



Revisão Bibliográfica: Dimensionamento de Estruturas de Rede de Distribuição de Energia Elétrica

Literature Review: Design of Electric Power Distribution Network Structures

Marcelo Frare

Engenheiro Eletricista, Universidade Paranaense – Unipar

Cesar Rodrigo Migliorini

Engenheiro Eletricista, Universidade Paranaense – Unipar

Gabriel Henrique Grala

Engenheiro Eletricista, Universidade Estadual de Maringá – UEM

Emanuel Vedovetto Santos

Engenheiro Eletricista, Universidade Estadual de Maringá – UEM

Resumo: O projeto de redes de distribuição de energia elétrica exige o cumprimento de requisitos fundamentais, como o dimensionamento adequado de postes, a correta coordenação entre equipamentos de proteção e os componentes do sistema elétrico de potência. Esses aspectos garantem a eficiência e segurança da operação, sendo essencial ao engenheiro da área o domínio de cálculos, dimensionamentos e o uso de softwares especializados. A fiscalização dos serviços das concessionárias é realizada pela ANEEL, que estabelece indicadores de qualidade (DEC, FEC, DIC, FIC e DMIC) e aplica penalidades em caso de descumprimento. Dessa forma, evidencia-se a relevância dos projetos de distribuição e da atuação das concessionárias no aperfeiçoamento contínuo do sistema, assegurando confiabilidade e proteção aos usuários.

Palavras-chave: distribuição de energia elétrica; redes elétricas; estrutura de redes.

Abstract: The design of electric power distribution networks requires compliance with essential criteria, such as the proper sizing of utility poles, accurate coordination between protective devices, and the integration of components within the electric power system. These factors ensure operational efficiency and safety, making it crucial for engineers in the field to master calculations, structural design, and the use of specialized software. The oversight of utility companies' services is carried out by ANEEL, which defines quality indicators (DEC, FEC, DIC, FIC, and DMIC) and imposes penalties for non-compliance. Thus, the relevance of distribution network projects and the role of utility companies in the continuous improvement of the system are highlighted, ensuring reliability and protection for end users.

Keywords: electric power distribution; power networks; network structure.

INTRODUÇÃO

Devido ao crescente processo de industrialização e urbanização que ocorre de uma forma geral nas grandes e pequenas cidades do país, aliado ao desenvolvimento do agronegócio como agropecuária e avicultura, faz-se necessário um constante reforço e expansão das redes de distribuição de energia elétrica, com o objetivo de atender de uma forma satisfatória a crescente demanda energética.

Entende-se por redes de distribuição de energia elétrica o conjunto de estruturas responsáveis pela etapa final do transporte da eletricidade entre as unidades geradoras e os consumidores finais, ou seja, após a geração da energia e seu transporte pelas redes de transmissão, a energia é levada até as unidades consumidoras (UC) pela rede de distribuição, que são compostas fisicamente por postes, cabos, isoladores, transformadores, chaves e dispositivos de proteção.

O Brasil possui hoje, conforme estudo apresentado no site Brasil Escola (2018), em torno de 81 milhões de unidades consumidoras, sendo 85% delas residenciais, no entanto, o setor da indústria é responsável por 35% do consumo total de energia elétrica no país, onde o processo de geração, transmissão e distribuição da energia elétrica é basicamente composto por centrais geradoras distribuídas pelo país e pelas linhas de transmissão e distribuição de energia, que compõem a chamada “indústria de rede”. Todo o sistema é eletricamente conectado, exigindo o balanço constante e instantâneo entre tudo o que é produzido e consumido.

O Estado do Paraná é atendido pela COPEL - Companhia Paranaense de Energia Elétrica, concessionária criada em 26 de outubro de 1954, com controle acionário do Estado do Paraná, a empresa se divide em: Geração, Transmissão e Distribuição de energia e até 2021 possuía uma subsidiária de Telecomunicações que foi privatizada.

No ano de 2020, de acordo com informações contidas em seu site, a Copel completou 200 mil quilômetros de rede para atender em torno de 4,8 milhões de consumidores em todo o estado.

A cada trecho de rede de distribuição de energia elétrica que é ampliado, é necessário a aprovação de um projeto que atenda aos requisitos técnicos e normativos vigentes, de forma que após a sua implantação a mesma possa ser energizada com segurança aumentando a confiabilidade do sistema de fornecimento de energia.

OBJETIVOS

Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é desenvolver e explicitar os cálculos matemáticos necessários para a elaboração de um projeto elétrico de extensão de rede em média tensão.

Objetivos Específicos

- a. Desenvolver e explicitar os cálculos de esforços mecânicos a fim de se dimensionar postes e elementos estruturais para atendimento de projeto de rede de distribuição;
- b. Desenvolver e explicitar os cálculos elétricos para dimensionamento de condutores, elementos de proteção e transformador;

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O Setor Elétrico Brasileiro

O Setor Elétrico no Brasil, destaca-se como um importante segmento da economia pois a sua estruturação ocorreu para garantir a segurança no fornecimento e a universalização do acesso à energia elétrica a todos os brasileiros. Composto por todas as etapas da produção até o consumo da energia elétrica, abrange desde a Geração, Transmissão, Distribuição até Comercialização da energia e está vinculado ao Ministério das Minas e energia, que através de alguns agentes federais como a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), desenvolve as diretrizes e normas para o funcionamento deste setor.

Geração de Energia Elétrica

A geração de energia elétrica é a ramificação do setor elétrico que é responsável por produzir a energia que será transportada pelas redes de transmissão e distribuição para o consumidor final. No Brasil a forma predominante de geração de energia é a hidrelétrica, devido sua vasta extensão territorial de clima tropical e as grandes bacias hidrográficas em áreas de planalto, porém existem outras formas de importantes a considerar da geração de energia, como por exemplo a geração termelétrica, eólicas e fotovoltaicas ou solar.

A produção de energia nas usinas termoeletricas basicamente ocorre através da queima de um material combustível que aquece uma caldeira com água e o vapor produzido em alta pressão move as turbinas dos geradores. Os principais combustíveis utilizados são, carvão mineral, óleo combustível e gás natural.

As usinas eólicas por sua vez produzem energia elétrica através do vento que movimenta as pás, e estas fazem girar um eixo que está ligado ao gerador produzindo eletricidade. O gerador basicamente são dois ímãs que ao girar um sobre o outro produzem carga elétrica. Esta é a fonte de energia que possui o menor impacto ambiental.

A energia solar que nos últimos anos teve um crescimento importante tem como princípio de funcionamento a geração de eletricidade quando partículas de luz solar colidem com os átomos presentes nos painéis solares, gerando movimento dos elétrons e criando a corrente elétrica que chamamos de fotovoltaica.

No Brasil conforme já citado no que se refere a geração de energia elétrica a forma predominante é a hidroeletricidade e segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica, entre pequenas, médias e grandes centrais hidrelétricas o país possui um total de 739 usinas em funcionamento.

Transmissão de Energia Elétrica

Transmissão de energia elétrica está relacionada ao processo de transportar a energia gerada nas centrais geradoras até os centros urbanos, e este processo

é feito por linhas que atravessam todo o território nacional e estão interligadas entre si, e esta rede interligada é chamada de Rede Básica de energia elétrica, que corresponde a todas as linhas de transmissão de 230 kV até 750 kV.

Os componentes principais destas linhas são, condutores, isoladores, estruturas de suporte que são as torres e para-raios, e a sua principal característica é o transporte de energia a grandes distâncias, e quando maior for a distância maior será o nível da tensão elétrica devido às perdas que ocorrem pelos condutores nas grandes distâncias.

A energia normalmente é gerada em um valor mais baixo de tensão, e nas subestações ocorre a elevação do nível de tensão através dos transformadores de força para valores que tornem possível o transporte da energia.

No Brasil existem mais de 150 mil quilômetros de linhas de transmissão, segundo o site Olhar Digital e uma curiosidade também o Brasil conta com a maior linha de transmissão do mundo. São 2.539 quilômetros de extensão, ligando Xingu ao Rio de Janeiro. Ela leva energia gerada em Belo Monte para a Região Sudeste.

Distribuição de Energia Elétrica

O sistema de Distribuição de energia é o segmento do setor elétrico responsável pela última etapa do processo no fornecimento de energia, conecta fisicamente a transmissão ou pequenas e médias centrais geradoras aos consumidores finais, através de redes de distribuição que podem ser aéreas suportadas por postes ou subterrâneas ligadas por cabos protegidos e isolados dentro de dutos subterrâneos.

O atendimento ao consumidor e a entrega efetiva da energia elétrica é feita pelas empresas distribuidoras e a regulamentação é feita pela Agência Nacional de Energia Elétrica, que através de procedimentos e resoluções determina como deve ser feito o processo de planejamento e expansão, operação e medição das redes, estabelecendo critérios e indicadores de qualidade para consumidores e produtores, distribuidores e agentes importadores e exportadores de energia.

No Brasil, do total da energia entregue pelas empresas Distribuidoras associadas à ABRADDEE, Associação Brasileira dos Distribuidores de Energia Elétrica, em 2020 o setor privado já era responsável pela distribuição de, aproximadamente, 78% da energia, enquanto as empresas públicas se responsabilizam por, aproximadamente, 22%.

A cada ponto de entrega com medição individualizada, corresponde a um consumidor de energia e recebe o nome de unidade consumidora, e segundo informação da ABRADDEE, existe hoje no Brasil em torno de 85 milhões de unidades consumidoras, onde 15% são consumidores industriais enquanto os outros 85% são consumidores residenciais e são atendidos por 91 distribuidoras de energia elétrica.

É dever das distribuidoras assegurar a qualidade e a continuidade do fornecimento da energia para os consumidores, sempre em conformidade com as normas vigentes, o setor de distribuição é um dos mais regulados e fiscalizados do setor elétrico. Existem alguns indicadores de qualidade que possibilitam meios de

controlar e avaliar o desempenho das distribuidoras e a qualidade do fornecimento de energia. Abaixo citaremos alguns dos principais indicadores.

METODOLOGIA

No capítulo que se segue será abordado a metodologia aplicada neste trabalho, onde através de revisão bibliográfica nas normativas técnicas Copel e também de artigos renomados da área de engenharia elétrica, será desenvolvido e explicitado, os cálculos matemáticos necessários para a elaboração de um projeto de rede de distribuição em média tensão.

RESULTADOS

A rede de distribuição de energia elétrica é projetada para suportar os esforços gerados com ações do vento nas estruturas, tração de condutores e peso de equipamentos em toda sua extensão. Calcular a intensidade que cada componente sofre e seus efeitos é essencial para o dimensionamento correto de cada estrutura.

Os cálculos realizados em postes são efetuados pela grandeza do momento fletor, resultante entre a força aplicada e a distância de fixação de sua base no engastamento. Geralmente os postes são dimensionados pela carga de flexão, resultante da ação de carregamentos que tendem a curvar e distribuir uma tensão aproximadamente linear sobre a estrutura, alternando entre tensões de tração e compressão na seção transversal. Para implantação de um poste no solo deve-se levar em consideração as especificações do solo e todas as forças atuantes para evitar possíveis inclinações.

Os esforços fundamentais que agem no poste são os esforços de compressão (gerado pelo peso de equipamento instalado no poste), esforços de flexão (devido ao tracionamento de cabos que atuam em isoladores, amarrações e o próprio poste) e esforços externos (pressão do vento horizontal no poste, nos cabos ou equipamentos instalados no poste).

Para o dimensionamento elétrico dos cabos, considera-se, carga, perdas e queda de tensão do trecho projetado. Para transformador considera-se carga necessária para atendimento solicitado para projeto.

Conforme a normativa, a distância segura entre os condutores e o solo, na situação mais desfavorável de flecha, necessitam obedecer as informações contidas na figura 1. Para travessia de linhas elétricas, rodovias, teleféricos e navegáveis, o ângulo mínimo entre o eixo do obstáculo e o eixo da rede não deve ultrapassar os 15 graus.

Figura 1 - Distância entre condutor e solo.

Natureza do logradouro	Afastamento mínimo mm		
	Tensão U kV		
	Comunicação e cabos aterrados	$U \leq 1$	$1 < U \leq 36,2^a$
Vias exclusivas de pedestre em áreas rurais	3 000	4 500	5 500
Vias exclusivas de pedestre em áreas urbanas	3 000	3 500	5 500
Locais acessíveis ao trânsito de veículos em áreas rurais	4 500	4 500	6 000
Locais acessíveis ao trânsito de máquinas e equipamentos agrícolas em áreas rurais	6 000	6 000	6 000
Ruas e avenidas	5 000	5 500	6 000
Entradas de prédios e demais locais de uso restrito a veículos	4 500	4 500	6 000
Rodovias federais	7 000	7 000	7 000
Ferrovias não eletrificadas e não eletrificáveis	6 000	6 000	9 000

Fonte: ABNT NBR 15688/2012.

As fórmulas matemáticas necessárias para o dimensionamento de poste em um projeto foram desenvolvidas através da Norma Técnica Copel 850001.

Cálculos para Dimensionamento de Poste

Conforme normativo ABNT NBR 5422, apresenta a informação referente a cálculos para determinação de velocidade do vento. A Copel utiliza por padrão conforme Norma Técnica Copel 850005, sendo considerado para as condições mais frequentes de temperatura, 20% da tração de ruptura a uma temperatura de 20o C, e para situações mais desfavoráveis, 23% ou 40% da tração de ruptura a uma temperatura de 0o C, padronizando a velocidade do vento 60, 80 ou 100 km/h, conforme figura 2.

Figura 2 - Especificações velocidade do vento.

VELOCIDADE DO VENTO (km/h)				Superfície	$h^2 \times daN$ k (-----) $km^2 \times m^2$
R	RDR				
D				Cilíndrica	0,00471
U	leve	média	pesada		
60	80	100	130	Plana	0,00754

Fonte: NTC 850001.

Engastamento

Segundo a ABNT NBR 15.688 (substitutivas das NBR's 5433-RDR e 5434-RDU), consiste que através do trabalho do poste no solo, este necessita ser engastado seguindo um comprimento "C" - conforme equação 1, onde L significa o comprimento total do poste.

$$C = L/10 + 0,6m \text{ [m]} \quad (1)$$

C = engastamento;

L = comprimento total do poste [m];

Momento resistente do poste

Para calcular o esforço máximo a qual o poste PS suporta ser submetido em sua face topo, necessita efetuar a equação 2, conforme exemplo de figura 3 de realização de ensaio simples de torção.

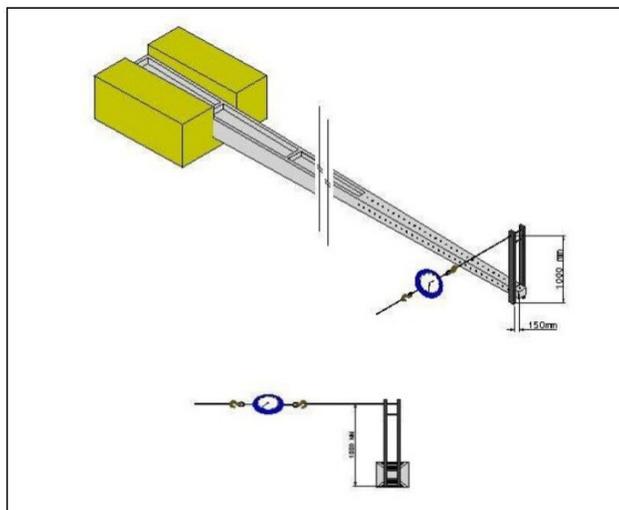
$$PS = RN \times 1,40 \times (h - 0,20m) \text{ [daN]} \quad (2)$$

PS = esforço máximo aplicado ao poste [daN];

RN = resistência nominal do poste [daN];

h = altura de fixação utilizado no poste para cálculo de esforço [m];

Figura 3 - Ensaio simples de torção.



Fonte: NTC 810001.

Momento aplicado à estrutura devido a força do vento nos condutores

Para a aplicação da força dos ventos nas estruturas, é necessário obter uma avaliação de todos os condutores envolvidos em todos os níveis, conforme equação 3.

$$A = K \times V^2 \times [(A1) + (A2) + (A3) + (A4) + (A5) + (A6)] \times a \times \cos \alpha/2 \text{ [daN]} \quad (3)$$

A = Momento aplicado à estrutura devido a força do vento nos condutores [daN]; **K** = valor de 0,00471 para superfícies cilíndricas e 0,00754 para superfícies planas; **V** = velocidade do vento (60km/h - 80km/h - 100km/h); **h** = altura de fixação [m];

(A1) e (A2) = (Seção dos cabos de rede de média tensão) x (h + 2 x h) [daN];

(A3) = (seção do cabo neutro de baixa tensão) x h [daN];

(A4) = (seção do cabo fase de baixa tensão) x (h1 + h2 + h3) [daN];

(A5) = (seção do cabo de TV a cabo) x h [daN];

(A6) = (seção do cabo de telefone) x h [daN];

a = Comprimento máximo do vão [m];

α = ângulo de deflexão da linha [graus];

Momento aplicado à estrutura devido a tração dos cabos

Para a aplicação da força de momento nas estruturas passantes (N1 - N4 - N2 - S1 - S4) com cabos de mesma bitola e deflexão, utiliza-se a equação 4. Para estruturas de fim de linha ou alteração de bitola no cabo sem deflexão (N3 - N4 - S3 - S4) utilizar a equação 5. Para estruturas de fim de linha ou alteração de bitola no cabo com deflexão (N3 - N4 - S3 - S4) utilizar a equação 6 para o eixo X e 7 para o eixo Y.

$$B = 2 \times [(B1) + (B2) + (B3) + (B4) + (B5) + (B6)] \times \text{sen } \alpha/2 \text{ [daN]} \quad (4)$$

$$B = [(B1) + (B2) + (B3) + (B4) + (B5) + (B6)] \text{ [daN]} \quad (5)$$

$$B = [(B1) + (B2) + (B3) + (B4) + (B5) + (B6)] \times \text{cos } \alpha/2 \text{ [daN]} \quad (6)$$

$$B = [(B1) + (B2) + (B3) + (B4) + (B5) + (B6)] \times \text{sen } \alpha/2 \text{ [daN]} \quad (7)$$

B = Momento aplicado à estrutura devido a tração dos cabos [daN];

h = altura de fixação [m];

B1 e B2 = (Tração de projeto aplicado longitudinalmente ao cabo de média tensão) x (h + 2 x h) [daN];

B3 = (Tração de projeto aplicado longitudinalmente ao cabo de neutro de baixa tensão) x h [daN];

B4 = (Tração de projeto aplicado longitudinalmente ao cabo de fase de baixa tensão) x (h1 + h2 + h3) [daN];

B5 = (Tração de projeto aplicado longitudinalmente ao cabo TV a cabo) x h [daN];

B6 = (Tração de projeto aplicado longitudinalmente ao cabo de telefonia) x h [daN];

α = ângulo de deflexão da linha [graus];

Momento aplicado à estrutura devido ao esforço do vento e peso do equipamento

Para a aplicação da força de momento nas estruturas devido a força do vento e peso dos equipamentos utiliza-se a equação 8.

$$C = [(C1) + (C2) + (C3) + (C4) + (C5) + (C6)] \text{ [daN]} \quad (8)$$

C = Momento aplicado à estrutura devido ao esforço do vento e peso do equipamento [daN];

V = velocidade do vento (60km/h - 80km/h - 100km/h);

h = altura de fixação [m];

C1 = Vento no poste $(0,00754/6) \times V^2 \times h^2 \times (2 \times \text{Largura da face lisa do poste no topo} + \text{Largura da face lisa do poste no solo})$ [daN];

C2 = Vento no transformador $0,00754 \times V^2 \times (\text{dimensão da lateral do equipamento} \times \text{dimensão da face do equipamento} \times h)$ [daN];

C3 = $(3 + \text{Tração do cabo de derivação} \times h)$ [daN];

C4 = (peso do transformador + distância do eixo do poste ao baricentro geométrico do transformador) [daN];

C5 = peso de outros acessórios(chave a óleo, regulador de tensão etc...) = (peso do equipamento + distância do eixo do poste ao baricentro geométrico do equipamento) [daN];

C6 = (peso do luminária + distância do eixo do poste ao centro da luminária) [daN];

Aplicação de estai

O estai ou estaiamento de rede deve ser projetado quando os esforços mecânicos aplicados ao poste ultrapassarem os valores de resistência de aplicação na estrutura, ou quando o solo apresentar uma baixa taxa de resistência para aplicação do poste, gerando uma compensação de força vetorial oposta ao momento resultante aplicado ao poste. A aplicação do estai pode ser do tipo âncora, contra poste ou poste a poste.

Momento resistente para estai de âncora em rede de média tensão e baixa tensão

Para aplicação de estai de âncora para rede de média tensão utilizar a equação 9 e para rede de baixa tensão aplicar conforme equação 10, considerando fixação na superfície em 45 graus conforme figura 4. A aplicação do estai de âncora é efetuado apenas em casos onde não seja possível inclusão ou alteração do poste para suportar novas especificações da rede.

$$MRE = REP \times 1,40 \times h \times \cos 45 \text{ [daN]} \quad (9)$$

MRE = Momento resistente para estai de âncora em rede primária [daN];

REP = Momento resistente do estai primário conforme NTC 850001 [daN];

h = altura de fixação [m];

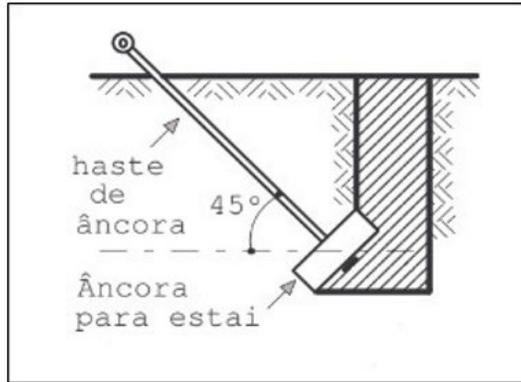
$$MRS = RES \times 1,40 \times h \times \cos 45 \text{ [daN]} \quad (10)$$

MRS = Momento resistente para estai de âncora em rede secundária [daN];

RES = Momento resistente do estai secundário conforme NTC 850001 [daN];

h = altura de fixação [m];

Figura 4 - Aplicação de estai âncora.



Fonte: NTC 850001

Momento resistente de estai de contra poste

A aplicação de estai contra poste utiliza poste de concreto com resistência nominal de 600 daN e ângulo de inclinação do contra poste em 30 graus, conforme equação 11 e figura 5.

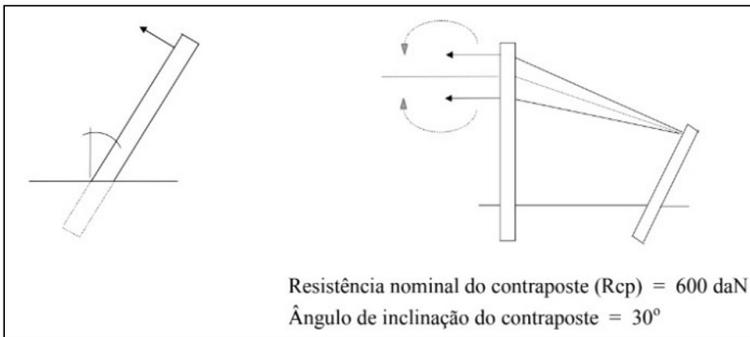
$$MCP = RCP \times 1,40 \times h \times \cos 30 \text{ [daN]} \quad (11)$$

MCP = Momento resistente para estai de contra poste [daN];

RCP = Momento resistente do contra poste [daN];

h = altura de fixação [m];

Figura 5 - Aplicação de estai contra poste.



Fonte: NTC 850001.

Momento resistente de estai de poste a poste

A aplicação de estai do tipo poste a poste, leva em consideração a resistência nominal do poste de ancoragem, para a estabilidade mecânica e é efetuada conforme equação 12, representado na figura 6.

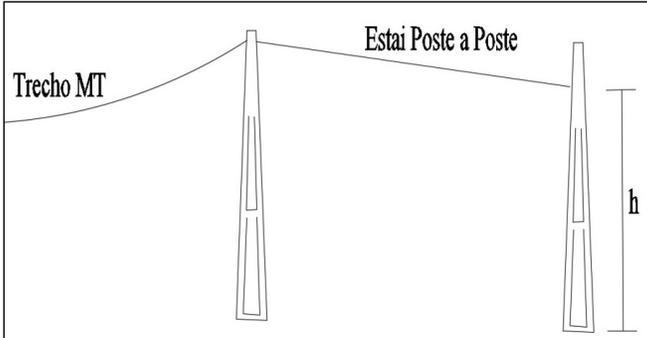
$$MPA = RPA \times 1,40 \times h \text{ [daN]} \quad (12)$$

MPA = Momento resistente para estai poste a poste [daN];

RPA = Momento resistente do poste de ancoragem [daN];

h = altura de fixação [m];

Figura 6 - Representação estai poste a poste.



Fonte: elaborada pelo autor.

Resultado dos Esforços

A soma de aplicação dos esforços, no caso mais crítico, não pode ser superior à soma dos esforços suportáveis pela seção do poste implantado conforme equação 13 e 14.

$$\Sigma \text{Momento aplicado à seção [daN]} \leq \Sigma \text{Momento resistente da seção [daN]} \quad (13)$$

$$A + B + C \leq PS + MRE + MRS + MCP + MPA \quad (14)$$

Escolha do Poste

A escolha do poste a ser utilizado deve respeitar as condições estabelecidas nos resultados dos esforços obtidos, buscando uma estabilidade mecânica, conforme seus vetores de momentos resultantes exemplificados na figura 7. O cálculo da resultante é efetuado pelo método Geométrico ou analítico.

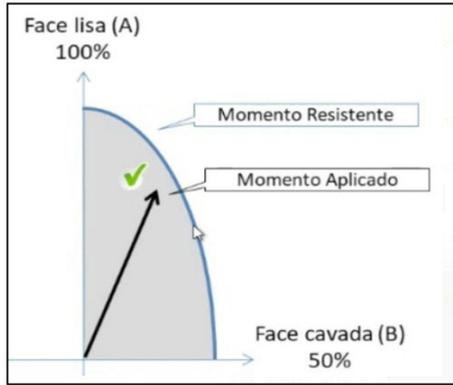
Figura 7 - Representação dos vetores.



Fonte: elaborada pelo autor.

Os esforços não ortogonais, devem ser suportados pelos postes simultaneamente nas faces A e B, onde o momento aplicado deve ser menor ou igual ao momento resistente do poste conforme figura 8.

Figura 8 - Representação momentos no poste.



Fonte: NTC 810001.

Conforme Norma Técnica Copel 810001, para efetuar o cálculo do momento resistente do poste em esforços não ortogonais utiliza a equação 15 de coeficiente de correção, identificado como exemplo na figura 9.

$$(-0,00722 \times \alpha)$$

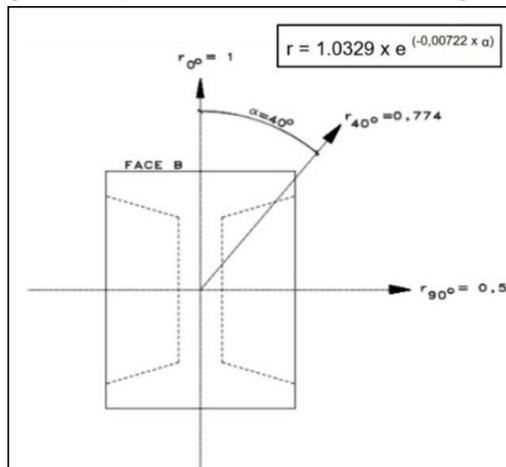
$$r = 1.0329 \times e \times PS \text{ [daN]}$$

r = Coeficiente de redução de carga nominal em função do ângulo do momento aplicado;

α = Ângulo resultante da linha perpendicular com a face A;

PS = Esforço máximo aplicado ao poste [daN];

Figura 9 - Aplicação de esforços não ortogonais.



Fonte: NTC 810001.

Limitação Mecânica da Cruzeta

A limitação mecânica referente a cruzetas é expressada através do seu ponto de fixação e quantidade de cruzetas aplicadas até fixação do condutor mais afastado.

Esforço máximo suportado pela cruzeta é expressado pela equação 16 e sua aplicação segue referência ao crítico informado na equação 17.

$$RC = RNC \times 1,40 \times d \text{ [daN]} \quad (16)$$

RC = Resistência da cruzeta [daN];

RNC = Resistência nominal da cruzeta [daN];

d = Distância do ponto de fixação da cruzeta até o condutor mais afastado [m];

$$QC + RC \leq TP \times d \text{ [daN]} \quad (17)$$

QC = Quantidade de cruzeta;

RC = Resistência da cruzeta [daN];

TP = Tração projetada para estrutura conforme quantidade de cabos [daN];

d = Distância do ponto de fixação da cruzeta até o condutor mais afastado [m];

Limitação mecânica de isoladores de pino

Estruturas passantes do tipo N1 e N2, a isolação deve suportar o esforço máximo aplicado conforme a equação 18 de equilíbrio de esforços.

$$A + B \leq ES \quad (18)$$

ES = Esforço suportável no isolador [daN];

A = Momento aplicado à estrutura devido a força do vento nos condutores [daN];

B = Momento aplicado à estrutura devido a tração dos cabos [daN];

Limitação Mecânica de Isoladores de Roldana

Todas as estruturas, contendo isoladores do tipo roldana, devem suportar o esforço máximo aplicado conforme a equação 19 de equilíbrio de esforços.

$$A + B \leq ER \quad (19)$$

ER = Esforço suportado pelo isolador roldana [daN];

A = Momento aplicado à estrutura devido a força do vento nos condutores [daN];

B = Momento aplicado à estrutura devido a tração dos cabos [daN];

Cálculos para vão Elétrico dos Condutores

Para efetuar a determinação de afastamento dos condutores no meio do vão, utiliza-se a equação 20.

$$SMV = \{[d1 \times \cos(\alpha \div 2)] + [d2 \times \cos(\alpha \div 2)]\} \div 2 \text{ [m]} \quad (20)$$

SMV = Afastamento entre condutores no meio do vão [m];

d1 = Afastamento entre condutores na cruzeta considerada 1 [m];

d2 = Afastamento entre condutores na cruzeta considerada 2 [m];

α = Deflexão da linha na estrutura conforme fixação dos condutores [graus];

Cálculos para dimensionamento de cabos

O dimensionamento de condutores deve ser efetuado observando a queda de tensão máxima permitida, perdas, capacidade térmica e capacidade de condução de energia elétrica de cada condutor, considerando carga máxima suportada conforme figura 10, seguindo especificações dos fabricantes.

Figura 10 - Cargas máxima suportadas por cabos.

Código	Descrição	Corrente Máxima (A) *	Demanda Máxima (kVA)							
			34.500 V		13.800 V		220 V		254 V	
			3#	1#	3#	2#	3#	2#1#	2#1#	
0166413	Cabo Alum. Coberto (XLPE) 35kV 70 mm ²	207	12.369	-	-	-	-	-	-	-
3012077	Cabo de Alum. Quadruplex 35 mm ²	135	-	-	-	-	51	-	-	-
3012220	Cabo CA 2 AWG	152	9.083	3.028	3.633	2.098	58	33	39	-
3012247	Cabo CA 2/0 AWG	235	14.043	-	5.617	-	90	-	-	-
3012255	Cabo CA 4/0 AWG	314	18.763	-	7.505	-	120	-	-	-
3012271	Cabo CA 336,4 MCM	419	25.038	-	10.015	-	-	-	-	-
3012328	Cabo CAA 4 AWG	116	6.932	2.311	2.773	1.601	44	26	29	-
3012352	Cabo CAA 2/0 AWG	239	14.282	-	5.713	-	91	-	-	-
3012360	Cabo CAA 4/0 AWG	320	19.122	-	7.649	-	122	-	-	-
7212330	Cabo CAA 336,4 MCM	421	25.157	-	10.063	-	-	-	-	-
7348819	Cabo Cobre Nu 35 mm ²	235	14.043	4.681	5.617	3.243	90	52	60	-
7348835	Cabo Cobre Nu 70 mm ²	349	20.855	-	8.342	-	133	77	89	-
7348843	Cabo Cobre Nu 120 mm ²	535	31.969	-	12.788	-	-	-	-	-
7349858	Cabo Alum. Coberto (XLPE) 15kV 185 mm ²	525	-	-	12.549	-	-	-	-	-
7349866	Cabo Alum. Coberto (XLPE) 15kV 35 mm ²	157	-	-	3.753	-	-	-	-	-
7349874	Cabo Alum. Coberto (XLPE) 35kV 185 mm ²	497	29.699	-	-	-	-	-	-	-
8106320	Cabo Alum. Coberto (XLPE) 15kV 70 mm ²	229	--	-	5.474	-	-	-	-	-
8106444	Cabo Alum. Coberto (XLPE) 35kV 120 mm ²	291	17.389	-	-	-	-	-	-	-
8108676	Cabo de Alumínio Triplex 35 mm ²	150	-	-	-	-	-	33	38	-
8108749	Cabo de Alum. Quadruplex 70 mm ²	215	-	-	-	-	82	-	-	-
8108757	Cabo de Alum. Quadruplex 120 mm ²	308	-	-	-	-	117	-	-	-

Fonte: MIT 162803.

Cálculos para Dimensionamento de Transformador

Para determinar a potência do transformador considera-se a nova demanda solicitada conforme equação 21.

$$POT = \sqrt{3} \times VI \times II \times \cos(\phi) \text{ [kVA]} \tag{21}$$

POT = Potência do transformador [kVA];

VI = Tensão de linha [Volts];

II = Corrente de linha [Ampere];

ϕ = Ângulo de fator de potência [Graus];

Cálculos para dimensionamento de chave fusível de transformadores

Referente ao Manual de Instruções técnicas Copel 162503, a proteção efetuada através de chaves fusíveis em transformadores efetua conforme equação 22, para transformadores monofásicos em 13,8 kV, equação 23, para transformadores trifásicos em 13,8 kV, equação 24, para transformadores em 34,5 kV monofásicos de equação 25, para transformadores trifásicos em 34,5 kV. representadas pelas figuras 11 e 12.

$$IE = (P / VI) \times 1,5 \text{ [A]} \tag{22}$$

$$IE = \{P / (\sqrt{3} \times VI)\} \times 1,5 \text{ [A]} \tag{23}$$

$$IE = \{P / (VI / \sqrt{3})\} \times 1,5 \text{ [A]} \tag{24}$$

$$IE = \{P / (\sqrt{3} \times VI)\} \times 1,5 \text{ [A]} \tag{25}$$

IE = Corrente de elo fusível [A];

P = Potência do transformador [kVA];

VI = Tensão de linha [Volts];

Figura 11 - Aplicação de elos fusíveis em 13,8kV.

TRANSFORMADOR		ELO FUSÍVEL
TIPO	kVA	TIPO
MONOFÁSICO	10	2H
	15	2H
	25	3H
	2 x 25	6K
	37,5	5H
	50	6K
TRIFÁSICO	15	1H
	30	2H
	45	3H
	75	5H
	112,5	6K
	150	10K
	225	10K

Fonte: MIT 162503.

Figura 12 - Aplicação de elos fusíveis em 34,5kV.

TRANSFORMADOR		ELO FUSÍVEL
TIPO	kVA	TIPO
MONOFÁSICO	10	1H
	15	1H
	25	2H
	2 x 25	5H
	37,5	3H
	50	5H
TRIFÁSICO	15	1H
	30	1H
	45	2H
	75	2H
	112,5	3H

Fonte: MIT 162503.

Cálculos para dimensionamento de chave fusível de trecho

Conforme informações referente ao Manual de Instruções técnicas Copel 162503, a atuação de chaves fusíveis está relacionada à corrente de curto circuito ocasionada na rede de distribuição, tanto em baixa tensão, quanto em média tensão. Para o dimensionamento da proteção do circuito de média tensão utiliza-se a equação 26.

$$IE = P / \sqrt{3} \times VI \times \cos(\phi) \text{ [A]} \quad (26)$$

IE = Corrente de elo fusível [A];

P = Potência do circuito [kVA];

VI = Tensão de linha [Volts];

ϕ = Ângulo de fator de potência [Graus];

Os elos fusíveis devem suportar 20% mais corrente do que a carga máxima existente no trecho em regime permanente, e sua corrente nominal não deve ultrapassar a um quarto da corrente de curto circuito fase-terra mínima sob o trecho a ser protegido, conforme equação 27.

$$1,2 \times Ic(\text{máx}) < Ie < Icc \phi(T_{\text{mín}}) / 4 \quad (27)$$

Ic(máx) = Corrente máxima existente no trecho [A];

Ie = Corrente nominal no trecho [A];

Icc = Corrente de curto circuito fase-terra [A];

Tabelas para Trações e Flechas de Condutores

Os valores para trações e flechas aplicadas para realização de projetos na área correspondente a concessão da companhia Copel, utiliza-se padrões catalogados e estabelecidos em tabelas na Norma Técnica Copel 850005, quais foram descritas pelo programa DAEFLETA, através da equação da catenária de cada vão escolhido, oferecendo subsídio para auxílio na escolha correta das estruturas, como básicas em situações extremas, em temperaturas mínimas sem

vento e temperaturas máximas sem vento. As informações estabelecidas referente ao gabarito da Catenária estão contidas na Norma Técnica Copel 850001, item 1.6.3.2.

Cálculo para Esforços Verticais, Sendo de Arrancamento ou Compressão

Para indicação de esforços verticais total, conforme Norma Técnica Copel 850005, página 146, quando negativos indica um esforço ascendente, do tipo arrancamento e quando positivo indica esforço descendente, do tipo compressão. Para cálculos utiliza-se as equações 28, 29 e 30, conforme especificações figura 13.

$$VT = V_{xy} - V_{xw} \text{ [daN]} \quad (28)$$

VT = Esforço vertical total [daN];

V_{xy} e V_{xw} = Esforços verticais parciais [daN];

$$V_{xy} = [(axy \times p) \div 2] - [(hxy \times T) \div axy] \text{ [daN]} \quad (29)$$

$$V_{xw} = [(axw \times p) \div 2] - [(hxw \times T) \div axw] \text{ [daN]} \quad (30)$$

V_{xy} e V_{xw} = Esforços verticais parciais [daN];

axy e axw = Vão adjacentes a estrutura central [m];

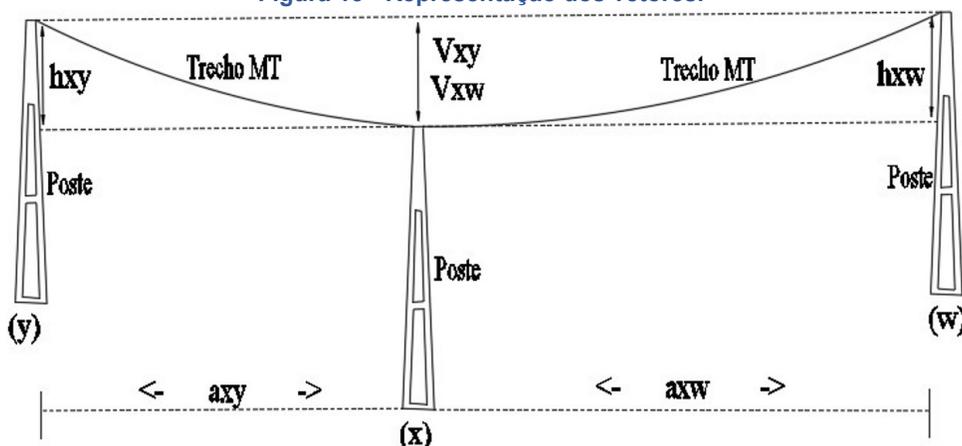
x, y e w = Estruturas a serem analisadas;

p = Peso do condutor [kg];

T = Tração do cabo [daN];

hxy e hxw = Desnível entre a fixação dos cabos e a estrutura adjacente, será valor positivo quando a estrutura adjacente estiver acima da estrutura central e negativo quando estiver abaixo [m];

Figura 13 - Representação dos vetores.



Fonte: elaborada pelo autor.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para que o projeto de rede de distribuição de energia elétrica seja eficaz, é necessário respeitar alguns requisitos básicos, os quais foram descritos no decorrer deste trabalho. Destes requisitos, os mais importantes a serem levados em consideração, são: o correto dimensionamento de poste para sustentação de cabos de energia, a coordenação entre os equipamentos de proteção e equipamentos que compõem o sistema elétrico de potência, que são estes responsáveis pelo excelente funcionamento do sistema. Sendo assim, é de grande importância para o engenheiro que pretende atuar nesta área, o conhecimento aplicado à elaboração dos cálculos e dimensionamento dos materiais para projetos de redes de distribuição, bem como a utilização de softwares que realizam os cálculos de forma automática.

A fiscalização dos serviços prestados pelas concessionárias de energia elétrica, é de responsabilidade do órgão regulamentador ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), que tem por finalidade, garantir que os consumidores não sejam prejudicados pelas faltas que ocorrem no sistema de distribuição, estabelece as concessionárias os seguintes indicadores: DEC, FEC, DIC, FIC e DMIC, que são metas a serem cumpridas, caso não ocorra, as concessionárias são obrigadas a ressarcir financeiramente os consumidores.

Diante do exposto, fica evidente a importância do projeto de rede de distribuição de energia elétrica e a necessidade das concessionárias de distribuição de energia, realizarem estudos e projetos com a finalidade de manter e aperfeiçoar o sistema, para que o mesmo esteja sempre em condições de operar de forma eficaz, e segura para todos seus usuários.

REFERÊNCIAS

ABRADEE. **Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica.**

Disponível em: <https://www.abradee.org.br/setor-de-distribuicao/a-distribuicao-de-energia/>. Acesso em: 14 de junho de 2022.

ABRADEE. **Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica.**

Disponível em: <https://www.abradee.org.br/setor-eletrico/visao-geral-do-setor/>. Acesso em: 14 de junho de 2022.

ABNT. **NBR 5422/1985.** disponível em https://www.academia.edu/35092986/NBR_5422_1985_Projeto_de_linhas_a%C3%A9reas_de_transmiss%C3%A3o_de_energia_el%C3%A9trica. Acesso em 06 de junho de 2022.

ABNT. **NBR 15688/2012.** disponível em <https://www.ipen.br/biblioteca/slr/cel/N3128.pdf>. Acesso em 06 de maio de 2022.

COPEL. **NTC 850001.** Normas Técnicas COPEL Disponível em: <https://www.copel.com/> Acesso em 11 de junho de 2022.

COPEL. **Companhia Paranaense de Energia Elétrica**. Disponível em <https://www.copel.com/site/fornecedores-e-parceiros/pesquisa-de-normas-tecnicas/>. Acesso em 06 de maio de 2022.

CEA. **Companhia de Eletricidade do Amapá**. NTD-601 Norma Técnica de Distribuição. Disponível em https://editor.amapa.gov.br/arquivos_portais/publicacoes/CEA_d6d0cadaac345c32dd9c72358256a481.pdf. Acesso em 08 de junho de 2022.

COPEL. **NTC 810425**. Normas Técnicas COPEL. Disponível em <https://www.copel.com/hpcopel/>. Acesso em 10 de maio de 2022.

COPEL. **NTC 841005**. Normas Técnicas COPEL. Disponível em <https://www.copel.com/hpcopel/>. Acesso em 08 de junho de 2022.

COPEL. **NTC 850005**. Normas Técnicas COPEL. Disponível em <https://www.copel.com/hpcopel/>. Acesso em 16 de junho de 2022.

COPEL. **NTC 810001**. Normas Técnicas COPEL. Disponível em <https://www.copel.com/hpcopel/>. Acesso em 6 de julho de 2022.

IDEC. **Instituto Brasileiro de Defesa do Consumidor**. Disponível em https://idec.org.br/sites/default/files/qualidade_setor_eletrico_brasil.pdf. Acesso em: 11 de junho de 2022.

MME. **Ministério de Minas e Energia**. Disponível em <https://www.gov.br/mme/pt-br>. Acesso em 9 de maio de 2022.

MIT 162803. **Manual de Instruções Técnicas COPEL**. Disponível em <https://copel0.sharepoint.com>. Acesso em 10 de outubro de 2022.

RIBEIRO, Amarolina. **“Distribuição de energia elétrica no Brasil”; Brasil Escola**. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/distribuicao-energia-eletrica-no-brasil.htm>. Acesso em 18 de julho de 2022.

SBA. **Sociedade Brasileira de Automática**. Disponível em https://idec.org.br/sites/default/files/qualidade_setor_eletrico_brasil.pdf. Acesso em 8 maio de 2022.

S. B. **Saber Elétrica**. disponível em <https://www.sabereletrica.com.br/> Acessado em 15 de junho de 2022.