.8kV

Tipo de Montagem: Normal Tipo de Estrutura: U4

Tipo de Isolador 1: Isolador Disco Vidro Tipo de Isolador 2: Selecione...

Tipo de Cruzeta: Selecione... Dimensão da Cruzeta: Selecione...

Tipo de Mão: Selecione...

SALVAR

4.4 Elaboração de Projeto de Uma Rede 3#2/0(1/0)CAA 13,8kV

Para o estudo de caso apresentado nessa seção, foi utilizado o projeto de uma rede de distribuição rural com extensão de 1550 metros em tensão de operação 13,8kV com aplicação de uma rede trifásica com cabo 2/0CAA e neutro 1/0CAA. Os dados topográficos utilizados foram apresentados na Seção 4.3 deste trabalho. Foi aplicada velocidade do vento para rede leve igual a 80km/h.

Após a consolidação dos dados topográficos, o processo computacional insere automaticamente as montagens nos pontos de locação obrigatória, sendo eles os pontos inicial e final da rede, deflexões de rede e derivações de ramais. Na Figura 4.14 pode-se observar a locação desses postes nos pontos de deflexão e extremidades da rede identificados nos mapas altimétrico e planimétrico, com opção de visualização do satélite mostrado na Figura 4.15. Essas imagens auxiliam na avaliação de locação dos postes, observando se os mesmos estão projetados em áreas de preservação ambiental por exemplo, podendo o analista realizar uma fiscalização *in loco* e/ou reprovar a locação proposta caso a locação esteja visualmente inapropriada.

Figura 4.14. Tela de Projeto de Montagens Eletromecânicas. Fonte: próprio autor

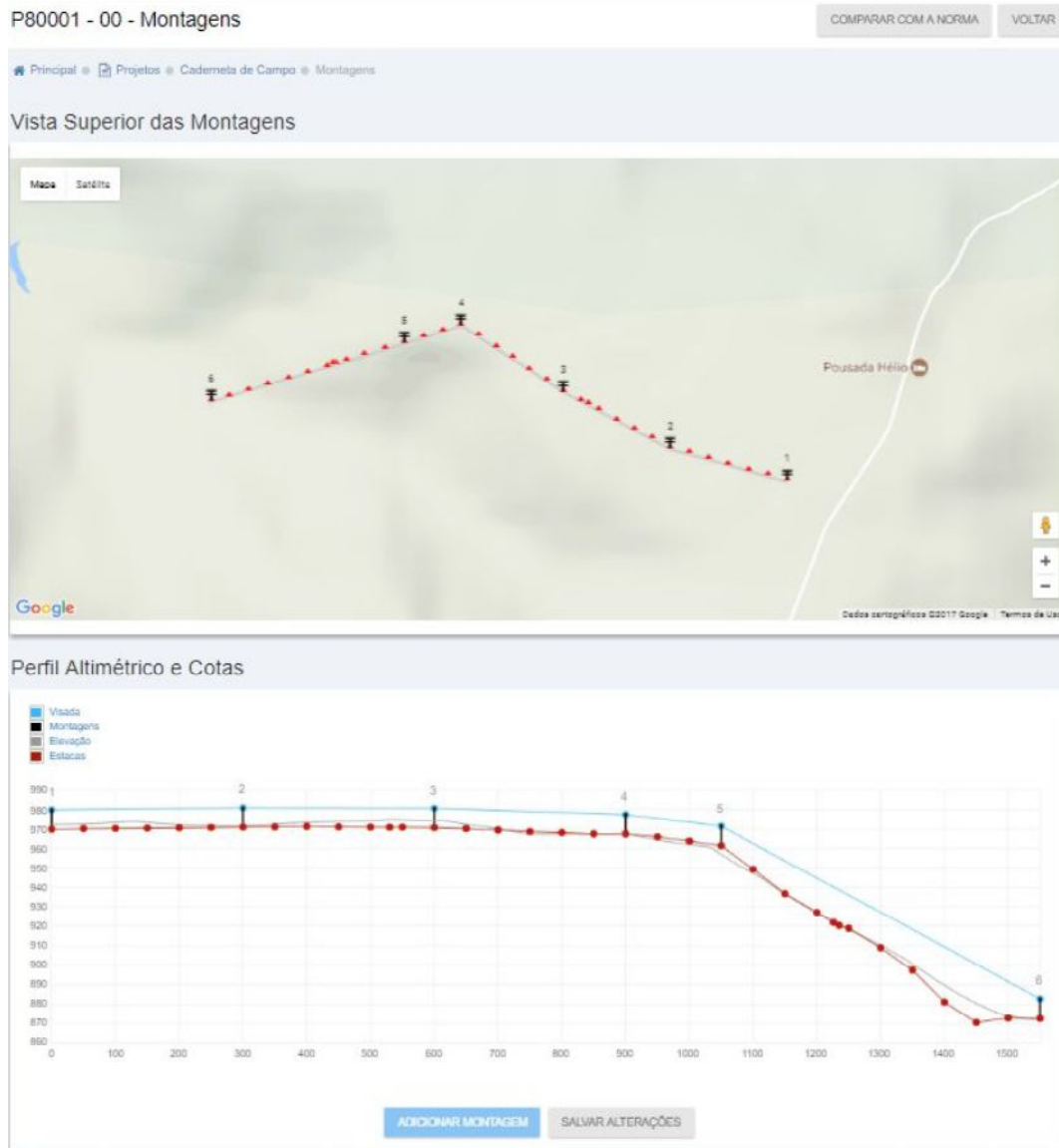


Figura 4.15. Mapa Satélite de Projeto de Montagens Eletromecânicas. Fonte: próprio autor

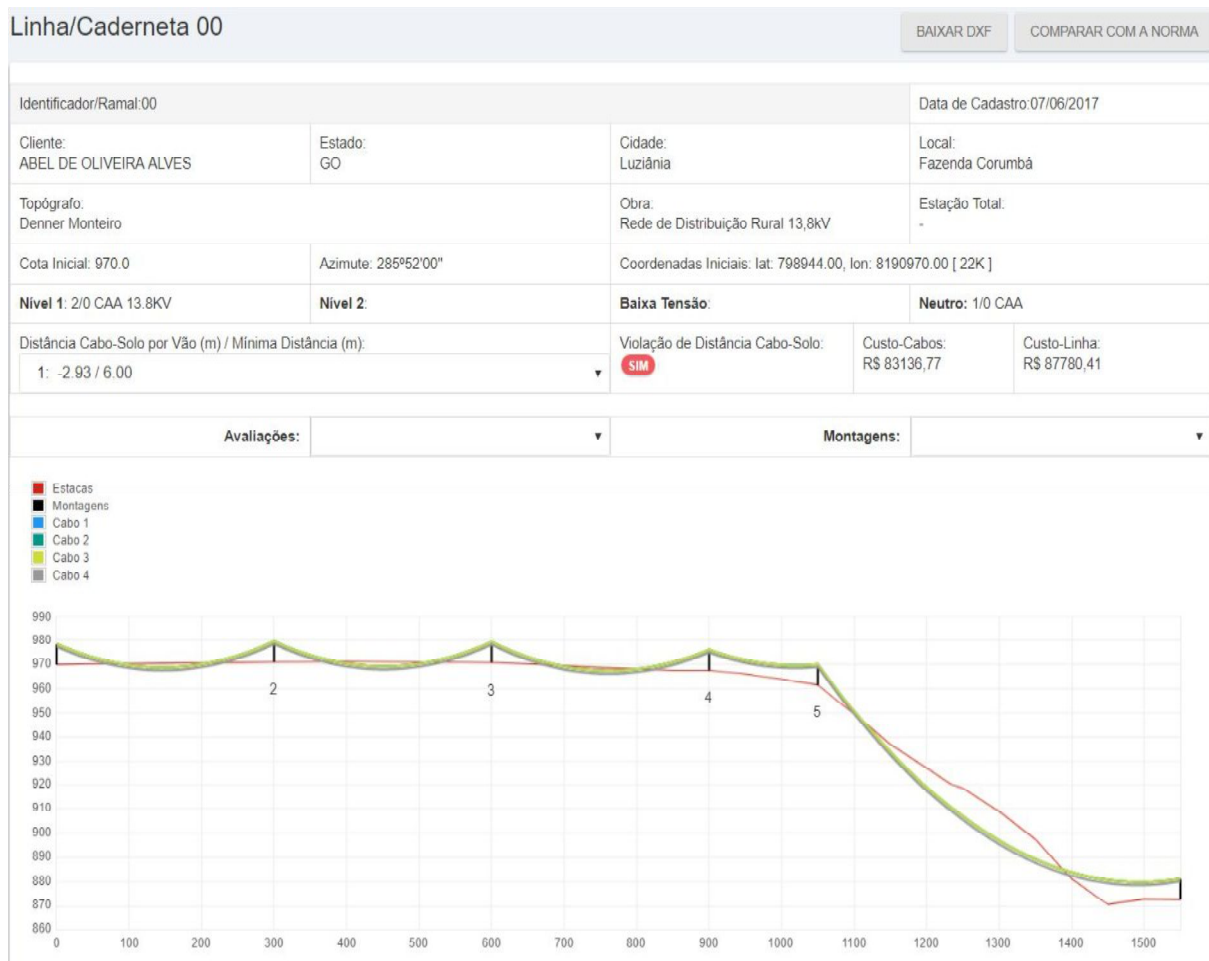


Após a locação das estruturas fixas, é permitido fazer uma avaliação ou otimização das montagens da rede de distribuição. Na Figura 4.16 é apresentada a tela de avaliação e otimização da rede em estudo com a edição dos parâmetros do Otimizador e definição as montagens disponíveis para as funções de avaliação. Ao utilizar o número de iterações com valor zero e marcando o item “Não incluir novas montagens”, será realizada a avaliação da rede sem que ocorra otimização e, portanto, neste caso não haverá modificação de nenhuma montagem, apenas sua avaliação mecânica.

Figura 4.16. Tela de Configuração da Avaliação e/ou Otimização. Fonte: próprio autor

Na Figura 4.17 é apresentado o resultado dessa avaliação com apenas as montagens fixas. Nessa avaliação, nota-se que a maioria dos esforços apresentaram restrição, e devido aos vãos estarem com grandes extensões, a distância cabo-solo em todos os vãos também é violada.

Figura 4.17. Rede de Distribuição Avaliada Apenas com Montagens Obrigatórias. Fonte: próprio autor



Retornando à Figura 4.16, adotando-se 1/10 para o desvio padrão apresentado em (11) do otimizador, 5000 iterações, com delta poste (inclusão/exclusão de poste) com valor de 30, desmarcando-se o item “Não incluir novas montagens” e utilizando apenas uma variável de decisão para postes circular 10/300 e estruturas como sendo N1 (maioria no decorrer da rede) a fim de agilizar o processo de otimização, após 33 minutos de processo computacional obteve-se a locação da Figura 4.18. Essa locação já não possui violação da distância cabo-solo devido à inserção de algumas estruturas no decorrer da rede pelo otimizador. Nota-se, porém, que devido à característica randômica do otimizador para posicionar as estruturas, estas podem não possuir uma distribuição uniforme, o que pode ser ajustado facilmente movendo as estruturas com o cursor em cima dos postes na vista altimétrica como mostra a Figura 4.19, ou também editando a abscissa nas montagens, podendo aplicar uma avaliação a posteriori. Reafirmando que, as montagens obrigatórias não podem ser movidas por esta funcionalidade.

Figura 4.18. Resultado do Processo de Otimização. Fonte: próprio autor

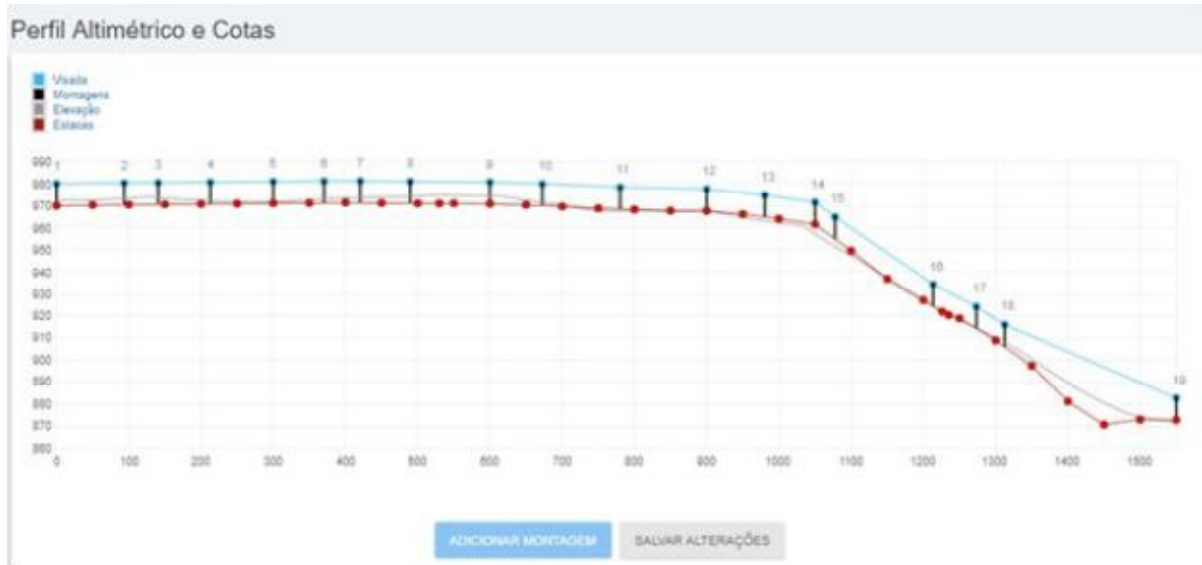
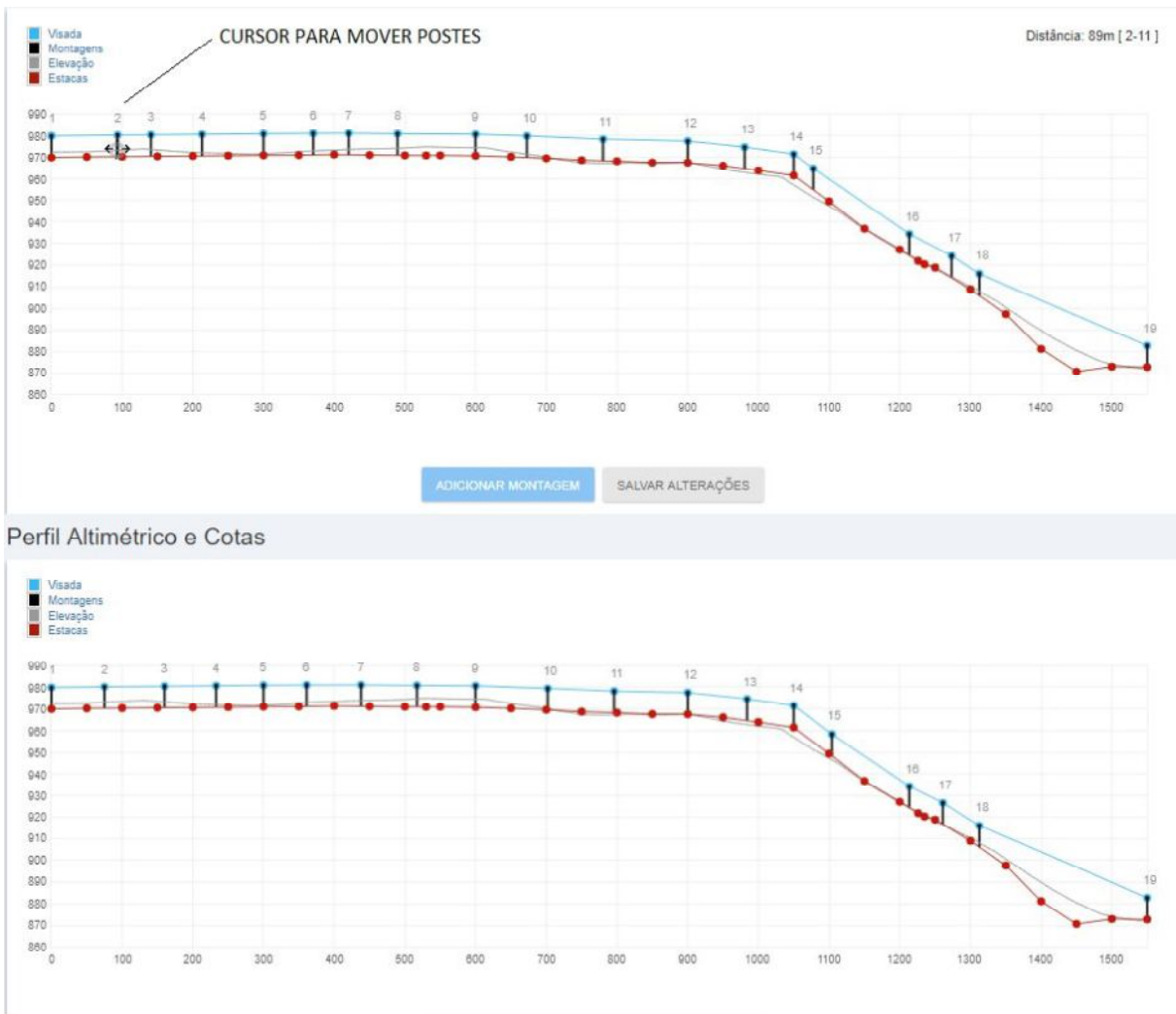


Figura 4.19. Resultado com Distribuição Uniforme dos Vãos entre Montagens. Fonte: próprio autor



Após realizar a avaliação da alteração ocorrida na Figura 4.19, no campo “avaliações” mostrado na Figura 4.20, é possível identificar as estruturas com violação por meio do caractere “ * ” em frente à estaca referente a montagem para ser localizado de maneira ágil.

Figura 4.20. Indicação das Restrições Ocorridas em uma Avaliação. Fonte: próprio autor

Linha/Caderneta 00	1: 0+0m 2: 1+25m 3: 3+10m * 4: 5-17m 5: 6+0m 6: 7+11m 7: 9-12m 8: 10+17m	MONTAGEM C/ RESTRIÇÃO
Identificador/Ramal 00		<input type="checkbox"/> CATENÁRIAS <input type="checkbox"/> DXF COMPARAR COM A NORMA
Cliente: ABEL DE OLIVEIRA ALVES		Data de Cadastro: 07/06/2017
Topógrafo: Denner Monteiro		Cidade: Luziânia Local: Fazenda Corumbá
Cota Inicial: 970.0		Obra: Rede de Distribuição Rural 13.8kV Estação Total: -
Nível 1: 2/0 CAA 13.8kV		Coordenadas Iniciais: lat: 790944.00, lon: 8190970.00 [22K]
Distância Cabo-Solo por Vão (m) / Mínima Dist:		Baixa Tensão: Neutro: 1/0 CAA Violação de Distância Cabo-Solo: NÃO Custo-Cabos: R\$ 82815.39 Custo-Linha: R\$ 115379.63
Avaliações:		Montagens:

Ao selecionar alguma dessas estacas nesse campo, são apresentados todos os resultados dos cálculos mecânicos e identificação da violação ocorrida como mostra o exemplo da Figura 4.21.

Figura 4.21. Resultados dos Cálculos Mecânicos de Uma Esturura. Fonte: próprio autor

00 - Montagem 1			
Momento no Engastamento (daN.m): [8231.99, -7768.90, -114.33]	Máximo Momento de Engastamento (daN.m): 6888.0	Resistência de Engastamento (daN.m): [4431.66]	Violação de Engastamento: SIM
Momento na Mão (daN.m): [61.34]	Máximo Momento na Mão (daN.m): [318.20]	Resistência na Mão (daN.m): [-256.86]	Violação na Mão: NÃO
Momento na Cruzeta (daN.m): [225.52]	Máximo Momento na Cruzeta (daN.m): [616.00]	Resistência na Cruzeta (daN.m): [-390.48]	Violação na Cruzeta: NÃO
Força no Isolador (daN): 1F: [0.00, 0.00, 0.00] 1C: [17.11, 285.83, -6.77] 2F: [0.00, 0.00, 0.00] 2C: [17.11, 285.83, -6.77] 3F: [0.00, 0.00, 0.00] 3C: [17.11, 285.83, -6.77]	Máxima Força no Isolador (daN): 1F: 5000.00 1C: 0.00 2F: 5000.00 2C: 0.00 3F: 5000.00 3C: 0.00	Resistência no Isolador (daN): 1F: -5000.00 1C: -4713.57 2F: -5000.00 2C: -4713.57 3F: -5000.00 3C: -4713.57	Violação no Isolador: NÃO
Fonte Nível 1 (daN): 1: [0.00, 0.00, 0.00] 2: [0.00, 0.00, 0.00] 3: [0.00, 0.00, 0.00]	Carga Nível 1 (daN): 1: [17.11, 285.83, -6.77] 2: [17.11, 285.83, -6.77] 3: [17.11, 285.83, -6.77]	Fonte Nível 2 (daN):	Carga Nível 2 (daN):
Fonte Nível 3 (daN):	Carga Nível 3 (daN):	Fonte Alta Tensão (daN):	Carga Alta Tensão (daN):
Fonte Secundária (daN):	Carga Secundária (daN):	Fonte Neutro (daN): [0.00, 0.00, 0.00]	Carga Neutro (daN): [19.09, 285.83, -7.55]
Engastamento Informado: Simples	Engastamento Recomendado: Concretado	Há Rompimento de Cabo? NÃO	Preço: R\$ 2671.69
Momento Máximo nos Estais: [[0.00, 0.00, 0.00]]	Restrições Violadas: 1		

Com todas as restrições não violadas, o projeto elaborado está concluído e pode ser apresentado para a concessionária para análise. A rede desejada pode ser visualizada na Figura 4.22, sendo mostrados com maior detalhe o primeiro vão na Figura 4.23, apresentando as alturas da fixação dos cabos na estrutura de derivação em segundo nível e também em uma estrutura de suspensão em tangência acima da altura do poste conforme descrito no Capítulo 3. A solução encontrada é exequível e, também pode ser considerada como mais econômica devido à observância de otimização dos vãos suas e alturas cabo-solo.

Figura 4.22. Resultados da Locação sem Restrição. Fonte: próprio autor

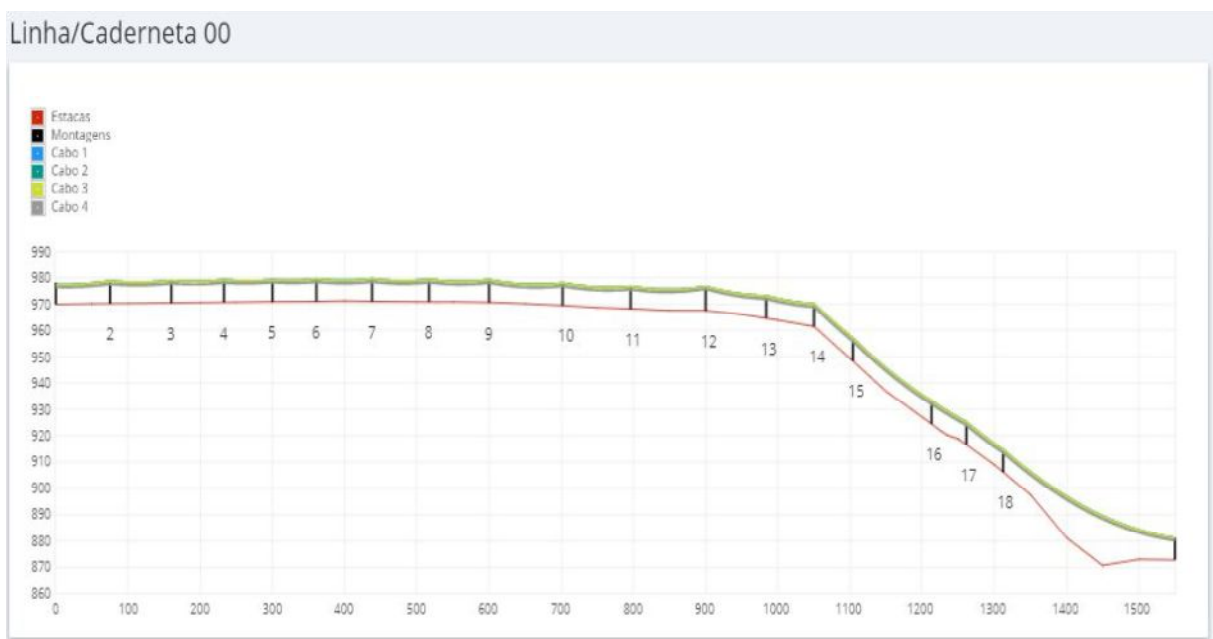
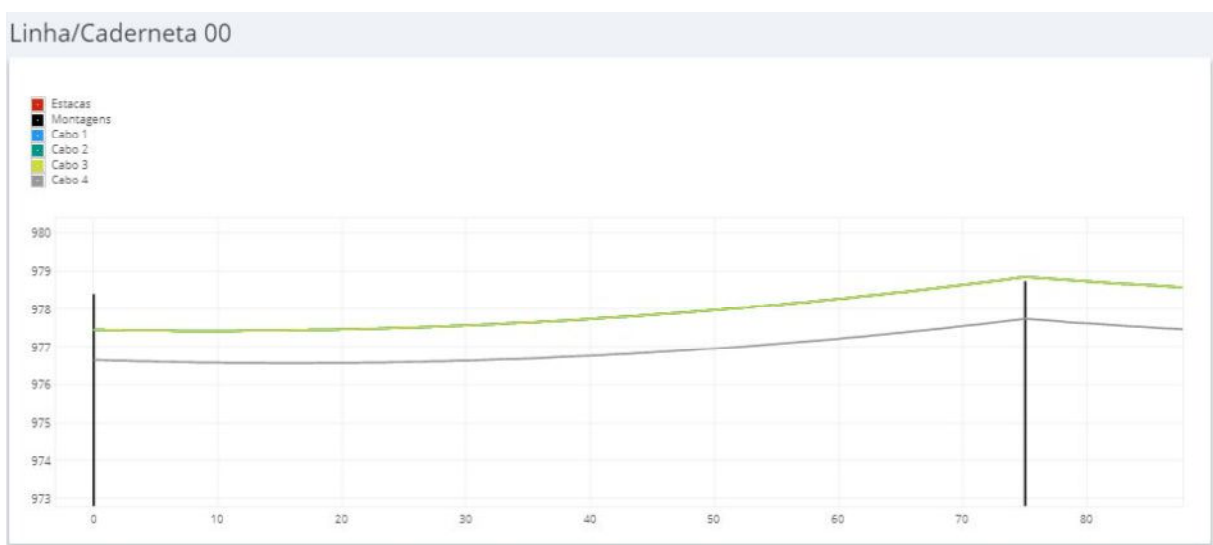


Figura 4.23. Detalhamento do Resultado Final no Primeiro Vão da Rede. Fonte: próprio autor



4.5 Elaboração de Projeto de uma Rede para Assentamento Rural

O atendimento dos assentamentos rurais, caracterizados como prioridade dentro do processo de universalização da energia elétrica, são redes que são caracterizadas por possuírem um grande número de atendimentos próximos uns aos outros, necessitando da elaboração de projeto com estrutura em formato de árvore conforme visto na Figura 3.14. A elaboração do projeto aplicado neste estudo possui um total de 09 atendimentos.

Para esse estudo de caso, foram utilizados a tensão de operação de 13,8kV e o projeto com as seguintes especificações:

- Ramal 00 – Extensão 2750 metros, rede trifásica cabo 4CAA;
- Ramal 01 – Extensão 300 metros, rede trifásica cabo 4CAA;
- Ramal 02 – Extensão 370 metros, rede monofásica cabo 4CAA;
- Ramal 03 – Extensão 525 metros, rede monofásica cabo 4CAA;
- Ramal 04 – Extensão 100 metros, rede monofásica cabo 4CAA;
- Ramal 05 – Extensão 110 metros, rede monofásica cabo 4CAA;
- Ramal 06 – Extensão 30 metros, rede monofásica cabo 4CAA;
- Ramal 07 – Extensão 100 metros, rede monofásica cabo 4CAA;
- Ramal 08 – Extensão 620 metros, rede monofásica cabo 4CAA;
- Ramal 09 – Extensão 15 metros, rede monofásica cabo 4CAA;

Para cada ramal foi instalado 1 transformador de 15kVA de acordo com a quantidade de fases de suas redes alimentadoras. Foram aplicados também, velocidade do vento para rede média igual a 100km/h e desvio padrão de 1/10.

Na Figura 4.24, ao cadastrar o levantamento topográfico da linha tronco principal de onde deriva-se os ramais, notou-se uma pequena variação na altimetria quando comparada aos dados do *Google Maps*, o que gera um erro pequeno também nos ramais. Porém, pode ser observado que os vales e morros seguem um padrão similar e, portanto, caso o profissional confirme que não há nenhum erro com relação aos ângulos verticais levantados, a topografia pode ser aprovada, mantendo a responsabilidade técnica registrada perante conselho pertinente.

Figura 4.24. Perfis Planimétrico e Altimétrico da Linha Principal. Fonte: próprio autor



Consolidando a caderneta como no exemplo anterior, são inseridos automaticamente os postes das extremidades da linha, os postes indicados como derivação de ramal e as deflexões conforme observado no perfil altimétrico da Figura 4.24.

No cadastro da linha principal, é necessário identificar as estacas onde possuem derivação de ramal. Após realizado o cadastro dessa caderneta e consolidá-la, no momento de cadastro dos dados iniciais do ramal, são mostrados no campo “Poste de Derivação” quais os

possíveis pontos de derivação conforme Figura 4.25. Essa funcionalidade evita que o usuário insira uma coordenada e cota altimétrica diferente da cadastrada na primeira caderneta, vinculando os dois pontos para correto cálculo das solicitações mecânicas naquela montagem.

Figura 4.25. Cadastro de Um Ramal Vinculado a uma Rede Fonte. Fonte: próprio autor

Editar Caderneta de Campo PROJETOS

Principal » Caderneta de Campo 09

Projeto	Identificador/Ramal		Data	
P80002	08		07/06/2017	
Cliente	Estado	Cidade	Local	
NILVAN FERREIRA DA ROCHA	GO	Minaçu	PA Água Quente	
Topógrafo	Obra	Cota Inicial		
Denner Monteiro	Rede de Distribuição Rural 13,8kV	423.11		
Estação Total	Azimute	Fuso	Coordenada X	Coordenada Y
Estação Total	090°11'06"	22	774207.92	8518718.61
Poste de Derivação*	Tipo de Circuito	Fases		Possui Rede Secundária?
8° - P80002 - 00 [52+0m]	Simplex	Monofásica		<input checked="" type="radio"/> Não <input type="radio"/> Sim

pré-existente (ramal). Nesse caso, selecione o ponto inicial na lista poste de derivação.
campo circuito de derivação preenchido.

1° - P80002 - 00 [3+0m]

2° - P80002 - 00 [10+0m]

3° - P80002 - 00 [20+0m]

4° - P80002 - 00 [28+0m]

5° - P80002 - 00 [34+0m]

6° - P80002 - 00 [40+0m]

7° - P80002 - 00 [48+0m]

8° - P80002 - 00 [52+0m]

9° - P80002 - 01 [3+0m]

Primária - Nível 2

Rede Secundária

Seção

Tensão

Neutro e Tipo de Estai

Seção

Resistência dos Estais

4 CAA

EstCord7 - 3160 daN

SALVAR

Essa funcionalidade também é aplicada quando temos a situação de um projeto de circuito duplo, onde pode ocorrer a derivação em um dos dois circuitos, ou também, quando termina um circuito duplo e eles se separam em duas redes de circuito simples, sendo necessário nesse caso do cadastro de três cadernetas distintas para serem vinculadas através dessa funcionalidade. Após consolidar a caderneta desses ramos, é necessário identificar qual circuito este está derivando na edição da montagem do ponto desejado como mostrado na Figura 4.26, que neste caso só estará habilitado o circuito nível 1 por não possuir circuito duplo.

Figura 4.26. Cadastro de Uma Montagem Vinculada a uma Rede Fonte. Fonte: próprio autor

Adicionar/Editar Montagem
✕

Pré-configuração*: ▼
Fixa? Sim Não

*Certifique-se que a tensão da montagem da pré-configuração é igual à tensão da linha.

Abscissa:

Tipo de Poste: Concreto, 10.0m, Duplo T, 300.0daN ▼

Engastamento: Simples ▼

Tem chave-faca? Sim Não

Número de Estais (longitudinais e laterais):

Posição da Montagem: Normal ▼

Tipo de Trafo: ▼

Tipo de Solo: Areia fina ▼

Circuito de Derivação: [Oculto] ▼

Rede Primária - Nível 1 [13.8kV]

Tipo de Montagem: Normal ▼

Tipo de Isolador 1: Isolador Disco Vidro ▼

Tipo de Cruzeta: Selecione... ▼

Tipo de Mão: Selecione... ▼

Tipo de Estrutura: U3 ▼

Tipo de Isolador 2: Selecione... ▼

Dimensão da Cruzeta: Selecione... ▼

SALVAR
CANCELAR

Após a consolidação dos nove ramais do projeto de rede de distribuição de energia elétrica desenvolvido, através do ícone “Mapa Geral” localizado em cada projeto cadastrado no “Painel”, é possível visualizar na Figura 4.27 a distribuição das redes cadastradas e avaliar se foi possível seguir os menores caminhamentos possíveis. Neste caso, observa-se que o arranjo é o ideal para a situação, caminhando em uma distância média próxima as casas a serem atendidas. Também no “Painel” no projeto cadastrado se localizam todos os ramais cadastrados, mostrado na Figura 4.28.

Figura 4.27. Visualização do Mapa Geral das Redes e Ramais. Fonte: próprio autor

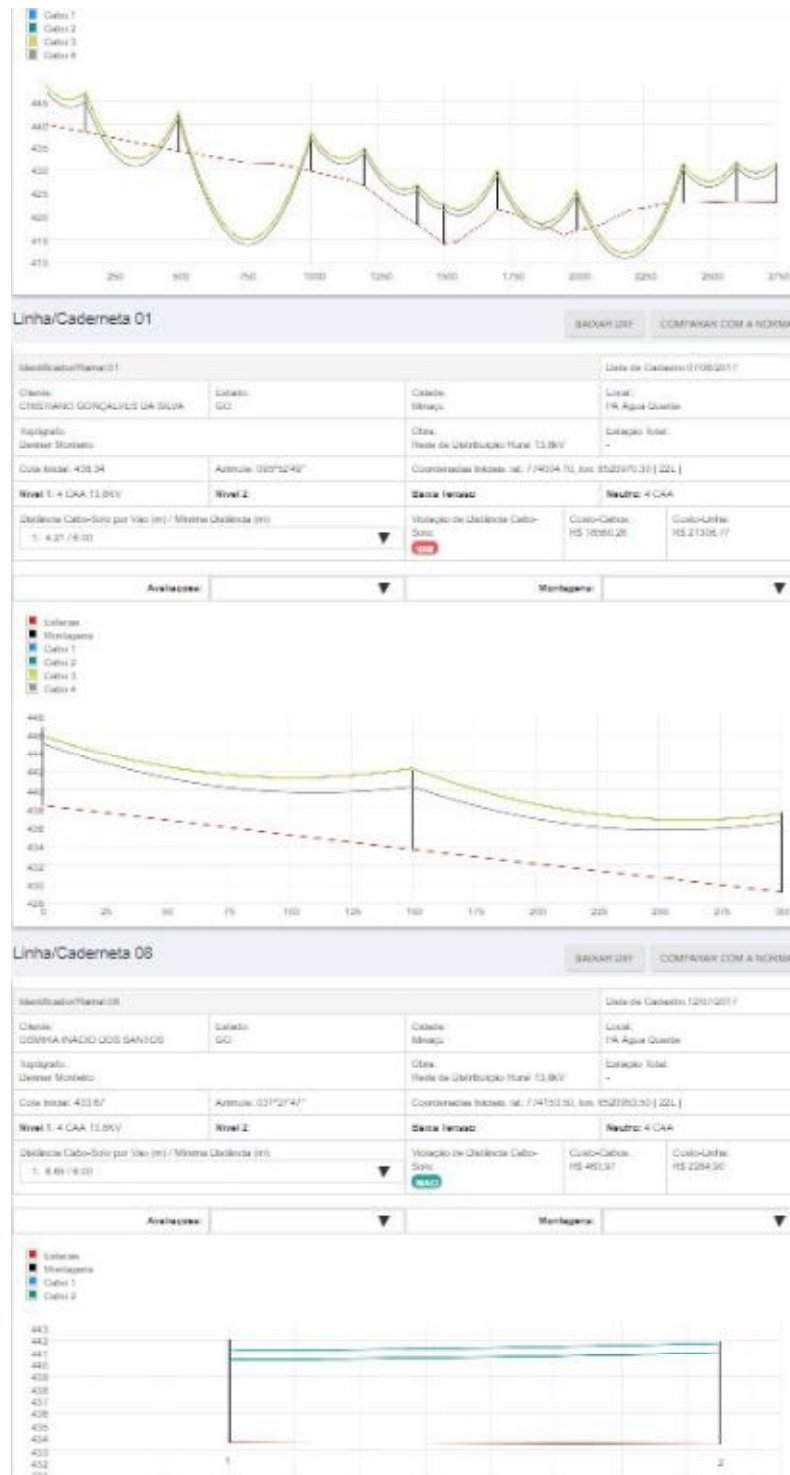


Figura 4.28. Ramais do Projeto do Estudo de Caso. Fonte: próprio autor

P80002 • Avaliar • Avaliação								
			Minaçu GO - PA Água Quente	00 07/06/2017 Topógrafo: Denner Monteiro				
			Minaçu GO - PA Água Quente	01 07/06/2017 Topógrafo: Denner Monteiro				
			Minaçu GO - PA Água Quente	09 07/06/2017 Topógrafo: Denner Monteiro				
			Minaçu GO - PA Água Quente	02 07/06/2017 Topógrafo: Denner Monteiro				
			Minaçu GO - PA Água Quente	03 07/06/2017 Topógrafo: Denner Monteiro				
			Minaçu GO - PA Água Quente	04 07/06/2017 Topógrafo: Denner Monteiro				
			Minaçu GO - PA Água Quente	05 07/06/2017 Topógrafo: Denner Monteiro				
			Minaçu GO - PA Água Quente	06 07/06/2017 Topógrafo: Denner Monteiro				
			Minaçu GO - PA Água Quente	07 07/06/2017 Topógrafo: Denner Monteiro				
			Minaçu GO - PA Água Quente	08 07/06/2017 Topógrafo: Denner Monteiro				

Assim como no estudo realizado na Seção 4.4, na Figura 4.29 a seguir, são apresentadas as flechas dos cabos violando as alturas cabo-solo apenas com os postes obrigatórios, sendo necessário a inclusão de mais estruturas para corrigir a violação de alguns ramais de rede.

Figura 4.29. Alguns Ramais Apenas com Montagens Obrigatórias. Fonte: próprio autor



Foi realizado um processo de otimização com aplicação de 5000 iterações com uma duração de processamento de 14 minutos. Na Figura 4.30 é possível verificar algumas linhas otimizadas obtiveram resultado favorável com a não violação das distâncias cabo-solo nesse processo. Na Figura 4.31 por sua vez, são mostradas as catenárias da “Linha/Caderneta 00” após a otimização. Nota-se a inserção de montagens com relação à solução inicial da Figura 4.29 realizado pelo processo de otimização a fim de convergir para uma solução que não possua restrição tanto de cálculo mecânico quanto em relação as alturas mínimas permitidas.

Figura 4.30. Linhas Otimizadas. Fonte: próprio autor

Linha/Caderneta 00				CATENÁRIAS	DXF	COMPARAR COM A NORMA
Identificador/Ramal:00				Data de Cadastro:07/06/2017		
Cliente: JOÃO ISAIAS DA COSTA	Estado: GO	Cidade: Minaçu	Local: PA Água Quente			
Topógrafo: Denner Monteiro		Obra: Rede de Distribuição Rural 13,8KV		Estação Total: -		
Cota Inicial: 440.0	Azimute: 156°43'08"	Coordenadas Iniciais: lat: 773946.00, lon: 8521108.00 [22L]				
Nível 1: 4 CAA 13.8KV	Nível 2:	Baixa Tensão:		Neutro: 4 CAA		
Distância Cabo-Solo por Vão (m) / Mínima Distância (m): 1: 6.42 / 6.00		Violação de Distância Cabo-Solo: NÃO	Custo-Cabos: R\$ 170047,42	Custo-Linha: R\$ 174211,23		
Avaliações:		Montagens:				

Linha/Caderneta 01				CATENÁRIAS	DXF	COMPARAR COM A NORMA
Identificador/Ramal:01				Data de Cadastro:07/06/2017		
Cliente: CRISTIANO GONÇALVES DA SILVA	Estado: GO	Cidade: Minaçu	Local: PA Água Quente			
Topógrafo: Denner Monteiro		Obra: Rede de Distribuição Rural 13,8KV		Estação Total: -		
Cota Inicial: 438.34	Azimute: 095°52'49"	Coordenadas Iniciais: lat: 774004.10, lon: 8520970.30 [22L]				
Nível 1: 4 CAA 13.8KV	Nível 2:	Baixa Tensão:		Neutro: 4 CAA		
Distância Cabo-Solo por Vão (m) / Mínima Distância (m): 1: 6.50 / 6.00		Violação de Distância Cabo-Solo: NÃO	Custo-Cabos: R\$ 18557,31	Custo-Linha: R\$ 22634,38		
Avaliações:		Montagens:				

Linha/Caderneta 02				CATENÁRIAS	DXF	COMPARAR COM A NORMA
Identificador/Ramal:02				Data de Cadastro:07/06/2017		
Cliente: ANTONIO MARTINS DA COSTA	Estado: GO	Cidade: Minaçu	Local: PA Água Quente			
Topógrafo: Denner Monteiro		Obra: Rede de Distribuição Rural 13,8KV		Estação Total: -		
Cota Inicial: 434.18	Azimute: 241°21'54"	Coordenadas Iniciais: lat: 774139.99, lon: 8520649.11 [22L]				
Nível 1: 4 CAA 13.8KV	Nível 2:	Baixa Tensão:		Neutro: 4 CAA		
Distância Cabo-Solo por Vão (m) / Mínima Distância (m): 1: 7.08 / 6.00		Violação de Distância Cabo-Solo: NÃO	Custo-Cabos: R\$ 11443,11	Custo-Linha: R\$ 17123,50		
Avaliações:		Montagens:				

Figura 4.31. Localização da Linha Otimizada. Fonte: próprio autor



Uma característica peculiar desse tipo de projeto ocorre com relação ao cálculo das montagens das derivações dos ramais da linha principal. Neste caso a montagem localizada na derivação do ramal possui os mesmos cálculos mecânicos do mesmo ponto na linha principal sendo calculado os esforços da rede do ramal e também dos esforços laterais incididos na estrutura da linha principal. Esse cálculo é praticamente desconsiderado na elaboração de projetos atuais, onde é tratado de forma separada, não se considerando a influência mecânica de uma linha na outra.

Na Figura 4.32 e 4.33 é possível verificar após a otimização do mesmo ponto em linhas separadas: Montagem 21 da linha 00 e montagem 01 da linha 07, obtendo com os mesmos resultados devido a unicidade e cálculo de todos os esforços solicitantes para as duas situações simultaneamente.

Figura 4.32. Resultados Mecânicos da Montagem 21 da Linha 00. Fonte: próprio autor

00 - Montagem 21			
Momento no Engastamento (daN.m): [-3663.73, -9844.50, 0.00]	Máximo Momento de Engastamento (daN.m): 9156.0	Resistência de Engastamento (daN.m): [0.00]	Violação de Engastamento: NÃO
Momento na Mão (daN.m): [77.75]	Máximo Momento na Mão (daN.m): [318.20]	Resistência na Mão (daN.m): [-240.44]	Violação na Mão: NÃO
Momento na Cruzeta (daN.m): [7.02]	Máximo Momento na Cruzeta (daN.m): [616.00]	Resistência na Cruzeta (daN.m): [-608.98]	Violação na Cruzeta: NÃO
Força no Isolador (daN): 1 _f : [19.68, 0.00, -12.52] 1 _c : [0.00, 0.00, 0.00] 2 _f : [19.68, 0.00, -12.52] 2 _c : [0.00, 0.00, 0.00] 3 _f : [19.68, 0.00, -12.52] 3 _c : [0.00, 0.00, 0.00] 4 _f : [149.00, 142.87, -10.24] 4 _c : [0.00, 0.00, 0.00]	Máxima Força no Isolador (daN): 1 _f : 1360.00 1 _c : 0.00 2 _f : 1360.00 2 _c : 0.00 3 _f : 1360.00 3 _c : 0.00 4 _f : 1360.00 4 _c : 0.00	Resistência no Isolador (daN): 1 _f : -1336.67 1 _c : 0.00 2 _f : -1336.67 2 _c : 0.00 3 _f : -1336.67 3 _c : 0.00 4 _f : -1153.31 4 _c : 0.00	Violação no Isolador: NÃO

Figura 4.33. Resultados Mecânicos da Montagem 01 da Linha 07. Fonte: próprio autor

07 - Montagem 1			
Momento no Engastamento (daN.m): [-3663.73, -9844.50, 0.00]	Máximo Momento de Engastamento (daN.m): 9156.0	Resistência de Engastamento (daN.m): [0.00]	Violação de Engastamento: NÃO
Momento na Mão (daN.m): [77.75]	Máximo Momento na Mão (daN.m): [318.20]	Resistência na Mão (daN.m): [-240.44]	Violação na Mão: NÃO
Momento na Cruzeta (daN.m): [7.02]	Máximo Momento na Cruzeta (daN.m): [616.00]	Resistência na Cruzeta (daN.m): [-608.98]	Violação na Cruzeta: NÃO
Força no Isolador (daN): 1 _f : [19.68, 0.00, -12.52] 1 _c : [0.00, 0.00, 0.00] 2 _f : [19.68, 0.00, -12.52] 2 _c : [0.00, 0.00, 0.00] 3 _f : [19.68, 0.00, -12.52] 3 _c : [0.00, 0.00, 0.00] 4 _f : [149.00, 142.87, -10.24] 4 _c : [0.00, 0.00, 0.00]	Máxima Força no Isolador (daN): 1 _f : 1360.00 1 _c : 0.00 2 _f : 1360.00 2 _c : 0.00 3 _f : 1360.00 3 _c : 0.00 4 _f : 1360.00 4 _c : 0.00	Resistência no Isolador (daN): 1 _f : -1336.67 1 _c : 0.00 2 _f : -1336.67 2 _c : 0.00 3 _f : -1336.67 3 _c : 0.00 4 _f : -1153.31 4 _c : 0.00	Violação no Isolador: NÃO

5. Conclusões

O método computacional desenvolve uma metodologia de dimensionamento mecânico através de otimizações computacionais, integrando os critérios descritos nas normas técnicas, elaborando e propondo soluções para projetos de redes de distribuição elétrica buscando otimização técnica e orçamentária. Evitando a necessidade de grandes intervenções por parte dos usuários, otimizando e uniformizando projetos, além de, diminuir os equívocos de elaboração e possíveis divergências com as normas técnicas vigentes, além de proporcionar ganho produtividade significativa na elaboração e análise dos projetos.

A aplicação do método em plataforma web busca melhorar os processos e trâmites de análise de levantamentos topográficos e projetos para fins de rede de distribuição de energia elétrica, diminuindo o tempo de análise e evitando deslocamentos desnecessários com reprovação dos serviços de campo, permitindo uma interação por todos os envolvidos na elaboração dos projetos com atualização dos dados cadastrados em tempo real.

A utilização de uma interface gráfica atualizada com aplicação dos mapas da *Google Maps JavaScript API* simultaneamente com o cadastro dos dados de levantamentos topográficos, auxiliando os analistas de projetos a identificarem situação indesejadas que culminam na reprovação dos projetos, como a presença de obstáculos, edificações, áreas de preservação ambiental, dentre outros, no decorrer do caminhamento de uma rede. A utilização dessa funcionalidade permite também, uma análise comparativa dos dados altimétricos do terreno, garantido a qualidade técnica dos projetos.

O uso da técnica de otimização de *Hill Climbing*, proporciona uma avaliação técnica-orçamentária robusta aplicada a problemática da elaboração de projetos, de forma a buscar interação entre as funções de avaliação, utilizando algoritmo multiobjetivo que busca as soluções com menores violações até chegar a uma solução ótima ou quase ótima, além de utilizar em conjunto a regra do 1/5 para controle do passo de variação das soluções proporcionando uma convergência mais rápida. O ganho de produtividade com aplicação do método proposto se intensifica quanto maior for o número e extensão das redes.

Como sugestão para projetos futuros, cabe ressaltar a viabilidade da extensão da ferramenta para redes de distribuição de energia elétrica do tipo compacta, e ainda, devido ao tipo dos cálculos mecânicos utilizados para o desenvolvimento desse trabalho, é possível

desenvolver o dimensionamento e locação de linhas de transmissão de energia elétrica para níveis de alta tensão.

O método se mostrou adequado ao processo de elaboração de projeto, otimizando tempo de resposta nas diversas etapas e interação dos diversos profissionais envolvidos, calculando iterativamente cada situação proposta nas avaliações mecânicas que exigiram grande esforço sem auxílio computacional.

6. Referências Bibliográficas

MONTEIRO, Claudio; RAMIREZ-ROSADO Ignácio J.; MIRANDA, Vladimiro; ZORZANO-SANTAMARIA, Pedro J.; GARCÍA-GARRIDO, Eduardo; FERNANDEZ-JIMENEZ, L. Alfredo. **GIS spatial analysis applied to electric line routing optimization**. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 934-942, 2005.

SHU, Jun; WU, Lei; LI, Zuyi; SHAHIDEHPOUR, Mohammad; ZHANG, Lizi; HAN, Bing. "A New Method for Spatial Power Network Planning in Complicated Environments". *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, no. 1, pp. 381-389, 2012.

KIESSLING, Friedrich; NEFZGER, Peter; NOLASCO, João F.; KAJNTZYK, Ulf. **Overhead Power Lines Planning, Design, Construction**. Editora Springer, 2003.

LABEGALINI, Paulo Roberto; LABEGALINI, José Ayrton; FUCHS, Rubens Dario; ALMEIDA, Márcio Tadeu. **Projetos Mecânicos das Linhas Aéreas de Transmissão**. Editora Blucher 2ª Edição, 1992.

COELHO JÚNIOR, José Machado; ROLIM NETO, Fernando Cartaxo; ANDRADE, Júlio da Silva C.O. **Topografia Geral**. EDUFRPE - Recife, 2014.

KOENIG VEIGA, Luis Augusto; ZANETTI, Maria Aparecida Z.; FAGGION, Pedro Luis. **Fundamentos de Topografia**. Engenharia Cartográfica e de Agrimensura – UFPR, 2012.

GARCIA, G. J. e PIEDADE, G. C. R. - **Topografia Aplicada às Ciências Agrárias** - Livraria Nobel SA, 1984.

IBGE. **Sistema Geodésico de Referência em Uso Hoje no Brasil**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/pmrg/faq.shtm#1>>. Acesso em: 14 jun. 2017.

GOOGLE. **Tipos de Mapas Google Maps JavaScript API**. Disponível em <<https://developers.google.com/maps/documentation/javascript/maptypes?hl=pt-br>>. Acesso em: 14 jun. 2017.

MATHWORKS. **Conversão de Coordenadas latitude/longitude em UTM (WGS84)**. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/10915-deg2utm>>. Acesso em: 16 de jun. 2017.

NBR 7270. **Cabos de Alumínio Nus com Alma de Aço Zincado para Linhas Aéreas – Especificação**. ABNT, 2009.

NBR 7271. **Cabos de Alumínio Nus para Linhas Aéreas – Especificação**. ABNT, 2009.

NBR 7272. **Condutores Elétricos de Alumínio - Ruptura e Característica Dimensional**. ABNT, 2014.

RTD 23. Metodologia de Cálculo de Estruturas Para Linhas Aéreas de Distribuição. Comitê de Distribuição - CODI. 1980

NBR 15688. Redes de Distribuição Aérea de Energia Elétrica com Condutores Nus. ABNT, 2009.

NBR 5422. Projetos de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica. ABNT, 1985.

CEPEL. Dimensionamento Mecânico de Redes Elétricas Rurais (Versão 1.0). ELETROBRÁS, 2001.

WILLIAMS, Alan. Structural Analysis: In Theory and Practice. Elsevier, 2009.

NTC 01. Postes de Concreto Armado para Redes de Distribuição e de Transmissão - Especificação e Padronização - REV 4. CELG D, 2014

NTC 07. Critérios de Projetos de Redes de Distribuição Aéreas Rurais - Classes 15 e 36,2 kV - REV 1. CELG D, 2016

NTC 18. Estruturas para Redes Aéreas Isoladas em Tensão Secundária de Distribuição. CELG D, 2006

MICHALEWICZ, Z e FOGEL, D. B. How to Solve It: Modern Heuristics - 2ª ed. Springer, 2004.