



CURSO SUPERIOR DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

RAMON ALMEIDA DE CARVALHO

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
PLANILHA PARA CÁLCULO DE ESFORÇO MECÂNICO RESULTANTE EM
POSTES DE REDES AÉREAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

**JOÃO PESSOA
2023**

RAMON ALMEIDA DE CARVALHO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal da Paraíba como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Orientador: Franklin Martins Pereira Pamplona, Dr.

João Pessoa
2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Nilo Peçanha do IFPB, *campus* João Pessoa

C331p Carvalho, Ramon Almeida de.

Planilha para cálculo de esforço mecânico resultante em postes de redes aéreas de distribuição de energia elétrica / Ramon Almeida de Carvalho. - 2023.

38 f. : il.

TCC (Graduação - Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Instituto Federal de Educação da Paraíba / Unidade Acadêmica de Processos Industriais, 2023.

Orientação : Prof^o D.r Franklin Martins Pereira Pamplona.

1. Rede de distribuição de energia elétrica. 2. Engenharia elétrica. 3. Projeto de distribuição. 4. Tração mecânica. 5. Cálculo de esforço. I. Título.

CDU 621.3.05(043)

Lucrecia Camilo de Lima
Bibliotecária - CRB 15/132

Ramon Almeida de Carvalho

Planilha para cálculo de esforço mecânico resultante em postes de redes aéreas de distribuição de energia elétrica

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal da Paraíba como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Documento assinado digitalmente
 DIANA MORENO NOBRE
Data: 15/03/2023 07:00:12-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Diana Moreno Nobre, Dra.
Examinadora, IFPB

Documento assinado digitalmente
 ALAN MELO NOBREGA
Data: 15/03/2023 08:09:13-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Alan Melo Nobrega, Dr.
Examinador, IFPB

Documento assinado digitalmente
 FRANKLIN MARTINS PEREIRA PAMPLONA
Data: 14/03/2023 18:14:23-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Franklin Martins Pereira Pamplona, Dr.
Professor Orientador, IFPB

João Pessoa, 08/02/2023

Agradecimentos

A Deus, por ter permitido que eu tivesse saúde e determinação para não desanimar durante a realização deste trabalho.

Aos meus pais, minha irmã e a minha esposa, que me incentivaram nos momentos difíceis e compreenderam a minha ausência enquanto eu me dedicava a realização deste trabalho.

Aos professores, por todos os conselhos, pela ajuda e pela paciência com a qual guiaram o meu aprendizado.

Às pessoas com quem convivi ao longo desses anos de curso, que me incentivaram e que certamente tiveram impacto na minha formação acadêmica.

Aos meus colegas de turma, por compartilharem comigo tantos momentos de descobertas e aprendizado e por todo o companheirismo ao longo deste percurso.

Ao IFPB, essencial no meu processo de formação profissional, pela dedicação, e por tudo o que aprendi ao longo dos anos do curso.

*“Nunca existiu uma grande inteligência sem uma veia de loucura.
(Aristóteles)*

Resumo

Neste trabalho apresenta-se o processo de construção de uma planilha de cálculo, elaborada com o intuito de auxiliar no dimensionamento de postes em projetos de redes aéreas de distribuição. A motivação desse estudo teve base no esforço e tempo requeridos na realização dos cálculos dos esforços mecânicos incidentes nos postes, que em geral é exaustivamente repetido no mesmo projeto. A planilha foi elaborada para utilização em projetos de redes padronizadas de distribuição de energia elétrica de média e baixa tensão, que constam nas Normas de Distribuição Unificadas disponibilizadas pelas concessionárias do grupo Energisa. O cálculo dos esforços mecânicos incidentes nos postes e do vetor resultante são desenvolvidos na planilha de cálculo, em que constam os diversos tipos de postes e de redes típicas das concessionárias do grupo Energisa.

Palavras-chaves: Rede de Distribuição; Engenharia Elétrica; Projeto de Distribuição; Tração Mecânica; Cálculo de Esforço.

Lista de abreviaturas e siglas

BT	Baixa tensão
MT	Média tensão
NDU	Norma de Distribuição Unificada
ABRADEE	Associação Brasileira dos Distribuidores de Energia Elétrica

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Justificativa	2
1.2	Objetivo	2
1.3	Objetivos Específicos	3
1.4	Estrutura do trabalho	3
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
2.1	Elementos da Rede de Distribuição	4
2.1.1	Condutores	4
2.1.1.1	Cabos Nus	5
2.1.1.2	Cabos Isolados	6
2.1.1.2.1	Isolamento	6
2.1.2	Postes	7
2.1.3	Estruturas de Distribuição	9
3	DESENVOLVIMENTO	12
3.1	Desenvolvimento da Planilha	12
3.1.1	Média Tensão	13
3.1.2	Baixa Tensão	14
3.2	Embasamento Matemático	15
3.2.1	Vão Regulador	16
3.2.2	Flecha	16
3.3	Tração Total	17
3.3.1	Tração do Condutor	17
3.3.2	Tração do vento	18
3.3.3	Transferência do Esforço para o Topo do Poste	20
3.4	Layout da planilha	21
3.5	Exemplos de utilização da planilha	22
3.5.1	Poste com Derivação de Rede Média Tensão	23
3.5.2	Poste com Derivação de Rede Baixa Tensão	24
3.5.3	Poste em Fim de Rede	26
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	29
	REFERÊNCIAS	30

1 Introdução

O sistema de distribuição de energia é aquele que se confunde com a própria topografia das cidades, ramificado ao longo de ruas e avenidas para conectar fisicamente o sistema de transmissão, ou mesmo unidades geradoras de médio e pequeno porte, aos consumidores finais da energia elétrica (ABRADEE, 2023). A Figura 1 traz uma representação simples de um típico sistema elétrico de potência.

Figura 1 – Sistema elétrico de potência.



FONTE: <https://www.abradee.org.br/setor-de-distribuicao/a-distribuicao-de-energia/>

O sistema elétrico de potência é composto por três partes principais: a geração, a transmissão e a distribuição. De acordo com a Agência Internacional de Energia (2019), a geração é realizada por usinas de energia elétrica, que convertem diferentes formas de energia em energia elétrica. A transmissão é realizada por linhas de transmissão que transportam a eletricidade gerada das usinas para as subestações, onde a tensão é reduzida para ser distribuída nas cidades e áreas rurais. A distribuição é realizada por redes de distribuição que levam a eletricidade das subestações para os consumidores finais.

Para garantir a segurança e a eficiência do sistema de distribuição elétrica, são adotados diversos padrões e normas, como a NBR 5410, que estabelece as condições mínimas exigíveis para a instalação elétrica de baixa tensão, e a NBR 14039, que trata da instalação e do funcionamento de sistemas elétricos de média tensão. Conforme destaca a Agência Nacional de Energia Elétrica (2020), essas normas são essenciais para garantir a segurança e a qualidade da energia elétrica distribuída.

O sistema de distribuição é composto por postes, estruturas de sustentação, equipamentos como transformadores e chaves, sistemas de controle e condutores para o transporte dessa energia.

No grupo Energisa, as redes de distribuição das concessionárias de distribuição são compostas pelas redes de média tensão, com tensões de 13,8 kV até 34,5 kV, e redes de baixa tensão, com tensões de redes de 380 V a 127 V.

1.1 Justificativa

No Brasil, todo e qualquer cidadão tem direito ao serviço público de energia elétrica. Com o crescimento constante de áreas urbanas e rurais, as concessionárias precisam estar constantemente expandindo suas redes de distribuição de energia elétrica.

Para realizar essas expansões é necessário a elaboração de projetos de rede de distribuição, que requerem o cálculo de esforços mecânicos nos postes. O cálculo de esforço mecânico resultante é essencial para o correto dimensionamento dos postes. Essa tarefa, para um único poste, demanda certo tempo. Porém, em um único projeto, a depender do tamanho e do traçado da rede, podemos ter dezenas de pontos em que se faz necessário realizar esse cálculo.

Dessa forma, visando facilitar o trabalho do projetista, foi proposta a elaboração de uma planilha de cálculo de esforço, tendo como entradas de dados, dentre outras informações, tipo e tração das redes de média e baixa tensão ancorados ao poste, comprimentos dos vãos, etc. A principal saída de dados é o esforço e a angulação do vetor resultante do esforço, que irá possibilitar o correto dimensionamento do poste.

1.2 Objetivo

O objetivo geral desse Trabalho de Conclusão de Curso é elaborar uma planilha de cálculo que servirá como ferramenta para o auxílio do dimensionamento do esforço mecânico em redes de média e baixa tensão.

Esse cálculo leva em consideração as características físicas dos condutores da rede de distribuição e o vento da região de projeto e tem como foco garantir a integridade da mesma. Os aspectos necessários dos condutores para os cálculos, em sua grande maioria, podem ser encontrados nas normas de distribuição que as concessionárias fornecem ou, obtidos junto aos fabricantes dos componentes da rede.

1.3 Objetivos Específicos

Para chegar ao final planejado, foi necessária a realização de objetivos menores, listados abaixo:

- Revisão bibliográfica de normas correlatas ao cálculo mecânico de estruturas;
- Revisão das normas de distribuição de rede urbana e rural, do grupo Energisa (NDUs 004, 005, 006 e 007);
- Criação uma planilha que tenha como entrada especificações dos condutores e tenha como saída o vetor resultante do esforço mecânico;
- Elaboração de visualização gráfica do vetor resultante em relação ao poste e condutores de média e baixa tensão.

A revisão bibliográfica sobre o cálculo do esforço em postes tem como intuito adquirir um bom embasamento para a construção da planilha. Com base na literatura técnica e conhecendo as formulações matemáticas necessárias para o cálculo de esforços mecânicos, aplicar de forma adequada as equações numa típica planilha de cálculo empregando o software *Microsoft Excel*.

1.4 Estrutura do trabalho

Esse trabalho é dividido em quatro capítulos. O primeiro capítulo aborda uma breve introdução sobre o desenvolvimento do trabalho no contexto das redes de distribuição. Logo em seguida, no segundo capítulo uma breve fundamentação teórica é apresentada, na qual se destacam os elementos da rede de distribuição. O terceiro capítulo descreve o desenvolvimento, onde são mostrados os passos executados na elaboração da planilha de cálculo, seguindo de alguns exemplos típicos de utilização. Por fim, no quarto capítulo apresentam-se as considerações finais e sugestões de melhorias para a planilha em trabalhos futuros.

2 Fundamentação Teórica

O sistema de distribuição é composto pelos postes, estruturas de sustentação, condutores e equipamentos - tais como chaves fusíveis e transformadores. Os sistemas de distribuição podem ser aéreos ou subterrâneos, ambos os tipos com suas vantagens e desvantagens.

2.1 Elementos da Rede de Distribuição

De forma sucinta, podemos elencar os principais elementos que compõem as redes de distribuição como sendo:

- Condutores;
- Postes;
- Estruturas.

2.1.1 Condutores

O condutor de energia é o meio pelo qual se transporta potência de um ponto, a fonte, a outro, o terminal do consumidor. Atualmente os condutores mais utilizados são fabricados a partir de dois materiais principais: o alumínio e o cobre.

Os condutores de alumínio predominam para aplicações de redes e linhas aéreas de distribuição devido a seu baixo custo, quando comparado a condutores de cobre, sua relação peso por área e seu comportamento frente aos esforços mecânicos (MAMEDE, 2013).

Os condutores podem ser fabricados de diversas maneiras, a depender de sua aplicação. Nas redes de distribuição é comum a utilização de cabos condutores compostos por diversos fios com encordoamento concêntrico, constituído de uma ou mais camadas.

Podemos classificar os cabos condutores em dois tipos:

- Cabos nus;
- Cabos isolados.

2.1.1.1 Cabos Nus

Os cabos nus são muito utilizados em redes aéreas de distribuição, tanto urbanas quanto rurais, podendo ser fabricados tanto de cobre como de alumínio (Mamede, 2013).

Em sua grande maioria, nas redes de distribuição, os cabos de alumínio são mais utilizados que os cabos de cobre, com a exceção de áreas próximas à orla marítima, onde é indicado o uso do cobre por ser mais resistente à corrosão.

Os cabos nus utilizados em redes de distribuição podem ser divididos em:

- Condutor de Alumínio CA

Para Mamede (2013, p.253): "É um condutor com encordoamento concêntrico constituído de uma ou mais camadas, também denominadas coroas, de fios de alumínio 1350, podendo ser fornecido em diferentes têmperas e classes de encordoamento de forma a atender às condições das instalações."

- Condutor de Alumínio CAA

De acordo com Mamede (2013, p.253): "É um condutor com encordoamento concêntrico constituído de uma ou mais camadas de fios de alumínio 1350, têmpera H19, reunidas no entorno de um núcleo de aço galvanizado de elevada resistência mecânica e que pode ser constituído por um único fio ou por vários fios de aço galvanizado encordoados, dependendo da seção do cabo."

Assim, a maior diferença entre os cabos CA e CAA é que o cabo CAA tem um núcleo de aço galvanizado com alta resistência mecânica, também chamado de alma de aço, com o objetivo de aumentar a resistência mecânica do condutor, possibilitando a extensão em distâncias maiores que os cabos sem o núcleo.

- Condutor de Alumínio liga CAL

Segundo Mamede (2013, p.253): "É um condutor com encordoamento concêntrico constituído de uma ou mais camadas, também denominadas coroas, de fios de liga de alumínio 6201- T81, podendo ser fornecido em diferentes classes de encordoamento de forma a atender às condições das instalações, semelhantemente ao que ocorre com os condutores CA."

Esses cabos foram desenvolvidos para serem mais resistentes que os cabos CA e para que pudessem substituir os cabos CAA em áreas próximas à orla marítima, onde normalmente são utilizados cabos de cobre, cujo custo é superior ao dos cabos CAA (MAMEDE, 2013).

- Condutor de Cobre

Os cabos de cobre devem ser formados por um ou vários fios de cobre eletrolítico com 99,90% de pureza. Deve ser estanhado, com têmpera mole e com seção entre 1,5 e 1.000mm² (MAMEDE, 2013).

2.1.1.2 Cabos Isolados

Para a construção de cabos isolados, praticamente, utilizam-se apenas dois tipos de materiais: o alumínio e o cobre (MAMEDE, 2013).

Nos cabos isolados também vamos nos ater a dois tipos:

- Condutores de Alumínio

Como dito anteriormente, para as redes de distribução, a maior parte das aplicações de condutores no mercado de redes de distribução são dominadas por cabos de alumínio, com a exceção de áreas próximas à orla marítima, e instalações elétricas residenciais, comerciais e industriais.

Para Mamede (2013, p. 192): "O principal obstáculo para popularizar a aplicação dos condutores de alumínio em instalações elétricas residenciais, comerciais e industriais   a dificuldade da conexão, quando o outro elemento a ser conectado   de cobre, pois nessa região de contato há uma acelerada deterioração do alumínio, com a formação de uma película de óxido de alumínio, responsável pelo aquecimento exagerado e pela destruição da conexão."

Os cabos isolados, são comumente empregados nas redes de distribução subterrâneas de grandes centros urbanos, tanto em m dia como em baixa tensão, e também em parques eólicos(MAMEDE, 2013).

- Condutores de Cobre

Segundo Mamede (2013, p. 192): "Os condutores de cobre praticamente dominam o mercado nas aplicações de instalações elétricas, sejam prediais, comerciais ou industriais, e nas redes áreas localizadas no litoral. O cobre utilizado nos condutores elétricos deve ser purificado através do processo de eletrólise, o que lhe d  o nome de cobre eletrolítico, conseguindo-se, dessa forma, um grau de pureza de 99,99%. Posteriormente, é submetido a processos térmicos para se obter a têmpera desejada."

2.1.1.2.1 Isolamento

De acordo com Mamede (2013, p. 198): "Excluindo os materiais estratificados, utilizados nos cabos de papel impregnado, atualmente a isolamento dos condutores elétricos   constituída de materiais sólidos extrudados."

As isolações sólidas podem ser divididas nos seguintes materiais:

- Termoplástico

As isolações termoplásticas são feitas à base de cloreto de polivinila (PVC). Pode operar em situações normais com temperaturas até 70°, porém, ao passar dos 120°, a isolação se torna gradativamente pastosa até que se separe do condutor.

Os materiais termoplásticos são: Termoplástico PVC/A, utilizado em cabos com tensões e isolamento inferiores a 3,6/6 kV. O outro material é o Termoplástico PE, utilizado em tensões e isolamento iguais e superiores a 3,6/6 kV (MAMEDE, 2013).

- Termofixo

Segundo Mamede(2013, p.199): "As isolações termofixas são fabricadas à base de dois materiais distintos, e cada um deles apresenta características elétricas e mecânicas específicas. A isolação termofixa pode suportar, em operação normal, temperaturas de até 90°C. No entanto, são fabricados cabos com isolação termofixa mais resistente às temperaturas, podendo operar em condições normais à temperatura de até 105°C."

Os materiais termofixos são: Termofixo EPR, Termofixo HEPR, Termofixo EPR 105, Termofixo XLPE, Termofixo TR XLPR.

2.1.2 Postes

Os postes são as estruturas de sustentação e elevação da rede aérea de distribuição. Existem diversos tipos de postes, mas atualmente o padrão de postes para redes de distribuição são os postes de concreto.

Ainda é possível encontrar postes de madeira em alguns locais, mas, nas áreas de consseção da Energisa, esse tipo de material já foi despadronizado.

Os modelos mais comuns de postes de concreto são:

- Poste duplo T (Figura 2);
- Poste circular (Figura 4).

Figura 2 – Poste Duplo T.



FONTE: <https://www.txeletrica.com.br/poste-de-concreto-duplo-t-90-dan>

O poste duplo T possui um sentido de maior esforço e um sentido de menor esforço. No sentido de maior esforço ele suporta 100 % do esforço nominal, enquanto no sentido de menor esforço ele suporta apenas 50 % da sua capacidade nominal. As características de diversos postes empregados em redes de distribuição urbana e rural são apresentadas na Tabela 11 da NDU 004.1 do Grupo Energisa, como mostrado na Figura 3.

Figura 3 – TABELA 11 da NDU 004.1 – Comprimento e resistência mínima de postes.

COMPRIMENTO DO POSTE (m)	RESISTÊNCIA NOMINAL - daN		
	CONCRETO CIRCULAR	CONCRETO DUPLO T	
		Face A	Face B
11	600	150	300
		300	600
	1.000	500	1.000
12	1.500	750	1.500
	600	150	300
		300	600
13	1.000	500	1.000
	1.500	750	1.500
	600	300	600
	1.000	500	1.000
	1.500	750	1.500
	600	300	600

FONTE: NDU 004.1, Página 24

Já o poste circular, diferentemente do poste duplo T, possui a resistência a tração nominal, independente do sentido onde a tração está sendo aplicada.

Figura 4 – Poste Circular.



FONTE: <https://www.romagnole.com.br/produto/artefatos-de-concreto/poste-de-concreto-circular-tipo-r-distribuicao>

2.1.3 Estruturas de Distribuição

Para as redes de distribuição podemos ter estruturas primárias, para a rede de média tensão e as estruturas secundárias, para a rede de baixa tensão.

Podemos dividir as estruturas primárias de acordo com o tipo de rede: aberta (ou convencional) ou compacta. Na codificação (ou nomenclatura) empregada para classificar os tipos de estruturas de redes abertas temos que levar em consideração a quantidade de fases da rede e o tipo de cruzeta. Para redes bifásicas ou trifásicas, temos os tipos:

- N - Estrutura com cruzeta normal;
- M - Estrutura com cruzeta meio-beco;
- B - Estrutura com cruzeta beco

A codificação empregada para as estruturas de redes monofásicas sempre são do tipo U. Por fim, a nomenclatura empregada para as estruturas de rede compacta, sempre serão do tipo CE.

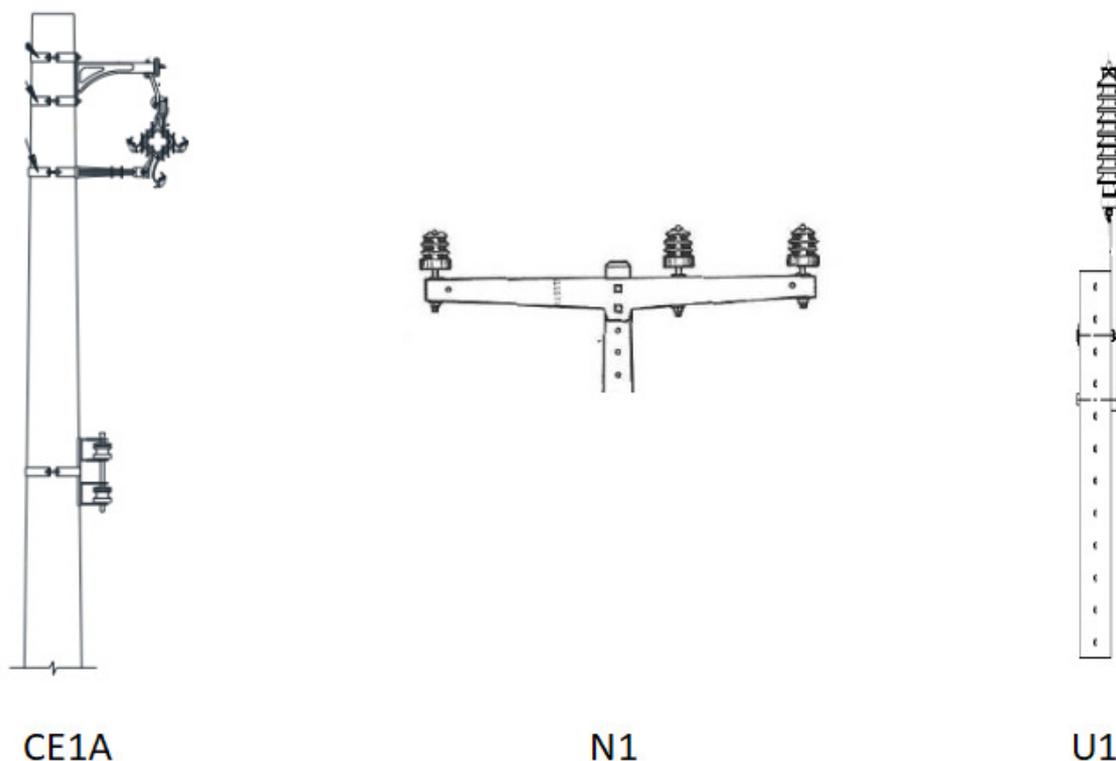
Para cada estrutura dessas temos 4 formas em que os condutores podem interagir com a mesma:

- 1 - Cabo passante (tangencial);
- 2 - Cabo passante com pequenos ângulos;

- 3 - Cabo ancorado em fim de rede;
- 4 - Cabo ancorado com continuação.

Com isso, tem-se uma diversidade de tipos e nomenclaturas de estruturas, por exemplo N1, N4, B3, U2, CE1. Na Figura 5 ilustram-se exemplos de estruturas para rede compacta, aberta trifásica e aberta monofásica.

Figura 5 – Exemplos de estruturas passantes.



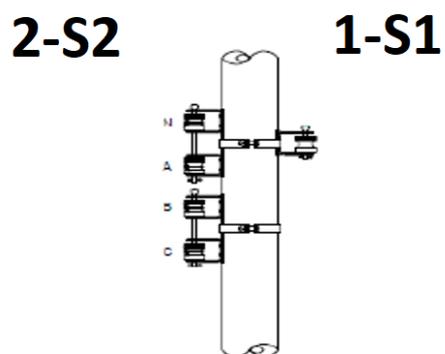
FONTE: Compilado de imagens do google.

Para a rede de baixa tensão, atualmente a Energisa recomenda o uso de duas estruturas que podem ser usadas tanto para encabeçamento de rede, como para rede passante. São elas:

- S1;
- S2.

A diferença entre as duas estruturas é apenas que a S2 são duas S1 juntas. Na Figura 6 ilustra-se como são as duas estruturas.

Figura 6 – Estruturas de Baixa Tensão.



FONTE: Material Treinamento Engeselt (2021).

3 Desenvolvimento

Nessa sessão é apresentada a construção da planilha, quais os dados necessários para utilização e o embasamento matemático para as fórmulas utilizadas nos cálculos desenvolvidos na planilha.

3.1 Desenvolvimento da Planilha

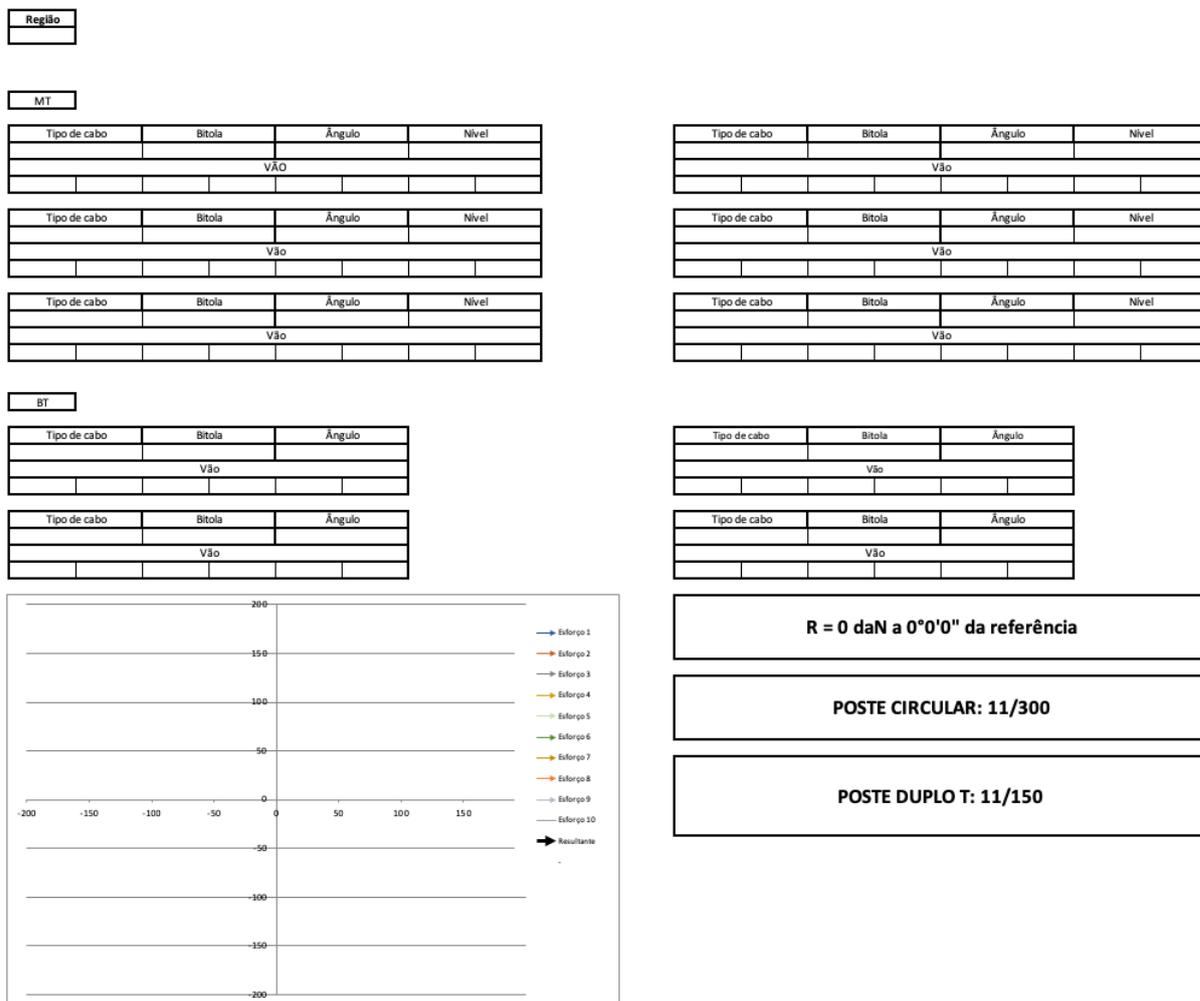
Para o desenvolvimento da planilha, primeiramente foi necessário fazer uma revisão das normas que tratavam do cálculo de esforço em postes, em especial a NBR 5422.

É importante ressaltar que algumas considerações foram feitas com o intuito de simplificar algumas das equações necessárias para a realização dos cálculos. Para tanto, levou-se em consideração a padromização existente nas normas do grupo Energisa quanto aos requisitos que devem ser cumpridos na elaboração de projetos de redes urbanas e rurais.

A planilha foi elaborado com um layout simplista - no intuito de facilitar seu uso, onde são necessários apenas alguns dados dos condutores e a região onde o projeto será executado, como mostrado na Figura 7. Os dados necessários são:

- Região onde o projeto será realizado;
- Tipo do condutor;
- Bitola do condutor;
- Ângulo dos condutores encabeçados no poste;
- Nível dos condutores;
- Vãos até a ancoragem anterior.

Figura 7 – Entrada de dados da planilha.



FONTE: Autoria própria.

3.1.1 Média Tensão

Para obter os dados relativos às redes de média tensão (MT) foi necessário a consulta das Normas de Distribuição Unificada disponibilizadas pelo grupo Energisa - que agrega diversas concessionárias, cujas normas foram utilizadas como base para o estudo.

Na NDU 006 (2018) é possível encontrar as tabelas que trazem as características físicas dos condutores utilizados nas redes de distribuição. Para as redes MT pode-se aplicar três tipos de condutores:

- CA

Cabo de alumínio nu, normalmente o mais utilizado em linhas aéreas de distribuição de energia. Os principais tipos de cabos CA e suas características são resumidamente descritos na Tabela 1.

Tabela 1 - Características Cabo CA

Bitola (AWG)	Peso (kg/km)
4	58,2
2	92,5
1/0	147,6
4/0	296,1

FONTE: Elaborado pelo autor, 2022.

- CAA

O cabo CAA (Tabela 2) é um condutor encordoado concêntrico similar ao CA, porém com a diferença de que possui um núcleo que pode ser constituído por um ou mais fios de aço encordoados conforme a dimensão do cabo.

Tabela 2 - Características Cabo CAA

Bitola (AWG)	Peso (kg/km)
4	85,4
2	135,9
1/0	216,3
4/0	433,2
336	688,7

FONTE: Elaborado pelo autor, 2022.

- XLPE

São condutores de alumínio com um composto extrudado termofixo de polietileno reticulado como isolador. Usado normalmente em redes subterrâneas, ou redes aéreas compactas urbanas ou próximas a plantações. Os principais tipos de cabos XLPE e suas características são resumidamente descritos na Tabela 3.

Tabela 3 - Características Cabo XLPE

Bitola (AWG)	Peso (kg/km)
50	235
70	620
120	830
185	695

FONTE: Elaborado pelo autor, 2022.

3.1.2 Baixa Tensão

O processo de obtenção de dados para a baixa tensão é análogo ao processo de média tensão.

Assim como para a média tensão, a NDU 006 (2018) também traz os dados necessários para os cálculos elaborados na planilha desenvolvida.

Além do cabo CA (Tabela 1) empregado em redes abertas cujo padrão foi descontinuado para novos projetos, atualmente empregam-se os cabos Multiplex.

- Multiplex

São cabos de alumínio multiplexados (Tabela 4). Indicados para redes aéreas de distribuição de baixa tensão urbana, bem como para ramais de ligação, redes secundárias rurais, entre outras várias aplicações. A isolamento do cabo alumínio multiplex é composta por polietileno (PE) ou polietileno reticulado (XLPE).

Tabela 4 - Características Cabo Multiplex

Bitola (mm ²)	Peso (kg/km)
35	515
70	818
120	1449

FONTE: Elaborado pelo autor, 2022.

3.2 Embasamento Matemático

As principais referências técnicas empregadas na elaboração da planilha de cálculo de esforço foram: a NBR 5422, o livro Projetos Mecânicos das Linhas Aéreas de Transmissão de Rubens Dario Fuchs, e as NDUs do grupo Energisa.

Essa planilha visa o cálculo mecânico do esforço horizontal que as redes de média e baixa tensão aplicam ao poste da rede de distribuição. Neste trabalho as redes de telecomunicações foram desconsideradas.

Para realizar o cálculo de esforço mecânico, seguimos três passos:

- **1º:** É calculado o esforço de cada condutor e a sua projeção para um ponto comum no topo do poste;
- **2º:** Com os ângulos fornecidos, faz-se a decomposição vetorial dos esforços de cada condutor;
- **3º:** Por fim, somam-se todos os vetores e encontramos o esforço resultante.

3.2.1 Vão Regulador

O vão regulador é um vão fictício, mecanicamente equivalente a uma série de vãos contínuos, compreendidos entre estruturas ancoradas, e que serve para a definição do valor do vão para tração de montagem (NDU 006, 2018).

O cálculo de esforço é feito apenas em postes com vãos ancorados. No entanto, os condutores de uma rede, são estendidos para posterior tensionamento e amarração, sendo necessário que os mesmos sejam suspensos provisoriamente por meio de dispositivos que apresentem um mínimo de resistência ao atrito, por meio de roldanas (CELESC I313-0003, 1996).

Por esse motivo, uma sessão de tensionamento de uma rede, que pode ser composta por n vãos em série pode ser considerada como um tramo, para fins de cálculo das trações e flechas. O vão regulador pode ser calculado segundo Equação 3.1 disponibilizada na NDU 006:

$$V_r = \sqrt{\frac{V_1^3 + V_2^3 + V_3^3 + \dots + V_n^3}{V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n}} \quad (3.1)$$

Onde:

V_r = Vão regulador (m)

V_1 = Vão 1 (m)

V_2 = Vão 2 (m)

V_3 = Vão 3 (m)

V_n = Vão n (m)

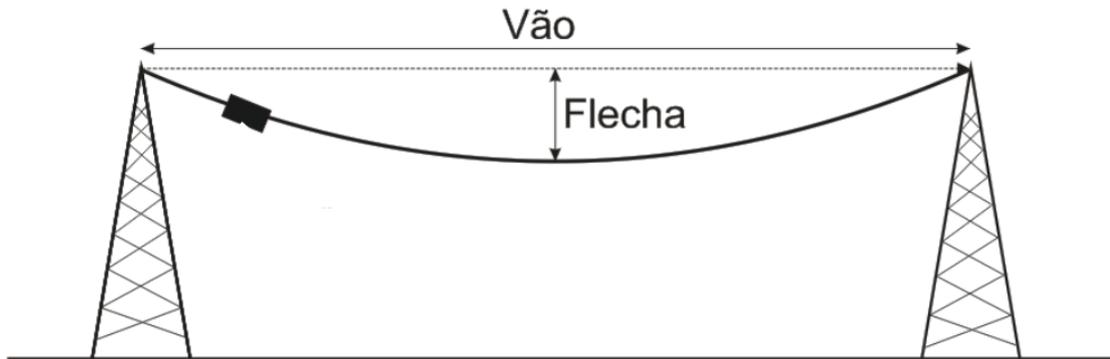
Reduzindo a Equação 3.1, chegamos a equação 3.2:

$$V_r = \sqrt{\frac{\sum V_n^3}{\sum V_n}} \quad (3.2)$$

3.2.2 Flecha

Flecha é a distância vertical entre a linha que liga os suportes dos cabos e o ponto de tangência do colo do cabo com a paralela à linha que liga os suportes e passa por este ponto (FURNAS, 2003). A Figura 8 mostra uma representação da flecha em uma rede.

Figura 8 – Flecha em Linha de Transmissão.



FONTE: <https://www.abcm.org.br/anais/conem/2012/PDF/CONEM2012-1036.pdf>

De acordo com Fuchs (1992, p.21) a flecha pode ser obtida a partir da Equação 3.3:

$$f = \frac{P \times V_r^2}{8 \times T} \quad (3.3)$$

Onde:

f = Flechas do vão regulador (m)

P = Peso do condutor (kg/m)

V_r = Vão regulador (m)

T = Tração do vão regulador (kgf)

3.3 Tração Total

A tração total no poste é a soma das trações de todos os condutores, seja de MT, BT ou telecomunicações e a tração que o vento exerce sobre os condutores.

A tração total pode ser obtida pela Equação 3.4:

$$F_t = F_{cabo} + F_{vento} \quad (3.4)$$

3.3.1 Tração do Condutor

A tração do condutor é a força de tração que o condutor exerce no poste ao qual está ancorado.

Na Tabela 3 da NBR 5422 (1985, p.11), são mostrados os valores indicados de tração de condutores, como mostrado na Figura 9.

Figura 9 – Tabela de Cargas Máximas recomendadas para cabos na condição de trabalho de maior duração

Cabos	(% de carga de ruptura)
Aço AR	16
Aço EAR	14
Aço-cobre	14
Aço-alumínio	14
CA	21
CAA	20
CAL	18
CALA	16
CAA-EF	16

FONTE: NBR 5422 (1985) - Página 11

As NDUs 004, 005, 006 e 007 nos trazem valores sugeridos pela Energisa para as trações de cada condutor, como mostrado na Figura 10.

Figura 10 – Tabela 33A NDU 006 - Trações de Projeto da Rede Compacta Trifásica - 15 kV

Vão (m)	XLPE-50 mm ²	XLPE-120 mm ²	XLPE-185 mm ²
	Tração (daN)	Tração (daN)	Tração (daN)
4 a 20	392	441	490
24	392	441	490
28	392	441	490
32	392	441	490
36	392	444	495
40	396	449	501
44	402	454	506
48	408	459	510
52	412	463	513
56	416	466	516
60	419	469	518

FONTE: NDU 006 (2022)

É importante ressaltar que valores de tração para condutores despadronizados podem ser encontrados em versões mais antigas das NDUs.

3.3.2 Tração do vento

A carga do vento é o esforço que o vento exerce ao passar perpendicularmente aos condutores. É uma força que deve ser levada em consideração, muitas vezes levando a escolha do poste corretamente.

Para o cálculo da carga do vento, vamos primeiramente encontrar a pressão dinâmica de referência, dada pela Equação 3.5, da NBR 5422:

$$q_o = \frac{1}{2} \times \rho \times V_p^2 \quad (N/m^2) \quad (3.5)$$

Onde:

ρ - Massa específica do ar (kg/m^3)

V_p - Velocidade do vento de projeto (m/s)

A NBR 5422 diz que a carga do vento no condutor pode ser encontrada pela seguinte fórmula:

$$F_v = q_o \times C_{xc} \times \alpha \times d \times \frac{Z}{2} \times \text{sen}^2\theta \quad (N) \quad (3.6)$$

Onde:

F_v - Tração do vento (N)

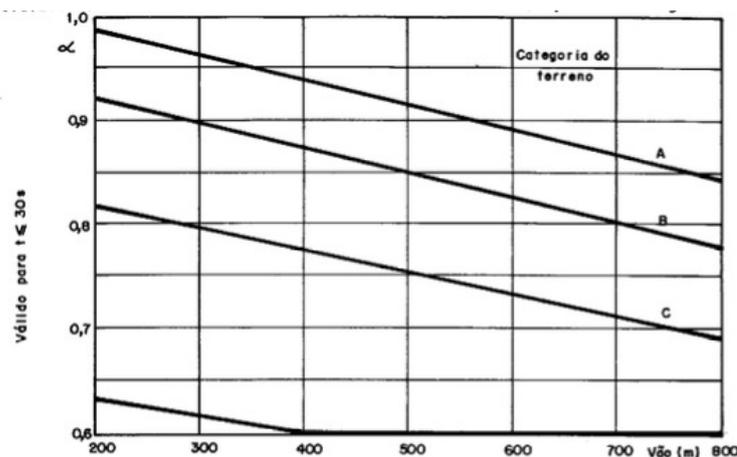
q_o - Pressão dinâmica de referência (N/m^2)

C_{xc} - Coeficiente de arrasto, igual a 1

α - Fator de efetividade (adimensional) d - Diâmetro do cabo (m) Z - Comprimento do vão (m) θ - Ângulo de incidência do vento

O Fator de efetividade é dado pelo gráfico na Figura 11.

Figura 11 – Fator de efetividade (α)



FONTE: NBR 5422(1985), Página 14

Substituindo os valores da Equação 3.5, o coeficiente de arrastao e o alpha, na Equação 3.7, temos:

$$F_v = \frac{1}{2} \times \rho \times V_p^2 \times d \times \frac{Z}{2} \times \text{sen}^2\theta \quad (N) \quad (3.7)$$

Para a velocidade do vento de projeto, a NDU 006, traz duas tabelas com a velocidade máxima dos ventos e as temperaturas em cada região, como mostrada na Figura 12.

Figura 12 – Velocidade Máxima dos Ventos e Temperatura Regional

Velocidade Máxima dos Ventos (km/h)	ESE	ETO	EMG / ENF	EPB / EBO	EMS	EMT	ESS
	105	105	95	105	130	123	110

Temperatura Regional (°C)	ESE	ETO	EMG / ENF	EPB / EBO	EMS	EMT	ESS
Média	25	25	20	25	28	25	23
Máxima	60	60	60	60	50	50	55
C/ Vento Máximo Coincidente	20	20	15	20	40	20	10

FONTE: NDU 006 2022, Página 60.

3.3.3 Transferência do Esforço para o Topo do Poste

O momento de esforço é proveniente do tracionamento resultante dos condutores ancorados em postes, nas situações onde existem maiores angulações da rede passante, derivações, fins de rede e demais situações de ancoragem porventura existentes.

Como esses esforços são perpendiculares ao eixo do poste e todo o esforço é aplicado na base do poste, independente da altura em que o condutor está amarrado, é necessário fazer a transferência dos esforços de todos os condutores para um ponto virtual de aplicação, no topo do poste, para só então somá-los.

A NDU006 da Energisa traz uma tabela de equivalência de esforços de acordo com o nível cujo condutor foi ancorado no poste, como mostrado na Figura 13.

Figura 13 – Tabela Equivalência de Esforços a 20 cm do Topo.

Comprimento do poste	Rede Primária			Rede Secundária	Rede Telefônica	Estai poste a poste			Estai de Cruzeta	Ramal de Ligação
	1° nível	2° nível	3° nível			Acima do Secundário	Abaixo do Secundário	A 5 metros do solo		
10m	1	-	-	0,85	0,69	0,88	0,78	0,61	0,88	0,88
11m	1	0,94	-	0,77	0,62	0,79	0,7	0,55	0,79	0,79
12m	1	0,94	0,89	0,7	0,57	0,72	0,64	0,5	0,72	0,72
13m	1	0,94	0,89	0,63	0,52	0,66	0,59	0,46	0,66	0,66
15m	1	0,94	0,89	0,54	0,45	0,57	0,5	0,39	0,57	0,53

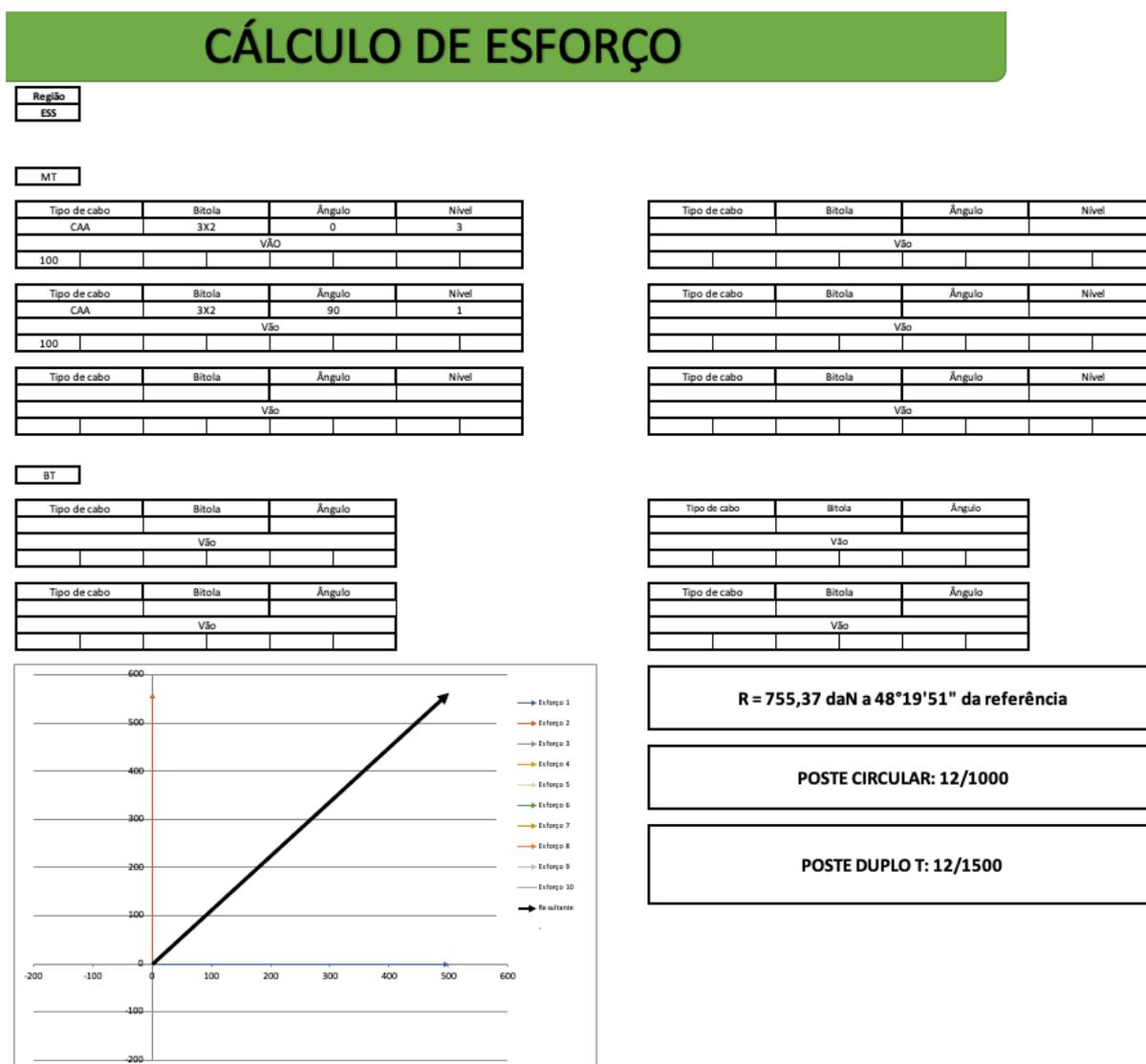
FONTE: NDU006, 2018

Após fazer a equivalência de todos os esforços, faz-se a decomposição vetorial e em seguida a soma dos vetores, e assim, obtemos o vetor resultante.

3.4 Layout da planilha

O layout da planilha está ilustrado na Figura 14, na qual constam dados numéricos e também uma representação gráfica do vetor resultante dos esforços mecânicos aplicados ao poste.

Figura 14 – Entrada de dados da planilha.



FONTE: Autoria própria.

Como dados de entrada, a planilha requer a região onde o projeto será executado, o tipo de condutor, a bitola do condutor, a tamanho do(s) vão(s) entre o poste e o encabeçamento anterior, e o ângulo de encabeçamento do vão com o poste. Como resultado,

a planilha retorna uma saída gráfica dos vetores que representam as forças de tração dos condutores e o vetor soma resultante dessas trações, além disso, traz a resultante de forma numérica, com esforço e ângulo, e indicações de poste, tanto circular quanto duplo T.

A decisão do poste correto, caso seja escolhido um poste duplo T, para cada situação vai se dar de acordo com o vetor resultante dos esforços em conjunto com a Tabela 35 da NDU 006 (2018), que traz o esforço do poste com relação ao ângulo do esforço resultante das trações aplicadas a ele, utilizando sempre o lado de maior carga como referência, mostrada na Figura 15.

Figura 15 – Tabela de Carga de Utilização de Poste Concreto Duplo T.

TABELA 35 - Carga de Utilização do Poste de Concreto Duplo T

α	ϕ	R (daN)		
		Cn=150	Cn=300	Cn=600
0	-	150	300	600
5	1	149	299	598
10	0,96	144	288	577
15	0,93	139	278	556
20	0,89	134	268	536
25	0,86	129	259	517
30	0,83	125	250	499
40	0,77	116	232	464
50	0,72	108	216	432
60	0,67	100	201	402
70	0,62	93	187	374
80	0,58	87	174	348
90	-	75	150	300

FONTE: NDU 006, 2018.

3.5 Exemplos de utilização da planilha

É comum que as redes que se espalham ao longo da cidade não sejam lineares e sim ramificadas, porém, sempre que temos um poste com redes em ângulo, é necessário que analisemos se aquele poste vai ou não vai suportar o esforço mecânico dos condutores exercido sobre ele.

Nessa sessão são apresentados exemplos de utilização da planilha desensolvida. Foram escolhidas em três situações distintas:

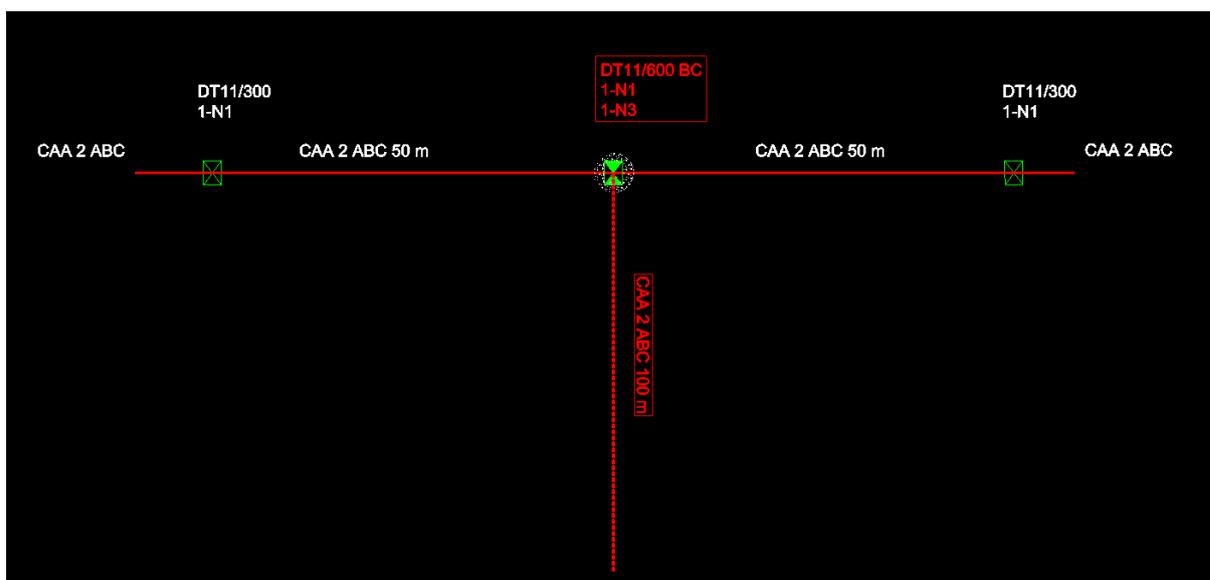
- Poste com derivação de rede de Média Tensão;
- Poste com derivação de rede de Baixa Tensão;
- Poste em fim de rede.

3.5.1 Poste com Derivação de Rede Média Tensão

É comum que, para levar energia a novos locais, seja necessário derivar a rede nova de uma rede que já exista. Nesse tipo de situação, é comum que seja inserido um novo poste na rede existente, e a partir deste, seja feita a derivação.

A Figura 16, ilustra o caso de um trecho de rede de média tensão de onde será derivada uma nova rede.

Figura 16 – Poste com Derivação de Rede em Média Tensão.

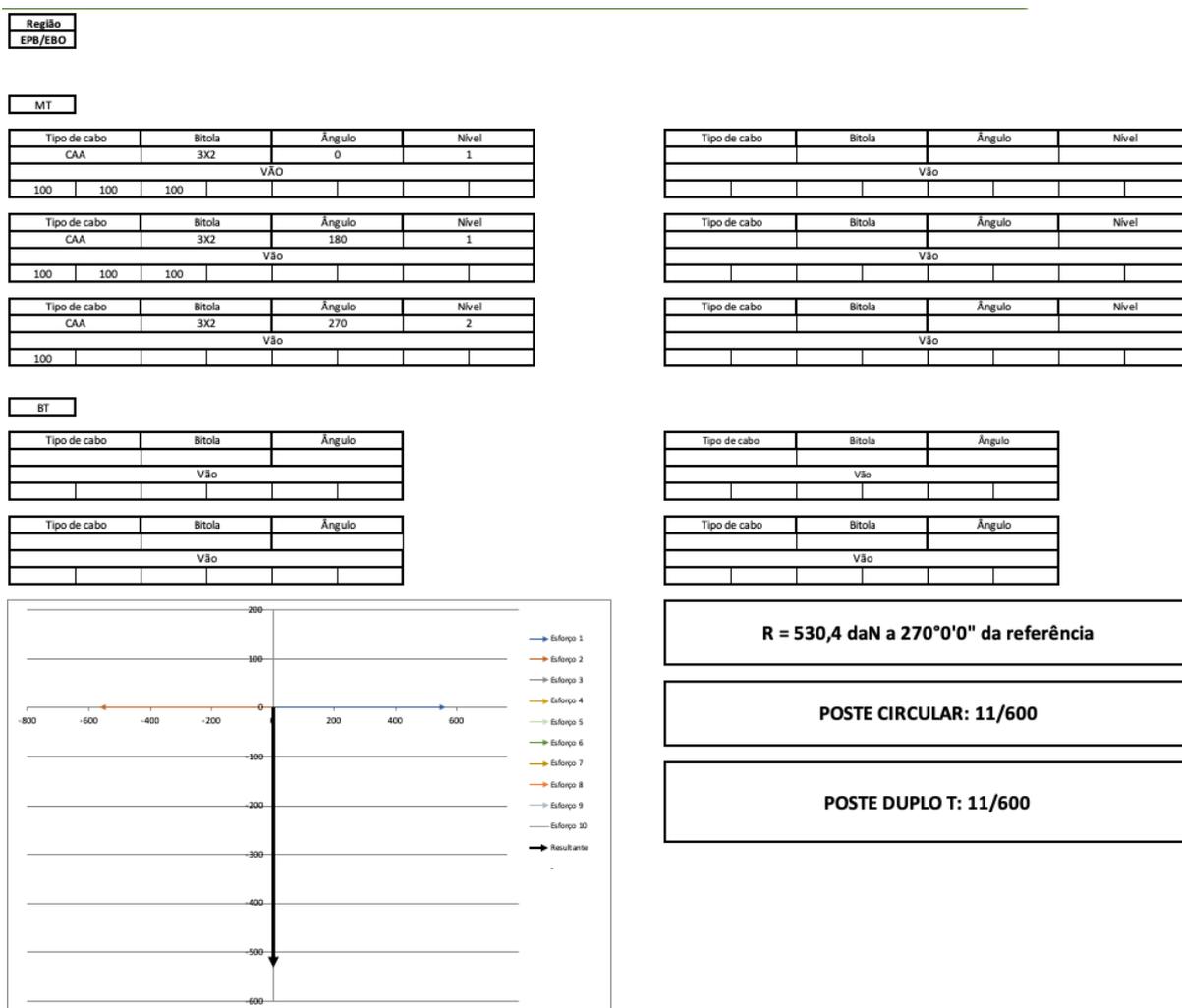


FONTE: Autoria própria.

Para essa situação, uma vez que a rede existente será passante, a preocupação é quanto ao condutor da derivação que ficará ancorado no poste. Como entrada de dados na planilha, informamos os tipos de condutores no poste, o sentido deles, o tamanho e o nível em que eles estão. Nesse caso, consideramos que a rede existente passante fica no primeiro nível, enquanto que a derivação vai ficar no segundo nível.

Dessa forma, entrando com os dados na ferramenta de cálculo de esforço temos a saída mostrada na Figura 17.

Figura 17 – Planilha de Cálculo de Esforço - Derivação de Rede em Média Tensão.



FONTE: Autoria própria.

A planilha de cálculo de esforço retorna o esforço mecânico resultante e o seu sentido.

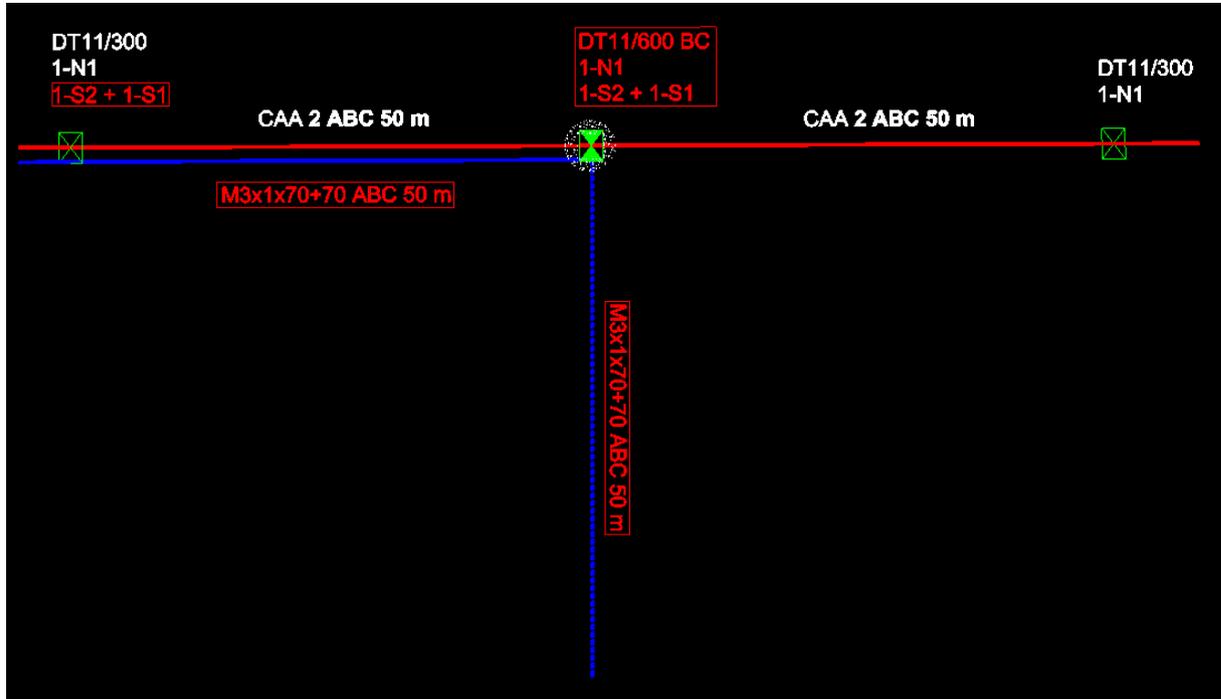
Como esperado, a rede existente passante não tem peso no cálculo do esforço resultante, dessa forma, todo o esforço resultante está no sentido do novo vão a ser derivado, com uma intensidade de aproximadamente 530 daN. Nesse caso, sendo um poste com esforço 600 daN suficiente para suportar a derivação, como sugerido na própria planilha.

3.5.2 Poste com Derivação de Rede Baixa Tensão

A extensão de rede de baixa tensão é um tipo muito comum de serviço que as distribuidoras de energia realizam. É por meio desse serviço que eles podem atender novos clientes, e apesar de ser possível fazer conexões de rede de forma a não deixar os

condutores em 90° , não é incomum situações onde os condutores estão dessa forma, como mostrado na Figura 18.

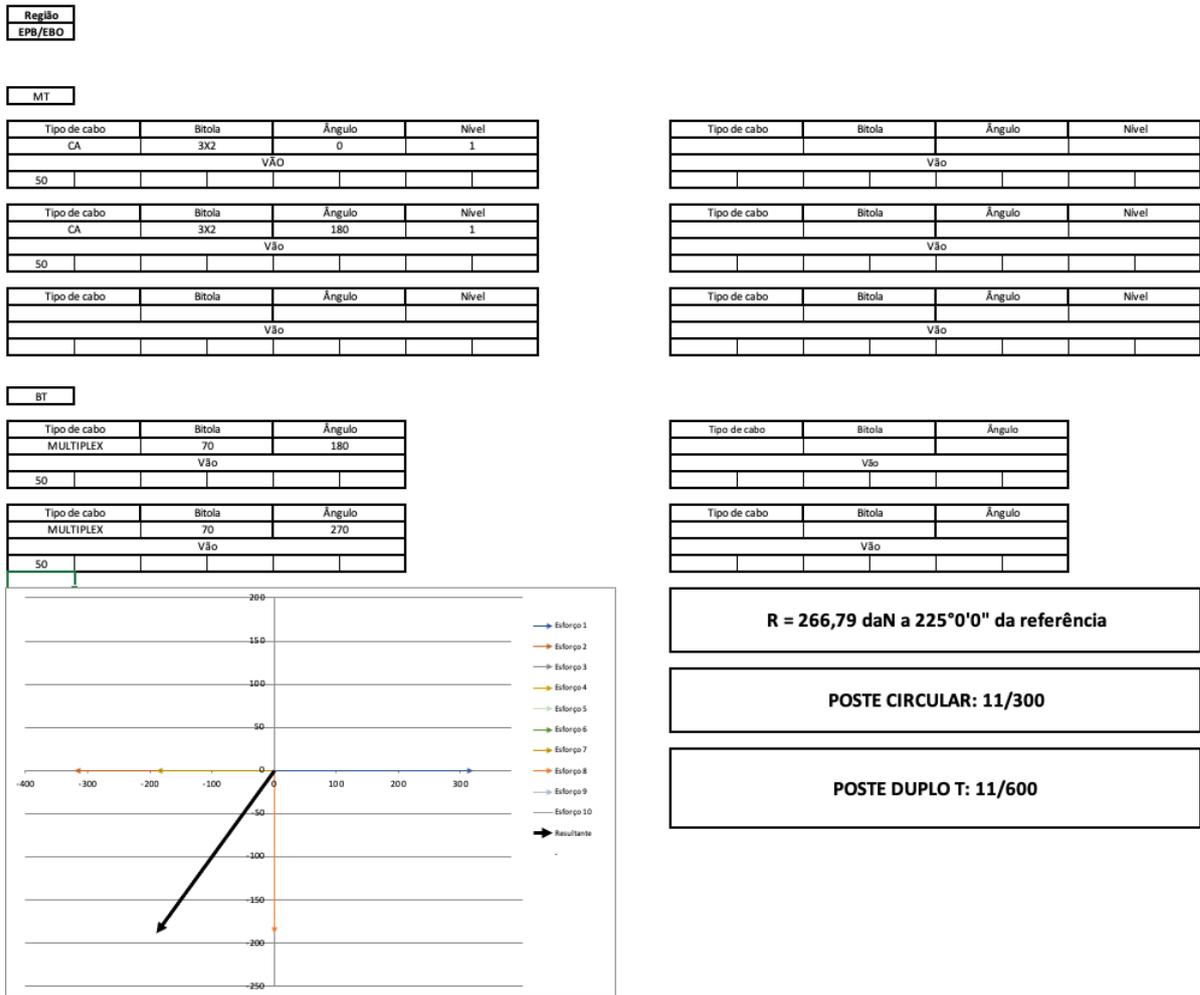
Figura 18 – Ferramenta de Cálculo de Esforço - Poste com Rede Baixa Tensão com Ângulo de 90° .



FONTE: Autoria própria.

Dessa forma, entrando com os dados na planilha de cálculo de esforço temos a saída mostrada na Figura 19.

Figura 19 – Planilha de Cálculo de Esforço - Ângulo Rede BT em 90°.



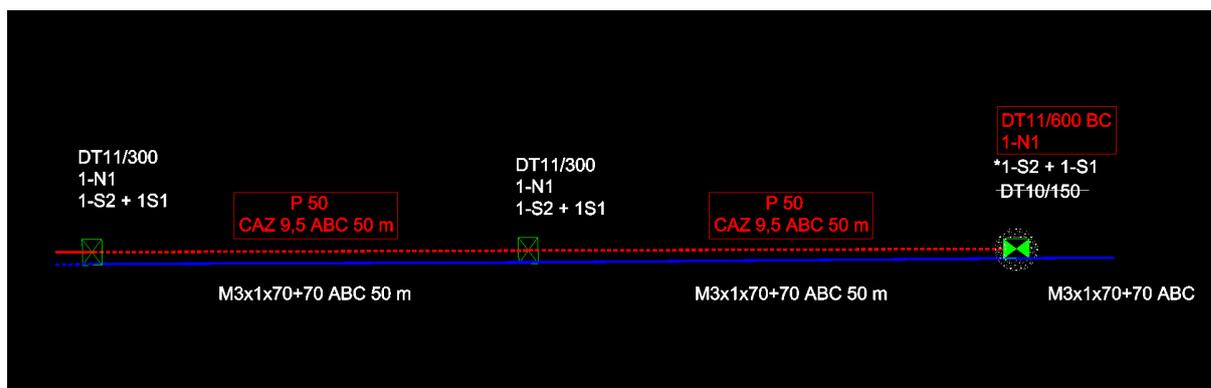
FONTE: Autoria própria.

Após entrar com as informações sobre os vãos, a ferramenta apresentou como resposta um esforço resultante de aproximadamente 270 daN, com uma angulação de 225° da referência. Escolhendo a face do poste de maior carga, temos que o ângulo entre o vão da derivação é de 45°. Na figura 12, podemos observar que, para ângulos entre 40° e 50°, um poste duplo T com 600 daN suporta entre 432 e 464 daN. Dessa forma, vemos que o poste de 600 daN suportaria o esforço resultante, como indicado pela planilha.

3.5.3 Poste em Fim de Rede

Como pôde ser percebido, o uso da planilha se dá, principalmente, em situações onde os vãos ficam ancorados no poste. Situações onde a rede termina são comuns e, mais uma vez, se faz necessário saber se o poste suporta os condutores nele ancorados. Na Figura 20, é mostrado um poste que suporta 150 daN no seu sentido de maior esforço.

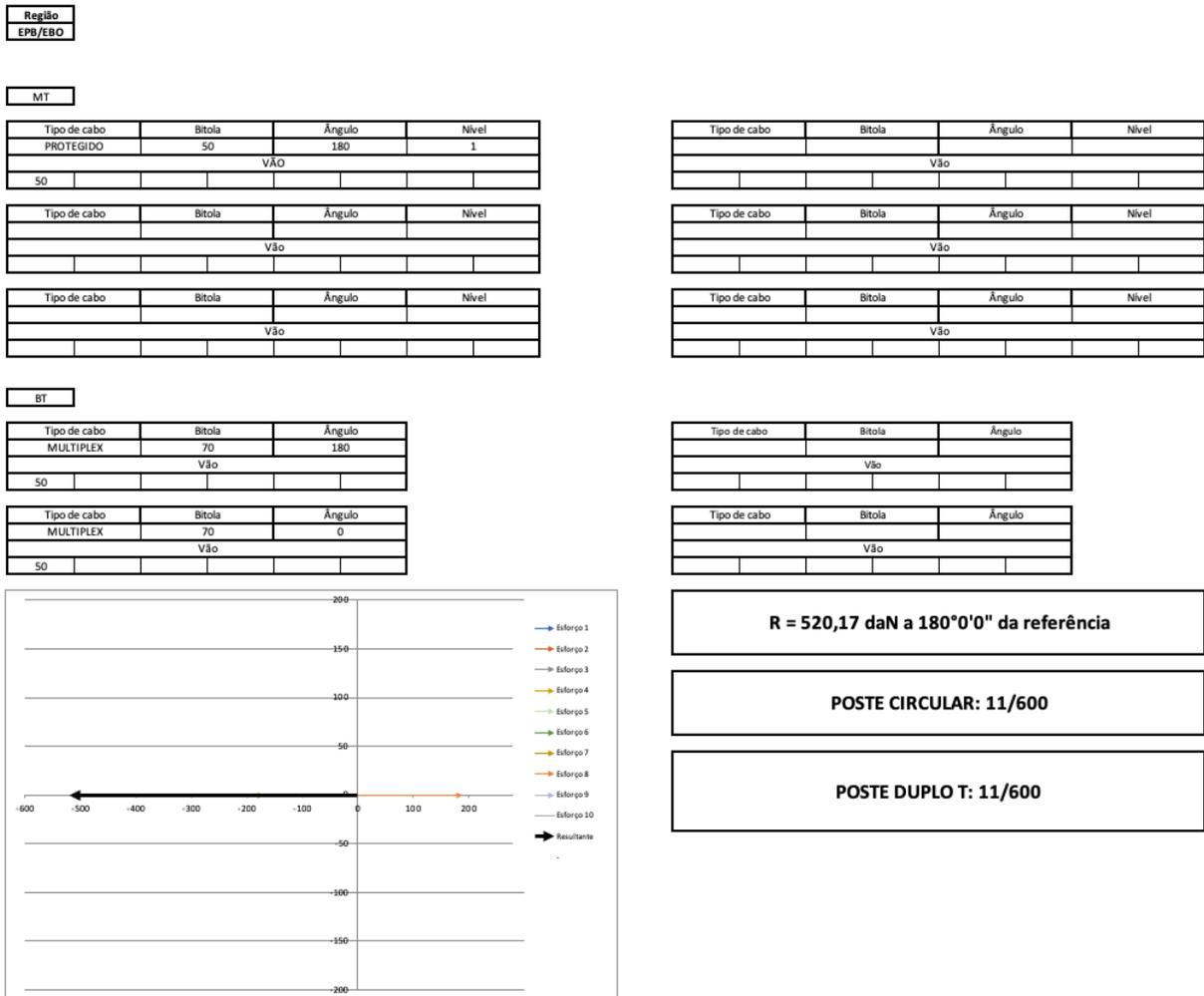
Figura 20 – Poste Fim de Rede Média Tensão.



FONTE: Autoria própria.

Como a rede nova em média tensão iria terminar no poste existente, a planilha foi utilizada para realizar a análise da necessidade de troca do poste. Dessa forma, entrando com os dados na planilha de cálculo de esforço temos a saída mostrada na Figura 21.

Figura 21 – Planilha de Cálculo de Esforço - Poste com Final de Rede em Média Tensão.



FONTE: Autoria própria.

Após as entradas de dados da planilha, temos como resposta um esforço resultante de aproximadamente 520 daN, com 180°. Logo, um poste com esforço 150, mesmo com o condutor ancorada em seu sentido de maior esforço, não suportaria tal esforço, de forma que sua troca é necessária, sendo recomendado um poste com esforço de 600 daN.

4 Considerações finais

Após o desenvolvimento e utilização da planilha, é possível constatar os benefícios que seu uso proporciona. É notável o ganho de tempo por projeto uma vez que esses cálculos não precisam ser realizados passo a passo em cada ponto necessário.

Os objetivos propostos nesse trabalho foram alcançados, seguindo os passos necessários que foram especificados para a sua execução. Ao longo do trabalho foi descrito o processo de cálculo aplicado para realização dos cálculos na planilha.

Durante a construção da planilha, houveram algumas dificuldades. Principalmente quanto à falta de informações específicas sobre os cálculos de trações para redes distribuição, uma vez que a NBR5422 é direcionada para redes de transmissão. Todavia, foi possível aplicar os princípios da norma NBR 5422 em conjunto com as informações disponibilizadas em diversas normas da concessionária.

Para melhorias futuras, vislumbra-se a geração de um relatório em formato pdf com apresentação dos dados de entrada e saída da planilha. A inserção de novos tipos de condutores, mudança da quantidade de fases e a informação do uso, ou não, de neutro contínuo em redes abertas.

Referências

NDU 004.1 – NORMA DE DISTRIBUIÇÃO UNIFICADA, ENERGISA. **Instalações Básicas para Construção de Redes Compactas de Média Tensão de Distribuição.** Versão 5.0, 2018.

NDU 005 – NORMA DE DISTRIBUIÇÃO UNIFICADA, ENERGISA. **Instalações Básicas para Construção de Redes de Distribuição Rural.** Versão 5.0, 2018.

NDU 006 – NORMA DE DISTRIBUIÇÃO UNIFICADA, ENERGISA. **Critérios Básicos para Elaboração de Projetos de Redes de Distribuição Aéreas Urbanas.** Versão 5.0, 2018.

NDU 007 – NORMA DE DISTRIBUIÇÃO UNIFICADA, ENERGISA. **Critérios Básicos Para Elaboração de Projetos de Redes de Distribuição Aéreas Rurais.** Versão 5.0, 2018.

MAMEDE FILHO, João. **Manual de equipamentos elétricos.** 3.ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2005.

M. DE VASCONCELOS, Fillipe **Geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.** Londrina. Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2017.

NBR 5422 - Linhas de transmissao, 1985.

FUCHS, Rubens Filho **Projetos Mecanicos das Linhas Aereas de Transmissao - Rubens Dario Fuchs** EDITORA EDGARD BLÜCHER ITDA, 1992.

Agência Internacional de Energia. (2019). Key World Energy Statistics 2019. <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2019>

Agência Nacional de Energia Elétrica. (2020). Normas Regulamentadoras. <https://www.aneel.gov.br/regulamentadoras>

COPEL. “dimensionamento de estruturas”. NTC 850 001, 1995.

ELETROPAULO. [S.l.]: dimensionamento de poste de concreto com seção circular, utilizado em rede de distribuição, 2003. <<https://www.eneldistribuicaoosp.com.br/> Padroes

Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

Relatório de TCC

Assunto: Relatório de TCC
Assinado por: Ramon Carvalho
Tipo do Documento: Relatório
Situação: Finalizado
Nível de Acesso: Ostensivo (Público)
Tipo do Conferência: Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- **Ramon Almeida de Carvalho, ALUNO (20171610005) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - JOÃO PESSOA**, em 18/04/2023 17:07:37.

Este documento foi armazenado no SUAP em 18/04/2023. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 809829
Código de Autenticação: 9f6c113cbe

