

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**ISABEL SCHREINER HECK**

**CÁLCULO DE ESFORÇOS EM BARRAMENTOS FLEXÍVEIS  
CAUSADOS POR CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO**

Porto Alegre

2017

**ISABEL SCHREINER HECK**

**CÁLCULO DE ESFORÇOS EM BARRAMENTOS FLEXÍVEIS  
CAUSADOS POR CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO**

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro

Porto Alegre

2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ISABEL SCHREINER HECK

**CÁLCULO DE ESFORÇOS EM BARRAMENTOS FLEXÍVEIS  
CAUSADOS POR CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO**

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina de “Projeto de Diplomação” do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: \_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, UFRGS  
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul –  
Porto Alegre, Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, UFRGS  
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Marcos Telló, PUCRS  
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Roberto Petry Homrich, UFRGS  
Doutor pela Universidade Estadual de Campinas – Campinas, Brasil

Porto Alegre

2017

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos meus pais, Paulo e Asta, e aos meus irmãos Gabriel e Carolina. O apoio incondicional durante esta longa jornada foi fundamental para a conclusão desta etapa mantendo a lucidez. Compartilho com eles a conquista do título que postulo com este trabalho, toda minha gratidão e meu amor.

Se algum dia eu não tiver mais nada, tenho tudo, pois tenho vocês.

.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço imensamente aos meus pais, Paulo e Asta, por todo o amor, suporte, força e tranquilidade, por acreditarem em mim e permitir que essa jornada fosse percorrida ao meu modo; apoiando minhas decisões mesmo discordando delas;

Aos meus irmãos, Gabriel e Carolina, já graduados Engenheiros, que sempre me incentivaram em todos os momentos e por quem nutro profunda admiração e amor;

À toda a minha família, onde todos sempre me encorajaram e apoiaram;

Às grandes amizades que fiz na universidade e que espero levar para a vida, pelas alegrias e sofrimentos partilhados ao longo desses anos de graduação;

A todos que entenderam minhas ausências, e aos que não entenderam também.

Aos bons professores, que além de abrirem as portas da engenharia para o meu futuro, me ensinaram a grandeza e a beleza da busca pelo conhecimento;

Ao Prof. Dr. Tiaraju pela atenção, compreensão e lições de vida.

À banca examinadora deste trabalho, composta por três Drs. Engenheiros que tiveram notável importância em minha formação profissional, além de admirá-los profissionalmente, os admiro como pessoas, pela humildade e disposição que sempre tiveram ao me encontrar.

*"But be yourself is all that you can  
do, yeah"*

*"Promise me, you won't let them  
put out your fire"*

*R.I.P. Chris Cornell*

## RESUMO

As correntes de curto-circuito, ao circularem pelos condutores paralelos de linhas de transmissão, distribuição e subestações induzem forças eletromagnéticas entre os condutores. Seus efeitos são visíveis em três principais forças de tração dinâmicas, força de tração durante o curto-circuito,  $F_{t,d}$ , causada pelo balanço dos condutores (*swing-out*), força de tração após o curto,  $F_{f,d}$ , quando os condutores retornam à posição inicial (*drop back*) e a força de efeito *pinch* (*pinch effect*),  $F_{pi,d}$ , entre subcondutores de uma mesma fase.

Com o crescente aumento dos níveis de curto-circuito, originado principalmente pela frequente conexão de novas unidades geradoras ao sistema, interligado ou isolado; as forças induzidas nos condutores terão ordens de grandeza cada vez maiores e não podem ser negligenciadas. Devido às dimensões e arranjos, o cálculo das forças se mostra necessário no correto dimensionamento do projeto estrutural principalmente de subestações de energia, onde as forças às quais as estruturas e conexões estão sujeitas além dos espaçamentos entre fases são significativamente afetados.

O presente trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de um arquivo que reproduza a sequência de cálculos de esforços mecânicos em barramentos flexíveis causados por correntes de curto-circuito, apresentados na norma IEC60865-1.

Palavras-chave: corrente de curto-circuito, forças eletromagnéticas efeitos mecânicos, condutores flexíveis, IEC60865-1, arquivo .xlsm VBA.

## ABSTRACT

Short-circuit currents, when flows through parallel conductors of transmission lines, distribution and substations induce electromagnetic forces between the conductors. Its effects are visible in three main dynamic tensile forces, tensile force during short-circuit,  $F_{t,d}$ , caused by swing out, tensile force after short-circuit,  $F_{f,d}$ , caused by drop (drop force) and tensile force of pinch effect,  $F_{pi,d}$ , between bundle subconductors.

With the increasing of short-circuit levels, caused by the connection of new generating units to the interconnected or isolated system, the forces induced in the conductors will have larger orders of magnitude and cannot be neglected. Due to the dimensions and arrangements, calculation of the forces is required for a correct structural design, mainly for substations, where the forces in which structures and connections are exposed and the air clearance between phases can change significantly.

The present project has for purpose the development of a file that reproduces a sequence of calculations of mechanical effects in flexible conductors caused by short-circuit currents as in the IEC60865-1.

Keywords: short-circuit current, electromagnetic forces, mechanical effects, flexible conductors, IEC60865-1, VBA .xlsm file.

## SUMÁRIO

1.	Introdução .....	14
1.1.	Motivação .....	14
1.2.	Objetivo .....	14
1.3.	Organização do Trabalho.....	15
1.4.	Efeitos mecânicos causados pelas correntes de curto-circuito. ....	15
2.	Revisão da Literatura .....	21
2.1.	Sistema Elétrico de Potência .....	21
2.2.	Subestações.....	22
2.3.	Barramentos .....	23
2.4.	Materiais condutores.....	24
2.5.	Cabos condutores usados como barramento.....	25
2.6.	Espaçadores .....	29
2.7.	Força eletromagnética.....	31
2.8.	Força do vento e variação da temperatura .....	33
2.9.	Curto-Circuito.....	34
2.9.1.	Corrente Simétrica e Assimétrica .....	34
2.9.2.	Correntes de curto-circuito em sistema trifásico .....	36
3.	Cálculo dos esforços de acordo com a norma IEC60865-1.....	37
3.1.	Parâmetros característicos .....	38
3.2.	Força de tração $F_t, d$ durante o curto-circuito.....	42
3.3.	Mudança dinâmica da flecha devido ao alongamento do condutor e mudança da forma da curva do condutor .....	43
3.4.	Força de tração $F_f, d$ após o curto-circuito.....	45
3.5.	$F_{pi, d}$ e os efeitos em feixes de condutores.....	46
3.5.1.	Força de tração $F_{pi, d}$ no caso de os subcondutores colidirem.....	49
3.5.2.	Força de tração $F_{pi, d}$ no caso de os subcondutores não colidirem.....	50
3.6.	Cargas estruturais .....	53
3.6.1.	Carga de projeto para isoladores de poste, seus suportes e conectores .....	53
3.6.2.	Carga de projeto para estruturas, isoladores e conectores com forças de tração transmitido por cadeias de isoladores .....	53
3.6.3.	Carga de projeto para fundações .....	54
4.	Desenvolvimento do aplicativo em Excel .....	55
5.	Estudo de caso .....	64

5.1.	Caso 1 - Efeitos mecânicos em um arranjo de 110 kV com condutores desestressados ( <i>slack</i> ) .....	64
5.2.	Caso 2 – Efeitos mecânicos em condutores estressados ( <i>strained</i> ).....	68
5.3.	Caso 2.1 – Efeitos mecânicos em condutores estressados ( <i>strained</i> ) – Caso 2 com aumento da distância entre os subcondutores.....	74
6.	Conclusão .....	78
7.	Referências .....	79

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Tensões em um feixe de subcondutores flexíveis durante e após um curto-circuito bifásico	16
Figura 2: Tensões em um feixe de subcondutores flexíveis durante e após um curto-circuito bifásico	16
Figura 3: Movimento de um subcondutor flexível durante e após um curto-circuito bifásico .....	17
Figura 4: Movimento de um subcondutor durante e após um curto-circuito, a trifásico b bifásico .....	18
Figura 5: Movimento entre subcondutores de uma mesma fase durante um curto circuito.....	19
Figura 6: Arranjos reais de condutores flexíveis sob corrente de curto-circuito.....	20
Figura 7: Modelo de Sistema Elétrico de Potência .....	21
Figura 8: AAC All Aluminium Conductor.....	26
Figura 9: Padrões de distribuição de fios dos cabos ACSR .....	27
Figura 10: Padrões de distribuição de fios em cabos ACAR .....	28
Figura 11: Diferentes distribuições de fios trapezoidais em cabos condutores.....	29
Figura 12: Modelos de espaçadores amortecedores para 2, 3 e 4 condutores .....	30
Figura 13: Força eletromagnética em condutores paralelos .....	32
Figura 14: Densidade do fluxo magnético em um curto-circuito trifásico.....	33
Figura 15: Correntes simétricas e assimétricas .....	35
Figura 16: Faltas e sentido das correntes de curto-circuito em sistema trifásico. ....	36
Figura 17: Máximo ângulo de inclinação $\delta_{max}$ para uma dada duração máxima de curto-circuito $T_k$	142
Figura 18: Fator $\psi$ para força de tração em condutores flexíveis.....	43
Figura 19: $v_2$ como função de $v_1$ .....	47
Figura 20: $v_3 \times \sin 180^\circ/n$ como função de $as/d$ .....	48
Figura 21: $\xi$ como função de $j$ e $est$ .....	50
Figura 22: $\eta$ como função de $j$ e $est$ $2,5 < as/d \leq 5,0$ .....	51
Figura 23: $\eta$ como função de $j$ e $est$ $5,0 < as/d \leq 10,0$ .....	52
Figura 24: $\eta$ como função de $j$ e $est$ $10,0 < as/d \leq 15,0$ .....	52
Figura 25: Fluxograma .....	56
Figura 26: Habilitar macros ao abrir o arquivo (se necessário).....	57
Figura 27: Acessando a interface do VBA .....	58
Figura 28: Interface do VBA.....	58
Figura 29: Interface do usuário - dados de entrada .....	61
Figura 30: Interface do usuário – botões .....	62
Figura 31: Interface do usuário – Resultados/Resumo.....	62
Figura 32: Interface do usuário – Resultados (etapas de cálculo).....	63

Figura 33: Caso 1 - Arranjo dos condutores.....	64
Figura 34: Caso 1 – Dados fornecidos .....	65
Figura 35: Dados de entrada – Caso 1.....	66
Figura 36: Resultados/Resumo – Caso 1.....	66
Figura 37: Resultados (etapas de cálculo) – Caso 1 .....	67
Figura 38: Caso 2 - Arranjo dos condutores.....	69
Figura 39: Caso 2 – Dados fornecidos .....	70
Figura 40: Dados de entrada – Caso 2.....	71
Figura 41: Resultados/Resumo – Caso 2.....	72
Figura 42: Resultados (etapas de cálculo) – Caso 2.....	72
Figura 43: Dados de entrada – Caso 2.1.....	74
Figura 44 : Resultados/Resumo – Caso 2.1.....	75
Figura 45: Resultados (etapas de cálculo) – Caso 2.1 .....	75

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Valores de $c_{th}$ para determinados materiais de cabo condutor.....	44
Quadro 2: Comparação dos resultados com a IEC 60865-2 – Caso 1 .....	67
Quadro 3: Comparação dos resultados com a IEC 60865-2 – Caso 2 .....	72
Quadro 4: Comparação dos resultados com a IEC 60865-2 – Caso 2.1 .....	76

# 1. Introdução

A necessidade de suprir a demanda de energia elétrica no Brasil exige um aumento contínuo da capacidade geradora, e essa conexão de novas unidades geradoras, além de mudanças topológicas e interligações, provoca significativo aumento dos níveis das correntes de curto-circuito a cada ano. Assim, uma subestação de energia, independente de nova ou antiga, que até hoje não tenha apresentado problemas estruturais causados por correntes de curto-circuito, em poucos ou muitos anos pode vir a apresentar.

De acordo com a publicação CIGRÈ 105 [2], as falhas nas subestações, causadas pelos efeitos mecânicos da corrente de curto-circuito são extremamente raras, no entanto, cabe aos engenheiros de projeto garantir que os projetos da subestação atendam aos requisitos extremos associados às condições de curto-circuito.

O Brasil não possui normas específicas para o cálculo de esforços mecânicos causados por curtos-circuitos, as normas exigem que se avalie o curto-circuito apenas na aproximação entre fases. Publicações internacionais datam dos anos 1960, e as publicações e normas utilizadas até hoje IEC60865-1 [1], IEEE 605 [23] além da Brochura Técnica 105 do CIGRÈ [2] datam dos anos 1990.

## 1.1. Motivação

Como neste caso, existem diversas outras normas importantes que exigem uma longa sequência de cálculos para cada teste e reteste e que como opção tem-se apenas a aquisição de algum software de valor elevado que os calcule. A exemplo deste projeto, é possível criar seus próprios arquivos, aplicativos e programas com o custo apenas de suas horas de trabalho.

## 1.2. Objetivo

Este trabalho tem por objetivo criar um arquivo que reproduza os cálculos dos efeitos mecânicos em barramentos flexíveis dispostos horizontalmente, causados por correntes de curto-circuito, conforme a IEC60865-1 [1], fornecendo como saídas as forças causadas pela corrente de curto-circuito em arranjos de um condutor e de feixes com até quatro subcondutores por fase, as distâncias mínimas entre fases e o deslocamento horizontal

máximo dos vãos, além de sugerir tensões mínimas de projeto às quais os dispositivos e estruturas em contato com os barramentos estão sujeitos.

### 1.3. Organização do Trabalho

O presente trabalho é composto por seis capítulos, não incluindo a conclusão e as referências. Este primeiro, titulado de Introdução, apresenta uma ideia dos efeitos mecânicos causados por correntes elevadas de curto-circuito em condutores flexíveis.

O segundo capítulo traz uma breve revisão de conceitos teóricos relacionados aos cálculos a serem executados, como barramentos e os materiais que os compõe, força eletromagnética, curto-circuito e suas correntes.

O terceiro capítulo reproduz as etapas de cálculo dos efeitos mecânicos em barramentos flexíveis, causados por correntes de curto-circuito da mesma forma em que são feitos na IEC 60865-1 [1], não foi desenvolvida nenhuma nova equação.

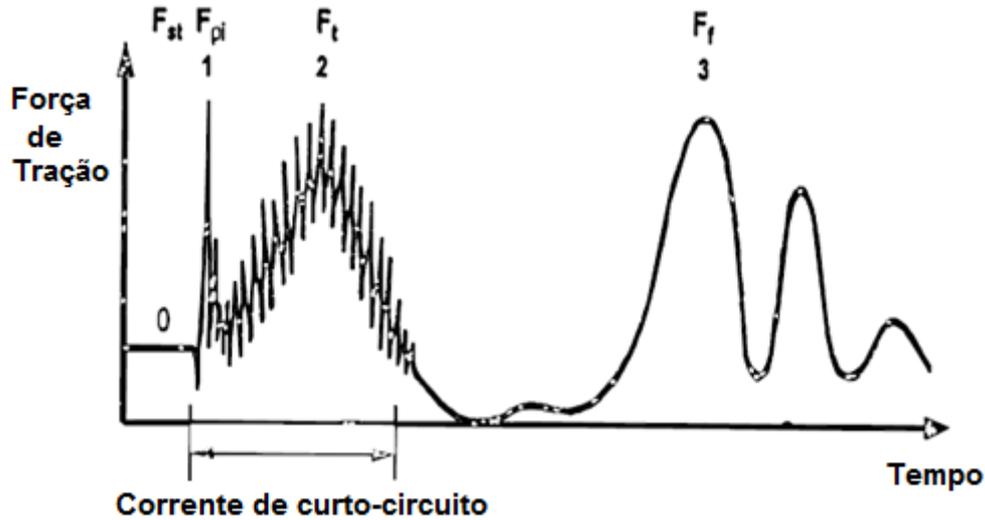
O quarto capítulo comenta o desenvolvimento do arquivo, onde a sequência de equações do Capítulo 3 é reescrita em forma de código para automatizar os cálculos. O capítulo traz também uma breve introdução à plataforma VBA do Microsoft Excel.

O quinto reproduz dois exemplos de cálculos da segunda parte da norma, para validar o correto funcionamento do arquivo

### 1.4. Efeitos mecânicos causados pelas correntes de curto-circuito.

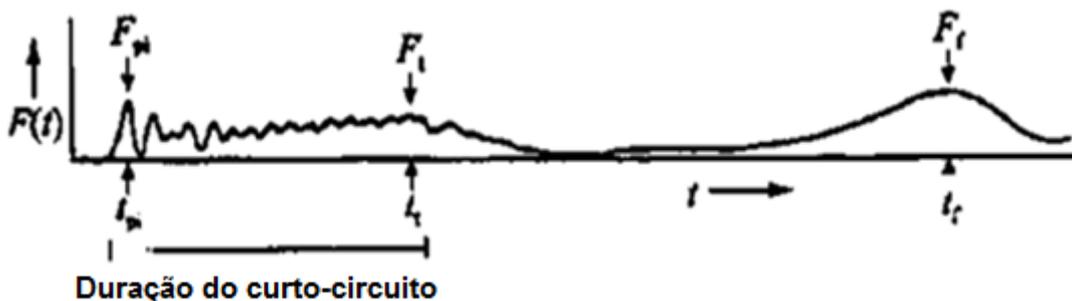
As Figura 1 e Figura 2 mostram respostas típicas das tensões mecânicas geradas em arranjos de feixes de subcondutores dispostos horizontalmente sob condição de falha bifásica. Em ambas as figuras são identificados três picos de tensão,  $F_{pi}$ ,  $F_t$ , e  $F_f$ , onde, de acordo com a IEC60865-1 [1] o projeto deve considerar como tensão mínima o valor máximo encontrado entre as três forças.

Figura 1: Tensões em um feixe de subcondutores flexíveis durante e após um curto-circuito bifásico



Fonte: Adaptado de CIGRÈ Brochura Técnica 214, 2002

Figura 2: Tensões em um feixe de subcondutores flexíveis durante e após um curto-circuito bifásico



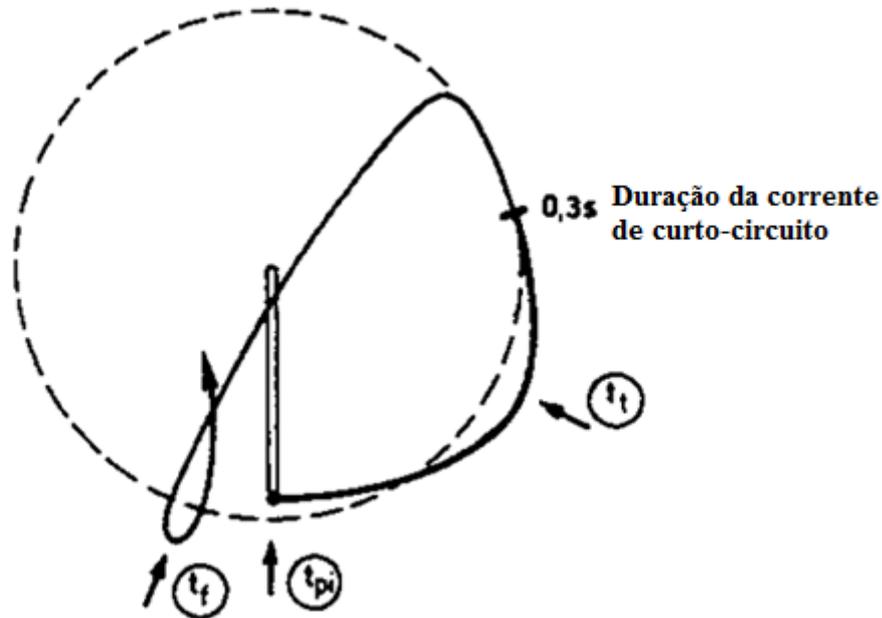
Fonte: Adaptado de CIGRÈ Brochura Técnica 105, 1996

A força de efeito *pinch*,  $F_{pi}$ , ocorre logo após o início do curto-circuito, especialmente durante a parte assimétrica da corrente de curto-circuito entre os subcondutores do feixe de uma mesma fase quando os subcondutores se atraem. A força durante o curto-circuito,  $F_t$ , ocorre ao fim do fluxo de corrente de curto-circuito ( $t_t$  na Figura 2) e é causada devido ao balanço e deformação do condutor. A força após o curto-circuito,  $F_f$ , sempre ocorre após o fim do fluxo de corrente de curto-circuito ( $t_f$  na Figura 2) e é causada pela perda de energia potencial gravitacional devido à queda do condutor após o curto-circuito.

O movimento de um dos subcondutores durante o curto-circuito da Figura 2 é representado na Figura 3, que mostra o deslocamento do condutor destacando a posição em

que ocorre cada máximo de força, onde fica visível o aumento da flecha do condutor em  $t_t$  (força  $F_t$ ) ultrapassando o círculo de raio igual a flecha do condutor antes do curto-circuito.

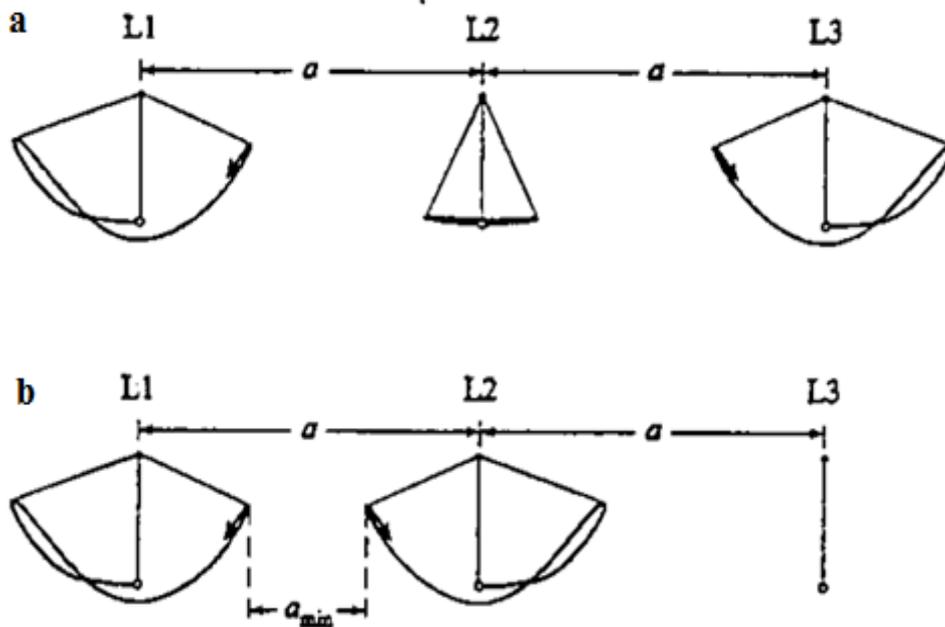
Figura 3: Movimento de um subcondutor flexível durante e após um curto-circuito bifásico



Fonte: Adaptado de CIGRÈ Brochura Técnica 105, 1996

Na Figura 4 estão representados os movimentos dos condutores causados por forças de curto-circuito. Onde, em um curto-circuito trifásico, Figura 4.a, os condutores L1 e L3 das extremidades balançam inicialmente “para fora”, ambos se repelindo em relação ao condutor central, e o condutor central L2 balança levemente devido às forças bidirecionais sobre ele. Na Figura 4.b em condição de curto-circuito bifásico, ambos os condutores sob falta se repelem, iniciando seu balanço “para fora”. Em ambos os casos, a força que causa o balanço inicial onde os condutores se afastam dura apenas o tempo de fluxo da corrente de curto-circuito (tempo de falha), então o movimento é revertido e as fases se movem em direção uma para a outra, o que resulta em uma significativa redução da distância entre fases e possibilidade de contato entre condutores ou danos nas estruturas durante os picos das tensões.

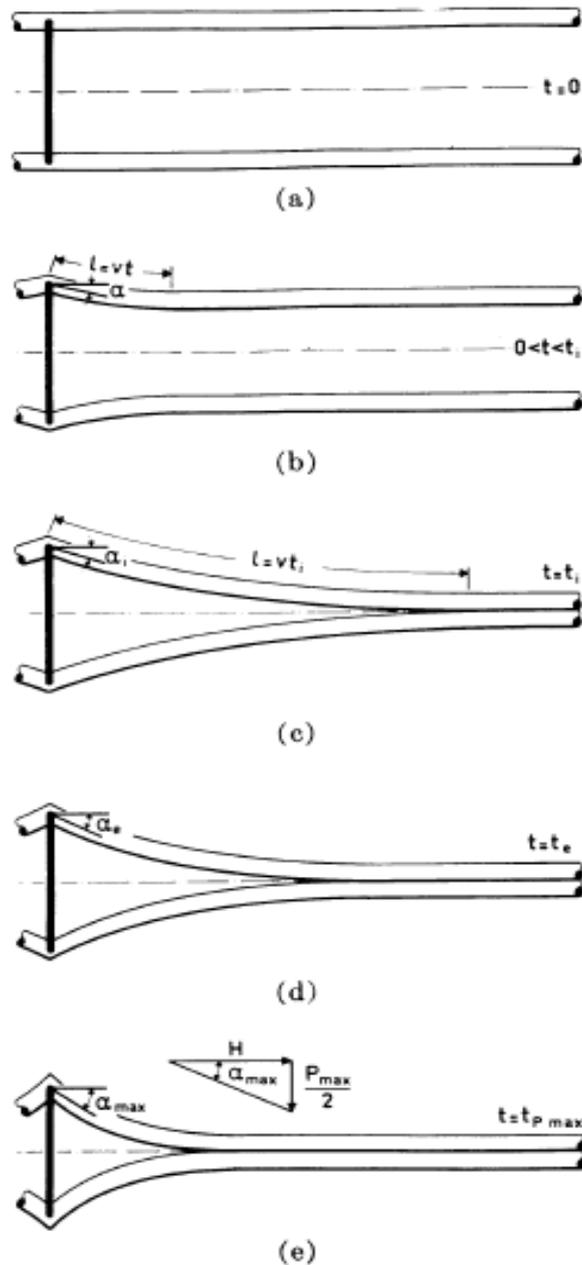
Figura 4: Movimento de um subcondutor durante e após um curto-circuito, a trifásico b bifásico



Fonte: CIGRÈ Brochura Técnica 105, 1996

Segundo Manuzio [3], quando cada fase é composta por mais de um subcondutor, durante uma falha, devido a fortes forças de atração e à pequena distância entre os subcondutores, os subcondutores se aproximam um do outro. A Figura 5 representa o movimento dos subcondutores, que iniciam em repouso, Figura 5.(a), e sobre ação das forças atrativas durante o fluxo de corrente de curto-circuito se movem em direção um ao outro. Enquanto o subcondutor se movimentava, o espaçador reage dando origem a uma onda que se desloca em direção ao centro do vão entre espaçadores (Figura 5.(b)). Enquanto houver fluxo de corrente de falha, os subcondutores seguem se aproximando até que colidem (*pinch*), Figura 5(c), e as partes que ainda não entraram em contato seguem se aproximando até a posição de equilíbrio, Figura 5(d), porém, devido a energia cinética que os subcondutores possuem, estes oscilam em torno da posição de equilíbrio até que toda a energia seja dissipada.

Figura 5: Movimento entre subcondutores de uma mesma fase durante um curto circuito



Fonte: Manuzio [3], 1967

Posições instantâneas de movimentos reais durante testes de barramentos suportando correntes de curto-circuito são apresentadas na Figura 6. O movimento dos condutores de uma linha de distribuição, Figura 6 a), e a contração do feixe de quatro subcondutores em torno do espaçador na Figura 6.b) são demonstrações reais dos efeitos anteriormente citados.

Figura 6: Arranjos reais de condutores flexíveis sob corrente de curto-circuito



Fonte: Adaptado de [14]

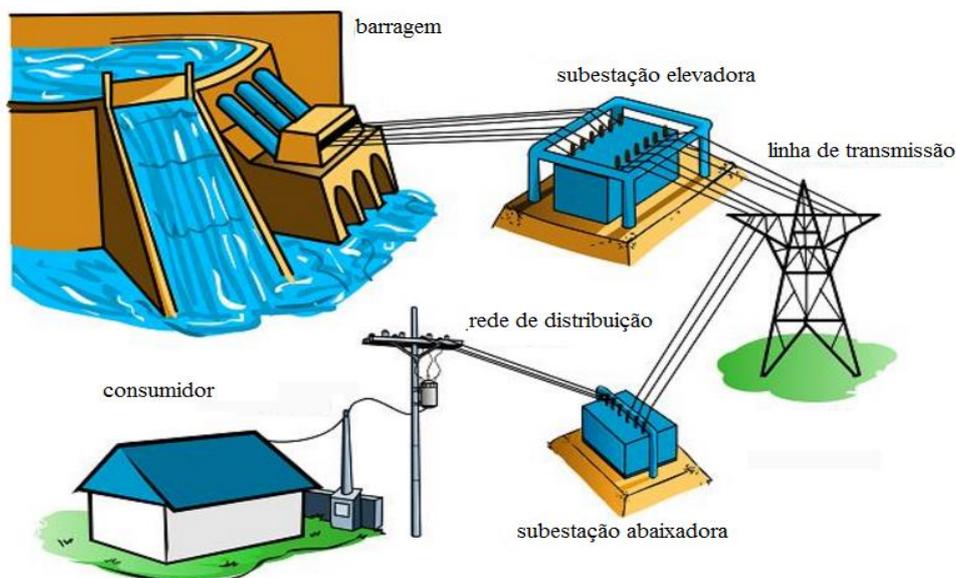
## 2. Revisão da Literatura

Para contextualização deste trabalho, são apresentadas definições, evidenciando aspectos construtivos, aplicações e características físicas dos componentes que estarão sujeitos aos esforços originados por correntes de curto-circuito. Estas correntes por sua vez, também serão analisadas quanto a seus tipos, características e efeitos em seção específica.

### 2.1. Sistema Elétrico de Potência

Atualmente no Brasil, a geração de energia elétrica provém aproximadamente 80% de hidrelétricas e PCHs, 11% de termoeletricas e o restante de energia solar e eólica. Geralmente as usinas localizam-se em regiões afastadas dos consumidores, o que faz com que seja necessário transmitir a energia até o consumidor. Após a energia ser gerada ela passa por uma subestação elevadora, que eleva a tensão da rede para que ocorram menos perdas na transmissão. A subestação elevadora é conectada às linhas de transmissão de energia, que por sua vez tem a capacidade de transmitir a energia nesta elevada tensão. O outro lado da linha de transmissão é conectado a uma subestação abaixadora, que reduz a tensão. Após reduzida a tensão ela é distribuída pela rede de distribuição até os consumidores. A Figura 7 resume o Sistema Elétrico de Potência (SEP), ilustrando um típico caminho que a energia percorre da geração até o consumidor.

Figura 7: Modelo de Sistema Elétrico de Potência



Fonte Adaptado de [22]

## 2.2. Subestações

As subestações (SEs) são compostas por equipamentos de manobra e/ou transformação usados para coordenar o fluxo de energia do sistema de potência. Podem ser classificadas quanto a sua função, podendo ser transformadora, seccionadora ou distribuidora, e pela instalação, podendo ser abrigada ou ao tempo.

A SE transformadora converte a tensão de entrada para um nível diferente, pode ser elevadora ou abaixadora. Em geral as SEs elevadoras são localizadas próximas aos centros de geração e as abaixadoras próximas aos centros de carga. A SE seccionadora pode ser de manobra ou de chaveamento, ela interliga os circuitos de fornecimento sob o mesmo nível de tensão e possibilita a multiplicação dos mesmos.

Dentre os equipamentos de transformação presentes em uma SE estão os transformadores de força, que são basicamente o coração da SE. Os transformadores são indispensáveis para se obter o aproveitamento econômico da energia elétrica, pois a partir deles é possível a transmissão em tensões cada vez mais altas, possibilitando grandes economias nas linhas de transmissão em trechos cada vez mais longos. Já os transformadores de instrumentos (TCs e TPs) têm a finalidade de reduzir a corrente ou a tensão a níveis compatíveis com os valores de suprimento de relés e medidores [16].

Os equipamentos de manobra são basicamente os disjuntores e as chaves seccionadoras. Os disjuntores são os mais eficientes e complexos aparelhos de manobra em uso de redes elétricas, destinados à operação em carga, podem ser operados de forma manual ou automática. Já as chaves seccionadoras são dispositivos destinados a isolar equipamentos, zonas de barramento ou trechos de LTs e, embora possam ser operadas sob tensão, só devem ser operadas sem carga, para evitar a formação de arco elétrico [16].

Os equipamentos de compensação de reativos possuem suma importância na SE, garantem a qualidade de fornecimento de energia. Estes aparelhos são utilizados de forma constante e diminuem a oscilação de cargas não lineares. Podem ser reatores ligados em derivação ou em série, capacitor derivação ou série, compensador síncrono e compensador estático. Desses equipamentos, o que é mais utilizado nas SEs receptoras é o capacitor derivação, que tem por finalidade básica corrigir o fator de potência do sistema [16].

Outros equipamentos importantes são os de proteção, que visam que a estrutura de distribuição e transmissão não sofram avarias em virtude de descargas atmosféricas, sobrecarga do sistema ou curtos-circuitos. Os principais são: para-raios, relés e fusíveis.

O para-raios é o dispositivo protetor que tem por finalidade limitar os valores dos surtos de tensão transientes que podem causar rigorosos danos aos equipamentos, protegem o sistema contra descargas de origem atmosféricas e contra surtos de manobra. Os relés têm por finalidade principal proteger o sistema contra sobrecorrentes (curtos-circuitos), através da atuação sobre os disjuntores, permitindo o isolamento dos trechos com defeito. Hoje em dia, os relés digitais agregam inúmeras funções de proteção além de apenas a de sobrecorrente. O fusível tem função similar ao relé de sobrecorrente, porém é um equipamento mais simples e barato, que quando acionado (queimado) precisa ser substituído.

Equipamentos de medição constituem os instrumentos destinados a medir grandezas tais como corrente, tensão, frequência, potência ativa e reativa, etc. Estão associados a equipamentos de supervisão, controle, proteção e faturamento [16].

### 2.3. Barramentos

O grupo de condutores dentro da SE é titulado barramento. É por onde é conduzida a corrente de alimentação dos equipamentos de manobra e controle, e por consequência, é o componente que transmite os esforços originários de possíveis curtos-circuitos do sistema.

Em SEs de instalações industriais os barramentos são conceituados como um grupo de condutores elétricos, geralmente nus, destinados a permitir o transporte de altas correntes entre dois pontos, ou a proporcionar uma distribuição de correntes com varias alimentações e múltiplas saídas. De toda forma, os barramentos devem funcionar de forma segura e econômica.

Os barramentos podem ser rígidos e flexíveis. Como o objetivo deste trabalho é o estudo do esforço sobre os barramentos flexíveis serão apresentadas apenas características dos barramentos flexíveis.

#### Barramentos flexíveis

Os barramentos flexíveis são mais facilmente encontrados em subestações de grande porte, geralmente em cabo nu. Apresentam pontos positivos e negativos comparados aos barramentos rígidos, sendo os negativos a sujeição de esforços eletrodinâmicos e oscilações originárias das chuvas e vento, o que faz necessário aumentar a distância entre as fases. Este caso é crítico em situações onde o espaço é limitado. Os barramentos flexíveis também necessitam de uma maior distância do solo pelo fato de possuírem flecha.

Em casos de subestações que necessitam ligações de grandes distâncias, mostram-se vantajosos, pois faz-se necessário um menor número de estruturas metálicas além dos cabos condutores possuírem um preço relativamente barato em relação aos rígidos, fazendo com que os barramentos flexíveis sejam mais baratos que os rígidos.

## 2.4. Materiais condutores

Os materiais condutores, em um sistema elétrico, sofrem simultaneamente uma série de solicitações, sendo eles mecânicos, térmicos, luminosos, magnéticos, sob os quais o material não deve perder suas propriedades iniciais. Por essas razões, a escolha do material condutor mais adequado, nem sempre recai naquele de características elétricas mais vantajosas, mas sim, em outro metal ou em uma liga, que, apesar de eletricamente menos vantajoso, satisfaz as demais condições de utilização. Os metais mais utilizados para a fabricação dos condutores são o cobre e o alumínio.

A máxima pureza do cobre é encontrada no material obtido em ambiente sem oxigênio, que possui uma maior condutividade comparada ao cobre eletrolítico, este por sua vez é purificado em processos eletrolíticos e é o mais utilizado no mercado. O cobre apresenta uma elevada ductividade que permite obter fios muito finos, embora o endurecimento causado pelo processo limite a sua flexibilidade, o que faz-se necessário recozer o mesmo. [18]

O processo de estiramento é chamado de trefilagem e o agrupamento de fios ou grupos de fios forma um condutor para isolamento, que é mais flexível quanto mais fino forem os fios. A seção corresponde à soma das seções dos fios individuais. [18]

Comparado aos outros materiais utilizados para condutores, o cobre apresenta uma densidade alta e custo mais elevado, o que muitas vezes leva a substituição por outro metal mais leve e econômico.

O Alumínio possui uma boa capacidade de condução de corrente elétrica, custo inferior ao cobre e peso cerca de 31% menor que o do cobre.

Uma das vantagens interessantes dos barramentos de alumínio é quando na ocorrência de arco de curto-circuito, formar-se apenas resíduos sob a forma de poeira de óxido de alumínio não condutora. Assim não há a deposição de metais sobre os isoladores vizinhos

nem em outros componentes da instalação, sendo este um fator limitante na extensão de prejuízos. Com isso as instalações de manobra com barramentos de alumínio podem retornar o seu serviço mais rapidamente depois da ocorrência de um arco de curto-circuito [17].

O alumínio em contato com metais mais nobres, (ferro, cobre, etc) e em presença de umidade constitui um par galvânico que o corrói lentamente até a desagregação. Porém na grande maioria dos casos é o material mais viável.

O alumínio possui propriedades mecânicas inferiores comparadas ao cobre e, devido a baixa resistência a tração é usado na forma de ligas ou reforçado com fios de aço no caso das linhas aéreas de transmissão.

## 2.5. Cabos condutores usados como barramento.

Os principais fatores que influenciam na escolha da configuração dos barramentos são [18]:

- Corrente: a corrente nominal e de curto-circuito que poderá ser conduzida são os principais índices para a escolha da forma das barras e para o dimensionamento do barramento.

- Ambiente: pode, por exemplo, ser usado nas zonas costeiras onde há problemas de oxidação nos condutores ou em ambientes expostos a muita poluição. Neste caso, ligas de alumínio devem ser utilizadas.

- Utilização: pode ser destinado a transporte de energia elétrica entre dois pontos ou a distribuição de energia, seja em subestações abrigadas ou expostas ao tempo;

No Brasil a NBR 07271 – Cabos de Alumínio para Linhas Aéreas [7] e a NBR 07270 – Cabos de alumínio com Alma de Aço para Linhas Aéreas [6] apresentam características e comparações entre os cabos ACSR e AAC além de outros utilizados, entre eles:

AAC ( All Aluminium Conductor): todos os condutores de alumínio (Figura 8). Tem uma alta relação peso-condutividade. Utiliza fios de alumínio tipo 1350-H19 e possui uma condutividade de 61,2% IACS (International Annealed Copper Standards), a mais alta entre todos os condutores utilizados em linhas aéreas.[4] Por este motivo, é recomendado em áreas

com limitação de espaço, onde fazem-se necessários vãos curtos e alta condutividade. É o cabo mais utilizado em subestações.

Figura 8: AAC All Aluminium Conductor



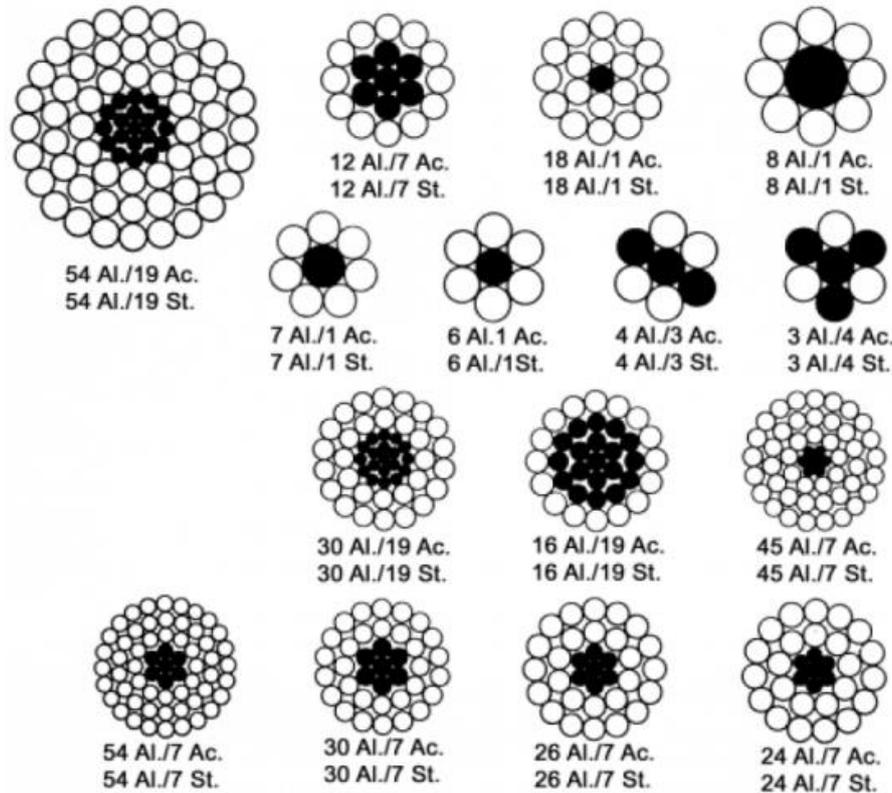
Fonte: adaptado de [18]

ACSR (Aluminum Conductor, Steel Reinforced): condutores de alumínio com alma de aço (CAA). Devido a sua alta resistência mecânica, tem mais alta capacidade de condução de corrente para a mesma seção de condutor (medida em área de seção transversal de alumínio, o aço é desconsiderado). Possui fios de alumínio do tipo 1350-H19 na periferia e fios de aço no núcleo. Recomendado para vãos maiores nas linhas de transmissão. O aço faz com que o condutor fique mais pesado, tendo normalmente de 11 a 18% do peso do condutor [5]. A Figura 9 apresenta valores típicos de proporção entre fios de alumínio e fios de aço em cabos ACSR, porém existem variações para outros casos.

Devido à presença do aço no núcleo, linhas que usam ACSR se deformam menos do que as que usam outros condutores, assim, estas apresentam menores flechas para uma mesma tensão nos cabos. Desta forma, os condutores ACSR também apresentam uma menor flecha nos casos de alta temperatura que faz com que os condutores dilatem e aumentem a flecha. O cabo ACSR também possui menor chance de rompimento em caso de ser atingido por objetos. [18]

AAAC( All Aluminum Alloy Conductor): todos os condutores de liga de alumínio. É constituído de fios de alumínio do tipo 6201-T81. Possuem alta resistência mecânica e capacidade de condução de corrente semelhante aos dois primeiros. Comparado a um cabo ACSR de mesmo diâmetro, o cabo AAAC possui nível térmico semelhante, relação peso-resistência mecânica maior, menores perdas elétricas e resistência à corrosão superior. É usado em áreas costeiras e demais áreas onde o cabo ACSR é proibido devido ao excesso de corrosão [18].

Figura 9: Padrões de distribuição de fios dos cabos ACSR



Fonte : adaptado de [27]

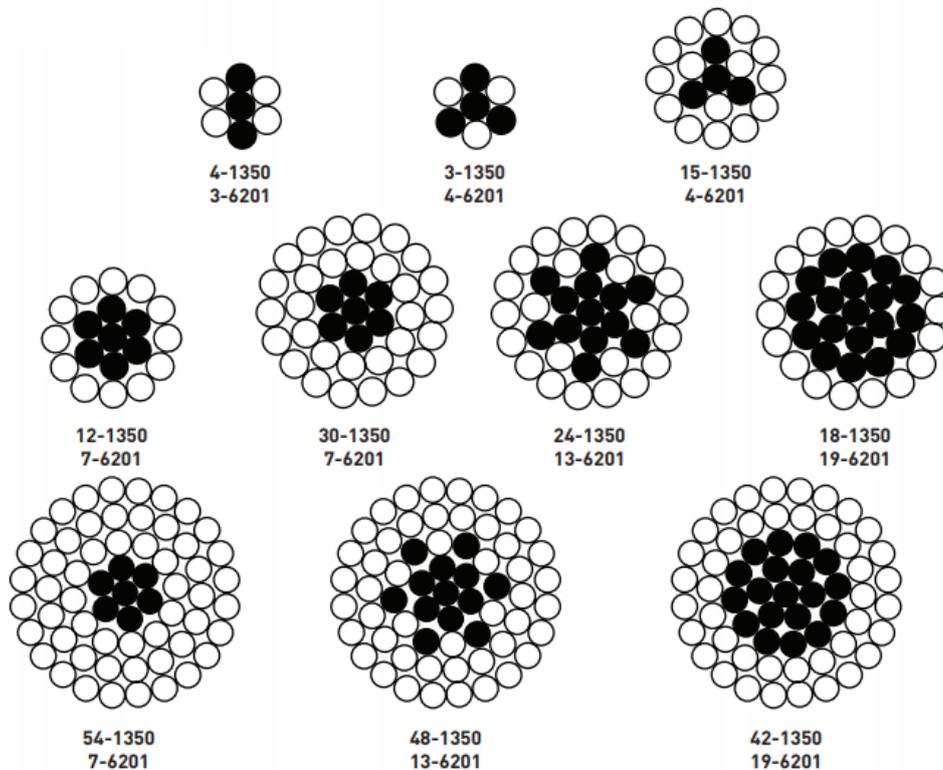
ACAR (Aluminum Conductor, Alloy Reinforced): condutor de alumínio, reforçado com fios de liga de alumínio. Consiste de uma mistura de fios de alumínio 6201-T81 e 1350-H19 de mesmo diâmetro. Por terem o mesmo diâmetro, os fios podem ser intercambiáveis com o objetivo de otimizar as propriedades do cabo ACAR para cada aplicação em particular. Por exemplo, aumentando-se o número de fios 6201 pode-se atingir uma relação peso-resistência igual ao do cabo ACSR. Este condutor apresenta também uma excelente resistência a corrosão. A .

Figura 10 mostra alguns dos padrões de fios do cabo ACAR[18].

Os cabos AAC são os mais utilizados em subestações pelo fato de que na maioria dos casos os vãos das subestações são curtos, o que não se faz necessária grande capacidade de tração. Existem ainda os condutores modificados. Esses condutores possuem adaptações na construção do condutor, e essas adaptações tem o objetivo de melhorar a sua performance sob certas condições. Podem ser feitas a fim de se aumentar o nível térmico do condutor mantendo o mesmo diâmetro, aumento de auto-amortecimento do condutor ajudando na diminuição de vibrações eólicas e até mesmo aumento na tração mecânica da linha

produzindo diminuição na flecha. As modificações podem vir na forma de alterações do formato dos fios, mudança dos graus de têmpera do alumínio dos fios, utilização de diferentes tipos de revestimento para proteção a corrosão do núcleo de aço em cabos compostos ou também na alteração da configuração geométrica do condutor a fim de produzir variação no perfil do vento. Todas estas modificações podem ser usadas separadamente ou em combinações atingindo-se assim as propriedades desejadas e otimizando a performance [18].

Figura 10: Padrões de distribuição de fios em cabos ACAR



Fonte: [27]

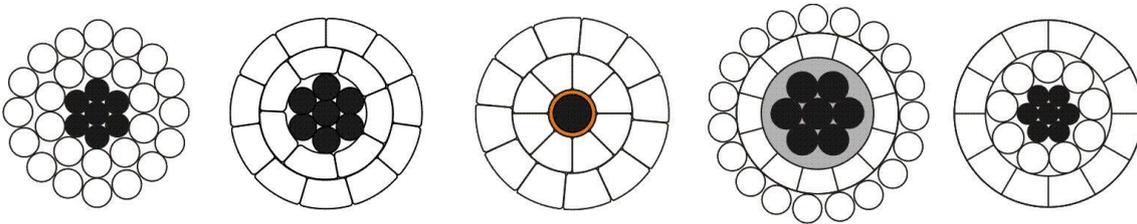
Os cabos chamados TW (Trapezoidal Wire, ou Trapwire), são derivados da construção convencional tendo apenas os seus fios em formas de trapézio. Nesse tipo de construção, os cabos de metal homogêneo (AAC e AAAC) podem ter todos os fios em forma de trapézio, exceto o centro. Já nos cabos não homogêneos (ACSR e ACAR), os múltiplos fios podem ser arranjados de forma a permanecer um material sobre o outro formando camadas (Figura 11) isto se deve a diferença nos coeficientes de dilatação dos dois materiais [18].

Os condutores TW apresentam uma construção compacta tendo uma redução do diâmetro de aproximadamente 10% em comparação com o mesmo tipo e com a mesma área.

Devido a grande compactação do TW, mais alumínio pode ser adicionado mantendo o mesmo diâmetro do condutor padrão. O alumínio adicional de aproximadamente 20% a 25% reduz a resistência elétrica do condutor, aumentando assim a capacidade de condução de corrente do mesmo diâmetro de condutor de 8% a 10% [18]

O condutor de fio trapezoidal também tem outras características desejáveis. O desenho compacto resulta em uma melhora nas características de corrosão. Além disso, testes indicam que o cabo TW apresenta menor número de fios quebrados ao longo do tempo em relação ao cabo tradicional. A Figura 11 apresenta diferentes formas da utilização de fios trapezoidais em cabos condutores.

Figura 11: Diferentes distribuições de fios trapezoidais em cabos condutores



Os cabos ACSS (Aluminum Conductor, Steel-supported) são cabos com construção similar aos ACSR mas usando fios de alumínio integralmente recozidos (têmpera zero). Sob condições típicas de operação. O ACSS basicamente permite que toda a carga mecânica seja carregada pelo núcleo de aço. O cabo ACSS tem condutividade de 60% IACS devido a sua alta maleabilidade. Por ser recozido, o condutor pode operar sob temperaturas acima de 200 °C sem perda na sua resistência mecânica. Além disso, o condutor apresenta uma baixa tensão nos fios de alumínio, o que aumenta a característica de auto-amortecimento sob condições climáticas desfavoráveis[18]. Esses cabos são frequentemente preferidos para aplicações onde altas correntes são requeridas em situações de emergência.

## 2.6. Espaçadores

Com a utilização de feixes de condutores, gerou-se a necessidade de utilizar espaçadores, que são necessários para manter a geometria do feixe, ou seja, o espaçamento adequado entre condutores. O comportamento dinâmico dos condutores quando submetidos à excitação do vento ou de curtos-circuitos depende da distribuição dos espaçadores ao longo

do vão e do tipo de espaçador empregado. As posições dos espaçadores em um vão visa minimizar os problemas de vibrações e de oscilações [29].

No caso de um vão de linha ou barramento em feixe sem espaçadores os cabos se movimentam de forma independente, assim pode acarretar no movimento de grande amplitude e choque dos condutores.

Os arranjos com mais de um subcondutor por fase (feixes) mais encontrados são formados por 2, 3 ou 4 subcondutores de mesma fase. É possível encontrar, em casos particulares, feixes com 6 ou 8 subcondutores. Esses podem estar dispostos em configuração simétrica ou assimétrica. Os espaçadores podem ser classificados pelas suas características de conexão entre o condutores (tipo de grampo) e o espaçador. Dessa forma são divididos em rígidos, articulados, flexíveis e amortecedores. A Figura 12 apresenta alguns modelos de espaçadores amortecedores.

Figura 12: Modelos de espaçadores amortecedores para 2, 3 e 4 condutores



Fonte: [28]

Nos espaçadores rígidos, os grampos não permitem movimento significativo entre os condutores, ou seja, os movimentos são muito pequenos quando comparados ao diâmetro do condutor. Esses são constituídos de garras parafusadas e corpo em cordoalha de aço zincado, e têm como objetivo apenas proporcionar o espaçamento uniforme do feixe ao longo do vão. Normalmente utilizam-se amortecedores de vibração separados, geralmente do tipo *Stockbridge*, para linhas utilizam os espaçadores rígidos [29]

Os articulados também restringem as distâncias entre os condutores, porém, eles permitem a rotação do grampo do condutor em relação ao eixo central da peça. Os espaçadores flexíveis permitem grandes deslocamentos dos condutores, com relação um aos outros, no plano perpendicular ao eixo do condutor. Normalmente são incorporadas aos

espaçadores propriedades elásticas para garantir a restauração da configuração inicial do feixe quando as cargas externas forem removidas. Os espaçadores amortecedores são espaçadores flexíveis que dissipam energia quando permitem grandes deslocamentos entre condutores, ou seja, já possuem a função amortecedora incorporada, estes não precisam de outros amortecedores [29].

Os materiais que formam os espaçadores precisam apresentar adequada resistência mecânica para toda a faixa de temperatura de serviço (temperatura que varia em função do clima e das correntes de serviço nos condutores), resistência à corrosão química causada por umidade, poluição atmosférica e contato entre diferentes materiais, resistência à fadiga, apropriada resistência para resistir a cargas impulsivas e, finalmente, resistência à radiação ultravioleta [29].

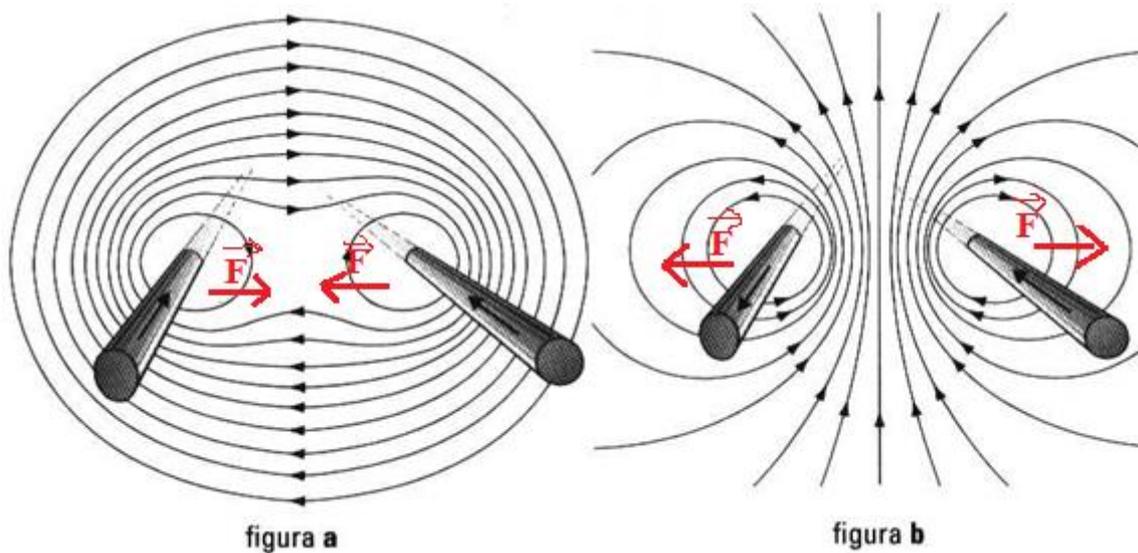
## 2.7. Força eletromagnética

Em uma subestação é possível verificar comumente a existência de dois ou mais condutores em paralelo. Estes condutores sofrem efeitos de atração e repulsão, como resultado das forças mecânicas de origem eletromagnética, criadas pela corrente elétrica presente nos mesmos. As forças serão de repulsão se as correntes circularem em sentidos diferentes e de atração se circularem no mesmo sentido [9].

Essas forças podem ser desconsideradas nas condições normais de operação, por apresentarem valores pequenos e assim não possuir grande impacto na estrutura mecânica da subestação. Porém na condição de curto-circuito a força é relativamente grande e pode afetar a estrutura mecânica da subestação se esta não for corretamente projetada [10]. A Figura 13 apresenta as forças de atração e repulsão aplicadas aos condutores paralelos.

Os resultados de estudos na área de curtos-circuitos em barramentos de subestação demonstram que, a força eletromagnética exercida sobre as estruturas que constituem a subestação, está relacionada não somente ao valor das correntes de curto-circuito, mas também a dimensão, espaçamento e configuração dos condutores [11].

Figura 13: Força eletromagnética em condutores paralelos

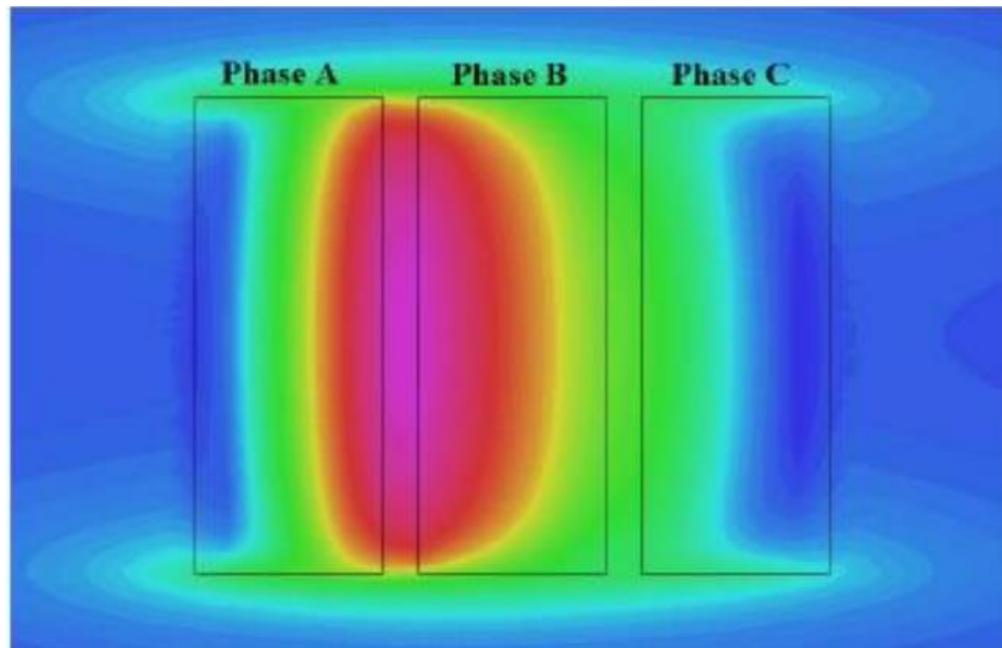


É essencial considerar esta força no cálculo das estruturas de subestações.

O cálculo de força eletromagnética entre condutores faz com que seja possível projetar de forma efetiva, o espaçamento entre eles, a dimensão e estrutura de apoio para minimizar as forças atuantes sobre barramentos. [12] É necessária uma análise cuidadosa sobre estas forças para evitar rompimento de isoladores de suporte e tensões excessivas no condutores. O condutor a ser utilizado deve ser cuidadosamente escolhido para resistir a essas forças. A área de seção transversal do condutor e estrutura de suporte dependerá da magnitude da corrente de curto-circuito e o tempo de duração dessa corrente [13].

Os estudos de estimativa da força eletromagnética realizados até hoje, seguindo as diretrizes da norma IEC 60865/1994, revelam que em um sistema de condutores trifásicos, o condutor central apresenta um valor mais elevado de força eletromagnética em comparação aos condutores externos [1]. Esse fenômeno pode ser verificado na Figura 14.

Figura 14: Densidade do fluxo magnético em um curto-circuito trifásico



Fonte: [8]

É possível concluir que o valor da força eletromagnética depende da configuração do barramento, razão pela qual a IEC 60865/1994 introduziu a variável referente a distância efetiva entre condutores para calcular esta força e avaliar os efeitos das correntes de curto-circuito [15].

## 2.8. Força do vento e variação da temperatura

Os esforços causados por curtos-circuitos são determinados a partir de trações estáticas previamente calculadas. A IEC60865-1 recomenda apenas o cálculo a partir da tração estática horizontal no condutor na menor temperatura de inverno e na maior temperatura de operação, porém, pode ser considerar também cargas de vento conforme NBR 8661 (Ações e segurança nas estruturas – Procedimento) e NBR6123 (Forças devidas ao vento em edificações) [19]. Os piores casos para um vão são a grande tração em temperaturas muito baixas, que afeta mais os vãos menores, e em altas temperatura a dilatação dos condutores causando o aumento da flecha. A força do vento tem mais efeito sobre vãos maiores.

## 2.9. Curto-Circuito

O curto-circuito é uma condição de anomalia em que o sistema elétrico está sujeito. É caracterizada por correntes de amplitudes muito maiores que as correntes nominais e pode ocorrer em uma, duas ou nas três fases deste sistema [17].

Um curto-circuito pode ocorrer por fatores internos ou externos, por exemplo, queda de um galho entre fases, queda de uma fase no solo, falha de isolamento dos enrolamentos de um transformador. Um curto pode causar danos graves aos equipamentos e componentes do sistema, tendo em vista seus efeitos sobre os mesmos. Por isso faz-se necessário um correto dimensionamento dos condutores e equipamentos. A função da proteção é eliminar a anomalia o mais rápido possível, para isso é necessário o entendimento de seus efeitos e consequências. O efeito dinâmico já foi exibido no item anterior, que apresenta as forças do campo eletromagnético produzidas pela corrente que percorre os condutores.

O efeito térmico dos curtos-circuitos ocorre quando os condutores aquecem, por efeito joule. O efeito joule depende da corrente elevada ao quadrado e multiplicada pela resistência do condutor. Em condições normais o efeito joule afeta os condutores, porém de forma “controlada”, já nos curtos-circuitos, como a corrente é muito alta, faz com que a temperatura dos condutores se eleve bruscamente, assim os dilatando. Ao dilatarem-se os condutores aumentam seus comprimentos e no caso específico de barramentos proporcionam esforços indesejáveis em seus pontos de apoio. Segundo Beer e Jonhston, [20] dependendo do valor que a temperatura atingir, o material condutor poderá ter suas características alteradas, dentre elas a resistência mecânica, a ductibilidade e a resistência a corrosão. No ponto de vista elétrico, o aumento da temperatura fará com que a resistividade do condutor também aumente.

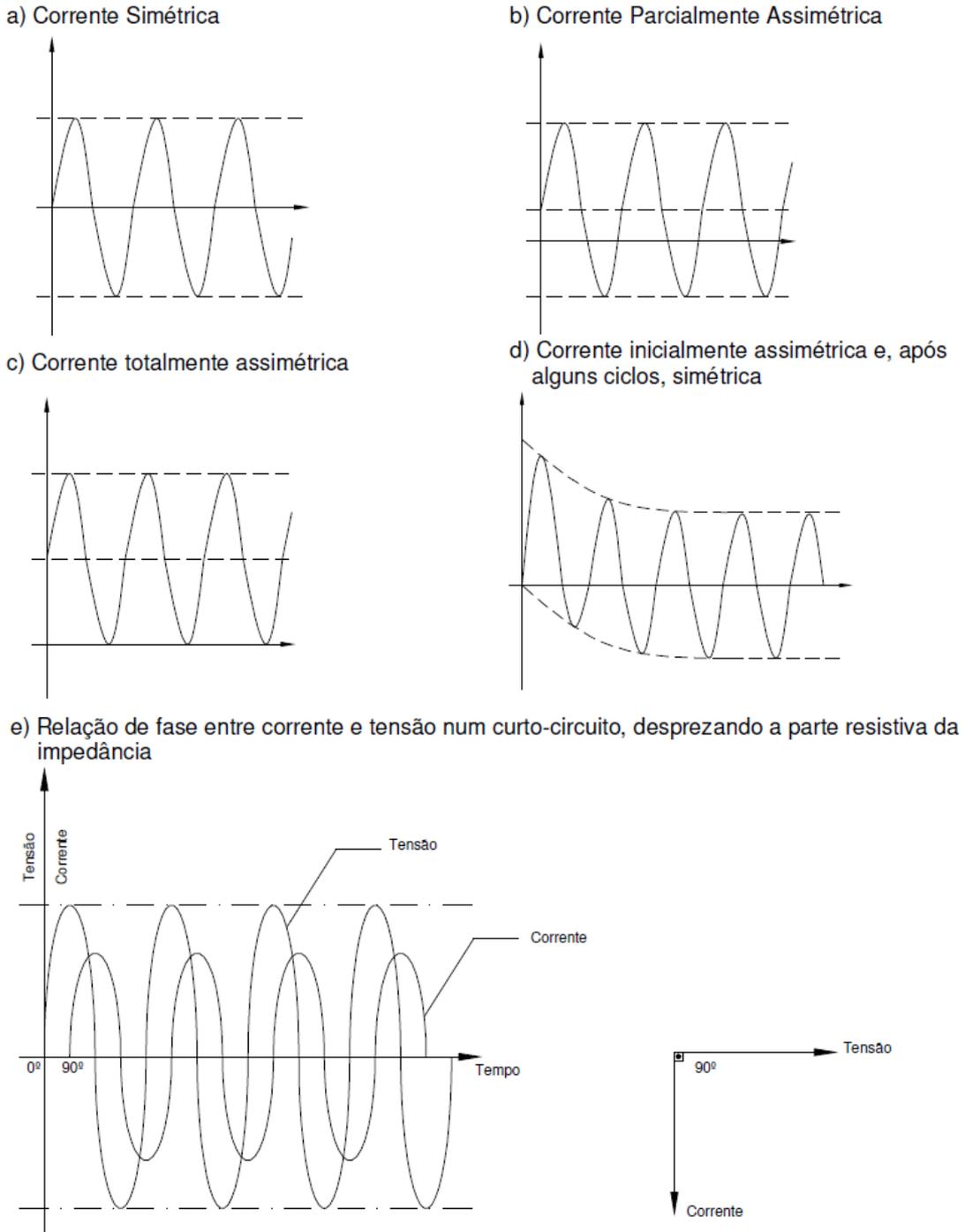
### 2.9.1. Corrente Simétrica e Assimétrica

Para definir-se a simetria ou assimetria das correntes de curto-circuito, necessita-se observar o comportamento de sua amplitude em relação ao tempo como mostrado na Figura 15.

De acordo com [30], geralmente a corrente de curto-circuito se inicia com assimetria máxima e, ao longo do tempo, tende a se tornar gradualmente simétrica (Figura 15d).

Os sistemas elétricos, em sua grande maioria, possuem tensão e corrente resultante sinusoidal. Visto que esta última é função da impedância e, em caso de curto-circuito, a resistência torna-se desprezível em relação à reatância, a corrente de curto-circuito, quando relacionada à tensão do sistema, fica atrasada de  $90^\circ$  (Figura 15e).

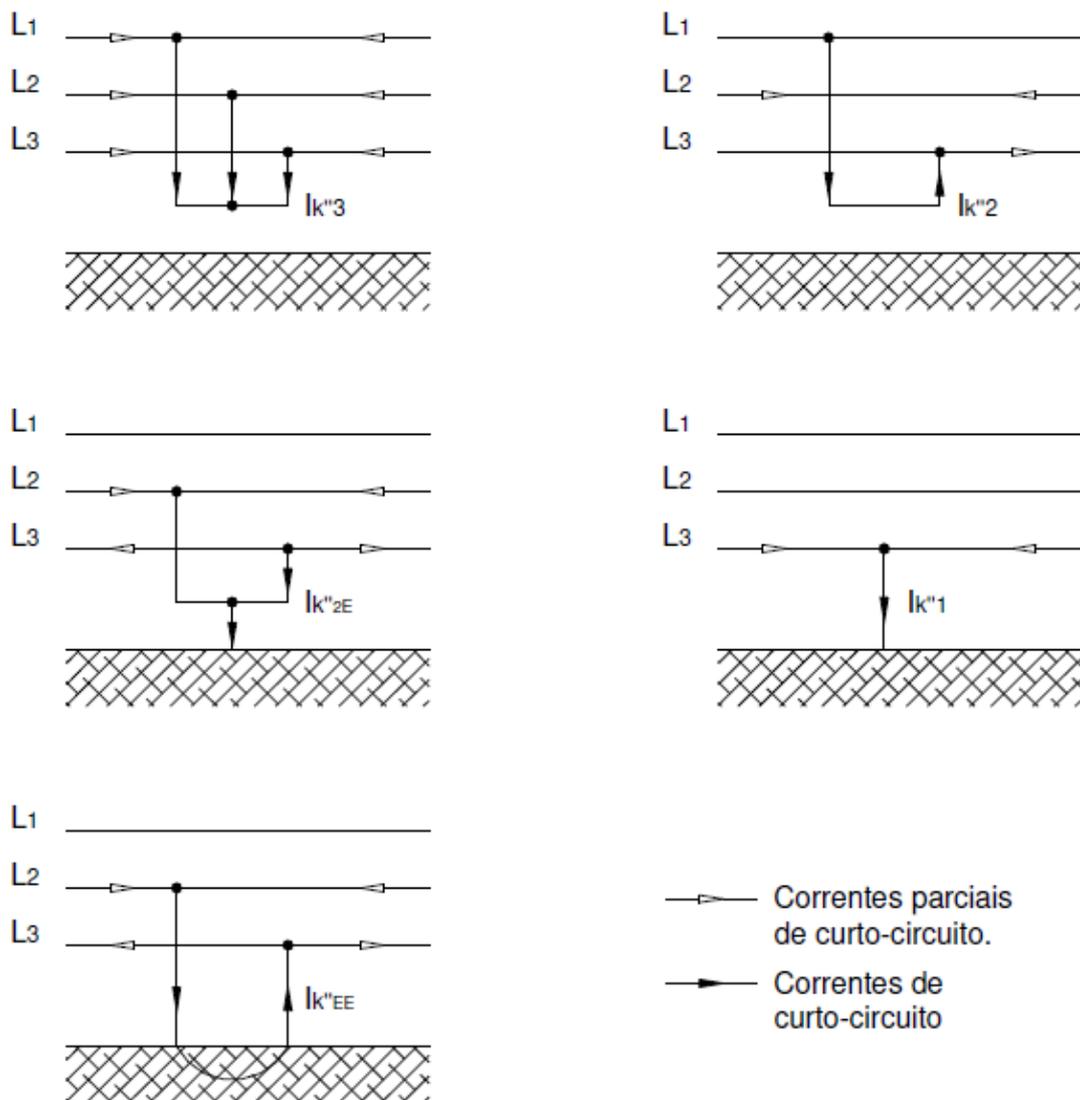
Figura 15: Correntes simétricas e assimétricas



### 2.9.2. Correntes de curto-circuito em sistema trifásico

São cinco os tipos de curto-circuito que podem acontecer, como apresentados na Figura 16. Os curtos-circuitos trifásico e monofásico possuem as maiores correntes, cada um em determinado caso. Desta forma os efeitos termodinâmicos que os equipamentos e componentes do sistema estarão sujeitos a danos mais severos. Assim faz-se necessária a escolha correta da corrente de curto-circuito a ser considerada.

Figura 16: Faltas e sentido das correntes de curto-circuito em sistema trifásico.



Fonte: [21]

### 3. Cálculo dos esforços de acordo com a norma IEC60865-1

Em um vão, há uma diferença entre a força de tração  $F_{t,d}$  devido ao balanço do condutor durante o curto-circuito, a força de tração  $F_{f,d}$  após o curto-circuito quando o condutor retorna para a sua posição de repouso e a força de tração  $F_{pi,d}$  causada pelo efeito pinch em arranjos com mais de um subcondutor por fase. Seguindo os procedimentos da norma IEC60865, calculam-se as três forças para cada caso e avalia-se qual delas será a mais relevante no projeto. Outros fatores importantes calculados são o deslocamento horizontal máximo de cada cabo condutor e a distância mínima entre fases, calculados também a partir das condições de curto-circuito.

Na seção 3.1 é feito o cálculo dos parâmetros característicos para a configuração e o tipo de curto-circuito. A força de tração  $F_{t,d}$  desconsiderando cabos de conexão entre o barramento e o equipamento no vão é calculada na seção 3.2. A mudança dinâmica da flecha devido ao alongamento do condutor e a mudança de forma da curva do condutor é determinada na seção 3.3. A força de tração  $F_{f,d}$  após o curto-circuito segue na seção 3.4. O deslocamento horizontal do vão  $b_h$  e a distância mínima entre os condutores  $a_{min}$  durante o movimento dos condutores são calculados na seção 3.5. A força de tração  $F_{pi,d}$  é calculada na seção 3.6, e, por fim, as considerações sobre cargas de projeto são fornecidas na seção 3.7.

Os cálculos da norma IEC60865 utilizados são válidos considerando condutores horizontais, dispostos lado a lado. Em outros arranjos, podem ocorrer forças de tração menores. Devido ao esforço de tais cálculos, a IEC recomenda também utilizar as equações aqui apresentadas. Porém, se a diferença na altura dos pontos de fixação for superior a 25% da extensão, o cálculo deve ser feito considerando condutores verticais, outro item da IEC60865-1, este não abordado neste projeto.

As seguintes equações aplicam-se para vãos de até aproximadamente 120 m e flecha até aproximadamente 8% do comprimento do vão. Para vãos mais longos, o movimento do condutor pode resultar em tensões mais baixas do que as calculadas usando as equações. Cabos de conexão entre o barramento e o equipamento perto do ponto de fixação do condutor têm pouco efeito nas forças de tração e no movimento do condutor. Neste caso, recomenda-se que seja calculado de acordo com 3.2 sem considerar os cabos de conexão entre o barramento e o equipamento.

As massas concentradas na extensão do vão, por exemplo, por grampos, cabos de conexão entre o barramento e o equipamento ou conectores devem ser considerados ao calcular a força de tração estática  $F_{st}$  e a flecha estática  $f_{st}$ .

A soma das massas concentradas existentes deve ser convertida em uma massa adicional por unidade de comprimento ao longo do vão ao calcular as forças de tração  $F_{t,d}$  e  $F_{f,d}$ . No entanto, a massa do cabo de conexão entre o barramento e o equipamento no vão médio e seu grampo de conexão não devem ser considerados [1].

De acordo com a IEC 60865-1 [1], em instalações com condutores flexíveis, as tensões que ocorrem em curtos-circuitos bifásicos e curtos-circuitos trifásicos equilibrados são aproximadamente iguais. No entanto, para os curtos-circuitos bifásicos, o movimento do condutor geralmente resulta na diminuição das distâncias mínimas, (isto é, quando condutores adjacentes que transportam corrente de curto-circuito se movem um em direção ao outro após o curto-circuito). No caso de curto-circuito trifásico equilibrado, o condutor central move-se apenas ligeiramente devido à sua inércia e às forças bidirecionais alternadas que atuam sobre ele. Por conseguinte,  $F_{t,d}$ ,  $F_{f,d}$  e  $b_h$  são, portanto, calculadas para um curto-circuito bifásico.

As forças de tração  $F_{t,d}$ ,  $F_{f,d}$  e  $F_{pi,d}$  incluem as forças de tração causadas pela carga morta. Os seguintes cálculos devem ser realizados com base na força de tração estática  $F_{st}$  existente na temperatura mínima local de inverno, por exemplo  $-20^\circ\text{C}$ , e também com base na força de tração estática  $F_{st}$  existente na temperatura máxima de operação, por exemplo,  $60^\circ\text{C}$ . Para cada força de tração, o pior caso deve ser levado em consideração para fins de projeto.

### 3.1. Parâmetros característicos

A força eletromagnética característica por unidade de comprimento em condutores flexíveis em sistemas trifásicos considerando que a corrente flui ao longo de todo o comprimento da extensão do condutor com ou sem cabo de conexão entre o barramento e o equipamento é dada, no condutor, pela Equação (1).

$$F' = \frac{\mu_0}{2\pi} 0,75 \frac{(I_k'')^2 l_c}{a l} \quad (1)$$

onde

$\mu_0$  é a constante magnética da permeabilidade no vácuo, igual a  $4\pi 10^{-7}$  H/m.

$I_k''$  é a corrente de curto-circuito simétrica inicial trifásica (r.m.s.) (A);

$a$  é a distância entre fases, medida entre os pontos médios dos condutores (m);

$l$  é o comprimento do vão (m);

$l_c$  é o comprimento do cabo do condutor no vão (m).

Para condutores desestressados (*slack*) que exercem forças de flexão sobre os isoladores de suporte,  $l_c = l$ . Para intervalos com condutores estressados (*strained*)  $l_c = l - 2l_i$ , onde  $l_i$  é o comprimento de uma cadeia de isoladores.

NOTA: O procedimento de cálculo não considera a contribuição do componente aperiódico da corrente do curto-circuito. Isto, no entanto, influenciará significativamente o resultado apenas se a duração do fluxo de corrente de curto-circuito for inferior a 0,1 s.

A relação, adimensional, entre a força eletromagnética em condições de curto-circuito e a força gravitacional em um condutor é um parâmetro importante dado pela Equação (2), e dá a direção  $\delta_1$  da força resultante exercida sobre o condutor, em graus, conforme Equação (3).

$$r = \frac{F'}{n m'_s g} \quad (2)$$

onde

$n$  é o número de subcondutores em cada fase

$m'_s$  é a massa do condutor por unidade de comprimento, incluindo as massas das conexões ao longo do vão (kg/m)

$g$  é a constante universal da gravidade ( $m/s^2$ )

$$\delta_1 = \arctan r \quad (3)$$

A flecha estática equivalente do condutor no vão médio, em metros, é dada pela Equação (4), e o período T das oscilações do condutor, em segundos, é dado pela Equação (5); este se aplica para pequenos ângulos de balanço sem fluxo de corrente no condutor.

$F_{st}$ , é o valor da tração estática no condutor, este deve ser considerado tanto à temperatura mínima de inverno ( $F_{stl}$ ) quanto à temperatura máxima de operação ( $F_{sth}$ ). Sendo assim, a partir desta etapa quase todos os cálculos são realizados duas vezes, uma a partir do valor de  $F_{stl}$  e outra a partir de  $F_{sth}$ . Por fim, na análise dos resultados é utilizado o valor máximo entre os dois.

$$f_{es} = \frac{n m'_s g l^2}{8 F_{st}} \quad (4)$$

$$T = 2\pi \sqrt{0,8 \frac{f_{es}}{g}} \quad (5)$$

Durante o fluxo de corrente de curto-circuito, o período resultante  $T_{res}$  da oscilação do condutor, em segundos, é dado pela Equação (6).

$$T_{res} = \frac{T}{\sqrt[4]{1+r^2} \left[ 1 - \frac{\pi^2}{64} \left( \frac{\delta_1}{90^\circ} \right)^2 \right]} \quad (6)$$

onde  $\delta_1$  deve ser dado em graus.

A norma de rigidez, em  $\text{Newton}^{-1}$ , é dada pela Equação (7), onde  $S$  é a constante de mola resultante de ambos os pontos de fixação e  $E_{eff}$  é o valor real do módulo de Young, em  $\text{N/mm}^2$ , encontrado pela Equação (8).  $A_s$  é a área da seção transversal de um subcondutor, em  $\text{m}^2$ .

$$N = \frac{1}{S l} + \frac{1}{n E_{eff} A_s} \quad (7)$$

NOTA: Se o valor exato da constante de mola  $S$  não for conhecido na Equação (7), o valor  $S=100 \times 10^3 \text{ N/m}$  pode ser utilizado para condutores desestressados (*slack*) que exercem forças de flexão em isoladores de suporte. Para extensões com condutores estressados (*strained*), no mesmo caso do valor exato de  $S$  não ser conhecido, o valor de uma estrutura nas seguintes faixas pode ser utilizado:

- $150 \times 10^3 \text{ N/m}$  até  $1.300 \times 10^3 \text{ N/m}$  para uma tensão nominal de 123 kV;
- $400 \times 10^3 \text{ N/m}$  até  $2.000 \times 10^3 \text{ N/m}$  para uma tensão nominal de 245 kV;
- $600 \times 10^3 \text{ N/m}$  até  $3.000 \times 10^3 \text{ N/m}$  para uma tensão nominal de 420 kV.

$$E_{eff} = \begin{cases} E \left[ 0,3 + 0,7 \sin \left( \frac{F_{st}}{n A_s \sigma_{fin}} 90^\circ \right) \right] & \text{para } \frac{F_{st}}{n A_s} \leq \sigma_{fin} \\ E & \text{para } \frac{F_{st}}{n A_s} > \sigma_{fin} \end{cases} \quad (8)$$

onde

$E$  é o módulo de Young para condutores encordoados.

$\sigma_{fin}$  é o valor mais baixo do estresse do cabo quando o módulo de Young se torna constante, com valor  $\sigma_{fin} = 50.10^6 \frac{N}{m^2}$ .

Durante ou no final do fluxo de corrente de curto-circuito, o vão oscila saindo da posição de estado estacionário para o ângulo  $\delta_{end}$  dado em graus pela Equação (9).

$$\delta_{end} = \begin{cases} \delta_1 \left[ 1 - \cos \left( 360^\circ \frac{T_{k1}}{T_{res}} \right) \right] & \text{para } 0 \leq \frac{T_{k1}}{T_{res}} \leq 0,5 \\ 2\delta_1 & \text{para } \frac{T_{k1}}{T_{res}} > 0,5 \end{cases} \quad (9)$$

Na medida em que a duração do primeiro fluxo de corrente de curto-circuito  $T_{k1}$ , em segundos, é conhecida, o máximo ângulo de balanço  $\delta_{max}$  pode ser determinado de acordo com a Figura 17 ou calculado conforme Equação (10). Quando  $T_{k1}$  não for conhecido, utiliza-se o valor de  $T_k$ , tempo de duração do curto-circuito, em segundos. Se  $T_{k1}$  for maior que o valor 0,4 T, então o valor 0,4 T será usado para  $T_{k1}$  nas Equações (9), (13) e (17).

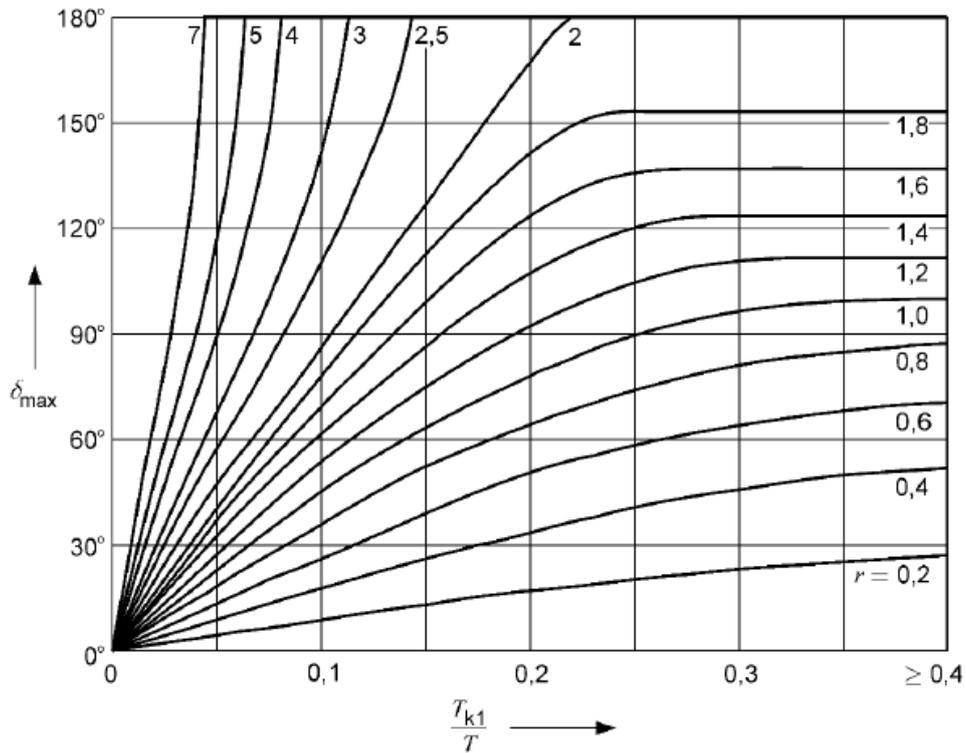
Durante ou após o fluxo de corrente de curto-circuito, o arranjo sem cabo de conexão entre o barramento e o equipamento no vão médio irá oscilar para o máximo ângulo de inclinação  $\delta_{max}$ , em graus, que é obtido pela Equação (10), onde  $\chi$  é um fator auxiliar, adimensional, dado pela Equação (11).

$$\delta_{max} = \begin{cases} 1,25 \arccos \chi & \text{para } 0,766 \leq \chi \leq 1 \\ 10^\circ + \arccos \chi & \text{para } -0,985 \leq \chi \leq 0,766 \\ 180^\circ & \text{para } \chi < -0,985 \end{cases} \quad (10)$$

$$\chi = \begin{cases} 1 - r \sin \delta_{end} & \text{para } 0 \leq \delta_{end} \leq 90^\circ \\ 1 - r & \text{para } \delta_{end} > 90^\circ \end{cases} \quad (11)$$

NOTA: O ângulo de inclinação calculado  $\delta_{max}$  é o valor máximo que pode ocorrer para o "pior caso" que é uma duração de curto-circuito inferior ou igual à duração do curto-circuito estabelecida  $T_{k1}$ .

Figura 17: Máximo ângulo de inclinação  $\delta_{max}$  para uma dada duração máxima de curto-circuito  $T_{k1}$



Fonte IEC 60865-1

### 3.2. Força de tração $F_{t,d}$ durante o curto-circuito

A força de tração  $F_{t,d}$  causada pelo balanço dos condutores em vãos sem cabos de conexão entre o barramento e o equipamento, é dada, em Newtons, pela Equação (12), onde o parâmetro de carga  $\varphi$ , adimensional, é obtido pela Equação (13) e o fator  $\psi$ , adimensional, é função do fator de estresse  $\zeta$ , definido pela Equação 14 e de  $\varphi$ , encontrado como a solução da Equação (15) ou pela Figura 18.

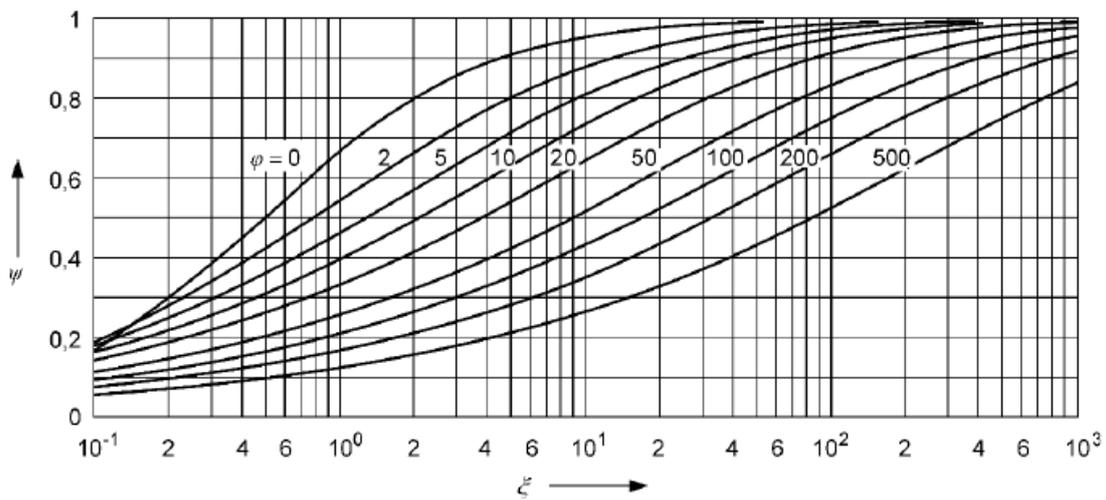
$$F_{t,d} = F_{st}(1 + \varphi \psi) \quad (12)$$

$$\varphi = \begin{cases} 3\sqrt{1+r^2} - 1 & \text{para } T_{k1} \geq \frac{T_{res}}{4} \\ 3(r \sin \delta_{end} + \cos \delta_{end} - 1) & \text{para } T_{k1} < \frac{T_{res}}{4} \end{cases} \quad (13)$$

$$\zeta = \frac{(n m'_s g l)^2}{24 F_{st}^3 N} \quad (14)$$

$$\varphi^2 \psi^3 + \varphi(2 + \zeta)\psi^2 + (1 + 2\zeta)\psi - \zeta(2 + \varphi) = 0 \quad (15)$$

Figura 18: Fator  $\psi$  para força de tração em condutores flexíveis



Fonte IEC 60865-1

### 3.3. Mudança dinâmica da flecha devido ao alongamento do condutor e mudança da forma da curva do condutor

A expansão elástica  $\varepsilon_{ela}$ , adimensional, em um cabo condutor é dada pela Equação (16).

$$\varepsilon_{ela} = N(F_{t,d} - F_{st}) \quad (16)$$

A expansão térmica  $\varepsilon_{th}$ , adimensional, é dada pela Equação (17).

$$\varepsilon_{th} = \begin{cases} c_{th} \left( \frac{I''_k}{n A_s} \right)^2 \frac{T_{res}}{4} & \text{para } T_{k1} \geq \frac{T_{res}}{4} \\ c_{th} \left( \frac{I''_k}{n A_s} \right)^2 T_{k1} & \text{para } T_{k1} < \frac{T_{res}}{4} \end{cases} \quad (17)$$

onde  $c_{th}$  é uma constante do material, para a qual pode-se utilizar os valores do Quadro 1.

O fator de dilatação  $C_D$ , adimensional, permite aumentos de flecha causados pelo alongamento elástico e térmico do condutor e é dado pela Equação (18).

$$C_D = \sqrt{1 + \frac{3}{8} \left[ \frac{l}{f_{es}} \right]^2 (\varepsilon_{ela} + \varepsilon_{th})} \quad (18)$$

Quadro 1: Valores de  $c_{th}$  para determinados materiais de cabo condutor

$c_{th}$	Composição do cabo condutor
$0,27 \times 10^{-18} \frac{m^4}{A^2 s}$	Alumínio, ligas de alumínio e condutores alumínio/aço com uma relação de seção transversal de Alumínio/aço $> 6$
$0,17 \times 10^{-18} \frac{m^4}{A^2 s}$	Condutores de alumínio/aço com uma relação de seção transversal de Alumínio/aço $\leq 6$
$0,088 \times 10^{-18} \frac{m^4}{A^2 s}$	Condutores de cobre

Fonte IEC 60865-1

O fator de forma  $C_F$  permite um possível aumento da flecha dinâmica do condutor causado por uma mudança na forma da curva do condutor e é dado pela Equação (19):

$$C_F = \begin{cases} 1,05 & \text{para } r \leq 0,8 \\ 0,97 + 0,1r & \text{para } 0,8 < r < 1,8 \\ 1,15 & \text{para } r \geq 1,8 \end{cases} \quad (19)$$

A flecha dinâmica  $f_{ed}$ , em metros, resulta da Equação (20).

$$f_{ed} = C_F C_D f_{es} \quad (20)$$

### 3.4. Força de tração $F_{f,d}$ após o curto-circuito

No término do curto-circuito, o vão oscila e retorna para a sua posição de repouso, transformando sua energia potencial gravitacional na força  $F_{f,d}$ . O valor máximo de  $F_{f,d}$ , para um vão no fim da queda é apenas significativo quando  $r > 0,6$  e  $\delta_{max} \geq 70^\circ$ . Neste caso, a força de queda é dada pela Equação (21).

$$F_{f,d} = 1,2 F_{st} \sqrt{1 + 8 \zeta \frac{\delta_{m\acute{a}x}}{180^\circ}} \quad (21)$$

NOTA: Em vãos curtos, a resistência à flexão do vão reduz a queda do vão. A força  $F_{f,d}$  causada pela queda do vão na realidade é menor do que a calculada pela Equação 21, se o comprimento do vão for inferior a aproximadamente 100 vezes o diâmetro do único condutor, isto é,  $l < 100d$

### 3.5. Deslocamento horizontal do vão $b_h$ e mínima distância entre fases $a_{min}$

O máximo deslocamento horizontal no vão médio,  $b_h$ , devido a um curto-circuito, para vãos com condutores desestressados (*slack*) ( $lc = l$ ) conectados a isoladores de suporte e equipamento é dado, em metros, pela Equação (22).

$$b_h = \begin{cases} f_{ed} & \text{para } \delta_{max} \geq 90^\circ \\ f_{ed} \sin \delta_{max} & \text{para } \delta_{max} < 90^\circ \end{cases} \quad (22)$$

Para vãos com condutores estressados (*strained*) ( $lc = l - 2li$ ) conectados a pórticos com isoladores tensionados, o máximo deslocamento horizontal no vão médio,  $b_h$ , devido a um curto-circuito, é dado, em metros, pela Equação (23).

$$b_h = \begin{cases} f_{ed} \sin \delta_1 & \text{para } \delta_{max} \geq \delta_1 \\ f_{ed} \sin \delta_{max} & \text{para } \delta_{max} < \delta_1 \end{cases} \quad (23)$$

onde  $\delta_{max}$  e  $\delta_1$  são definidos em 3.1 e  $f_{ed}$  em 3.3

Devido ao curto-circuito, os condutores em configuração de plano simples são deslocados no vão médio, no pior caso, em um círculo de raio  $b_h$  sobre uma linha reta conectando os dois pontos de ancoragem adjacentes. A distância entre os pontos médios dos dois condutores durante um curto-circuito bifásico, considerada a distância mínima entre fases  $a_{min}$  em metros, é dada no pior caso pela Equação (24).

$$a_{min} = a - 2b_h \quad (24)$$

### 3.6. $F_{pi,d}$ e os efeitos em feixes de condutores

O seguinte se aplica a configurações regulares de condutores em feixe. Válido para feixes de até quatro subcondutores por fase, onde os pontos médios dos subcondutores estão localizados em um círculo com distâncias  $a_s$  iguais entre subcondutores adjacentes.

Se a distância entre subcondutores e a configuração dos espaçadores forem tais que os subcondutores do feixe colidem efetivamente durante um curto-circuito, a força de tração  $F_{pi,d}$  é dada pela Equação (25), onde  $F_{t,d}$  é calculado na seção 3.1.

$$F_{pi,d} = 1,1F_{t,d} \quad (25)$$

É considerado que os subcondutores colidem efetivamente se a distância  $a_s$  entre os pontos médios de subcondutores adjacentes, bem como a distância  $l_s$  entre dois espaçadores adjacentes satisfaçam completamente as Equações (26) ou (27).

$$\frac{a_s}{d} \leq 2,0 \quad (26)$$

$$l_s \geq 50a_s$$

$$\frac{a_s}{d} \leq 2,5 \quad (27)$$

$$l_s \geq 70a_s$$

Caso a configuração do feixe regular não preencha completamente as Equações (26) ou (27), as seguintes equações e considerações aplicam-se ao cálculo de  $F_{pi,d}$ .

Se a corrente de curto-circuito inicial de fase-terra  $I_{k1}''$  for maior do que a corrente de curto-circuito simétrica trifásica inicial  $I_k''$ , esta será substituída por  $I_{k1}''$  nas Equações (28), (29), (39) e (43).

A força de corrente de curto-circuito entre os subcondutores do feixe  $F_v$  é dada, em Newtons, pela Equação (28), onde o fator  $v_2$ , adimensional, é dado como função de  $v_1$  pela Figura 19 ou pela Equação (30). O fator auxiliar  $v_1$ , adimensional, é dado pela Equação (29), e o fator auxiliar  $v_3$ , também adimensional, é dado pela Figura 20, ou pela solução da Equação (34).

$$F_v = (n - 1) \frac{\mu_0}{2\pi} \left( \frac{I_k''}{n} \right)^2 \frac{l_s v_2}{a_s v_3} \quad (28)$$

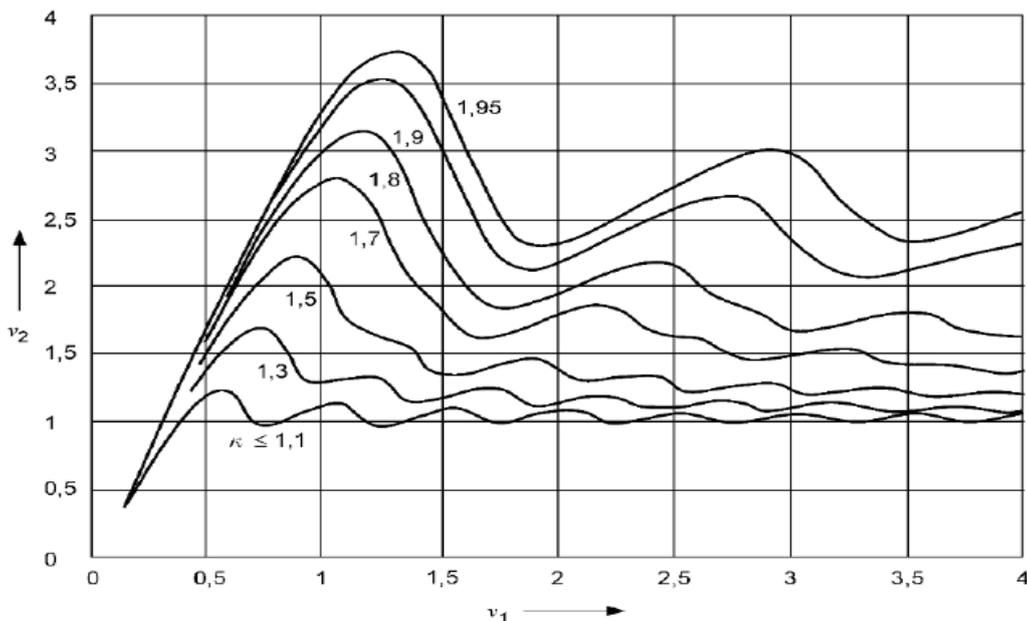
$$v_1 = f \frac{1}{\sin \frac{180^\circ}{n}} \sqrt{\frac{(a_s - d)m_s'}{\frac{\mu_0}{2\pi} \left( \frac{I_k''}{n} \right)^2 \frac{n - 1}{a_s}}} \quad (29)$$

onde  $f$  é a frequência do sistema, em Hz;

$d$  é o diâmetro de um condutor, em metros;

$a_s$  é a distância entre os subcondutores do feixe, em metros.

Figura 19:  $v_2$  como função de  $v_1$



$$v_2 = 1 - \frac{\text{sen}(4\pi f T_{pi} - 2\gamma)}{4\pi f T_{pi}} + \frac{f\tau}{f T_{pi}} \left( 1 - e^{-\frac{2f T_{pi}}{f\tau}} \right) \text{sen}^2 \gamma$$

$$- \frac{8\pi f \tau \text{sen} \gamma}{1 + (2\pi f \tau)^2} \left\{ \left( 2\pi f \tau \frac{\cos(2\pi f T_{pi} - \gamma)}{2\pi f T_{pi}} \right. \right. \quad (30)$$

$$\left. \left. + \frac{\text{sen}(2\pi f T_{pi} - \gamma)}{2\pi f T_{pi}} \right) e^{-\frac{f T_{pi}}{f\tau}} + \frac{\text{sen} \gamma - 2\pi f \tau \cos \gamma}{2\pi f T_{pi}} \right\}$$

onde  $f T_{pi}$  é a solução da Equação (31),  $\gamma$  é dado pela Equação (32), e  $\tau$  é a constante de tempo da rede e pode ser calculada de acordo com a IEC 60909-0 [26] conforme Equação (33), com  $k \geq 1,1$ . Se  $k < 1,1$  deve-se adotar  $k=1,1$ .

$$f T_{pi} = \frac{\sqrt{v_2}}{v_1} \quad (31)$$

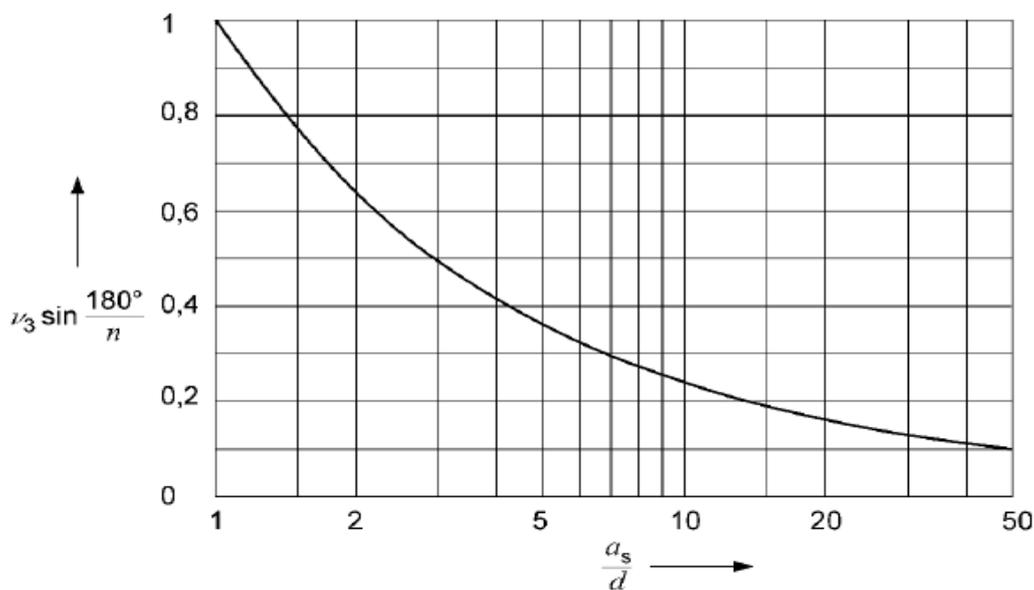
$$\gamma = \arctan(2\pi f \tau) \quad (32)$$

$$\frac{1}{\tau} = -\frac{2\pi f}{3} \ln \left( \frac{k - 1,02}{0,98} \right) \quad (33)$$

O fator auxiliar  $v_3$  é encontrado pela Figura 20, ou através da Equação (34).

$$v_3 = \frac{\frac{d}{a_s}}{\sin \frac{180^\circ}{n}} \frac{\sqrt{(a_s/d) - 1}}{\arctan \sqrt{(a_s/d) - 1}} \quad (34)$$

Figura 20:  $v_3 \times \text{sen} 180^\circ/n$  como função de  $a_s/d$



O parâmetro  $j$  determina a configuração do feixe de subcondutores durante o fluxo de corrente de curto-circuito da seguinte maneira:

Se  $j \geq 1$  Os subcondutores colidem. A força de tração  $F_{pi,d}$  é calculada em 3.6.1;

Se  $j < 1$  Os subcondutores se aproximam, mas não colidem. A força de tração  $F_{pi,d}$  é calculada em 3.6.2.

O parâmetro  $j$  é calculado pela Equação (35), onde  $\varepsilon_{st}$  e  $\varepsilon_{pi}$  são fatores adimensionais auxiliares que caracterizam a contração do feixe, calculados pelas Equações (36) e (37), respectivamente.

$$j = \sqrt{\frac{\varepsilon_{pi}}{1 + \varepsilon_{st}}} \quad (35)$$

$$\varepsilon_{st} = 1,5 \frac{F_{st} I_s^2 N}{(a_s - d)^2} \left( \sin \frac{180^\circ}{n} \right)^2 \quad (36)$$

$$\varepsilon_{pi} = 0,375 \frac{F_v I_s^3 N}{(a_s - d)^3} \left( \sin \frac{180^\circ}{n} \right)^3 \quad (37)$$

### 3.6.1. Força de tração $F_{pi,d}$ no caso de os subcondutores colidirem

Se  $j \geq 1$ , os subcondutores do feixe colidem e a força de tração  $F_{pi,d}$  é obtida a partir da Equação (38)

$$F_{pi,d} = F_{st} \left( 1 + \frac{v_e}{\varepsilon_{st}} \xi \right) \quad (38)$$

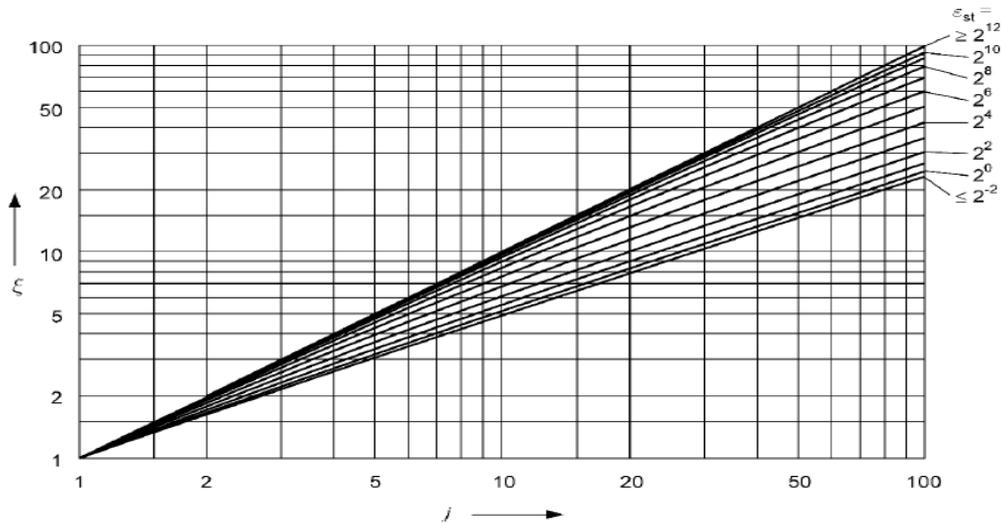
onde  $v_e$  é dado pela Equação (39), com o fator auxiliar  $v_4$  calculado pela Equação (40).

$$v_e = \frac{1}{2} + \left[ \frac{9}{8} n(n-1) \frac{\mu_0}{2\pi} \left( \frac{I_k^n}{n} \right)^2 N v_2 \left( \frac{l_s}{(a_s - d)} \right)^4 \frac{\left( \sin \frac{180^\circ}{n} \right)^4}{\xi^3} \left\{ 1 - \frac{\arctan \sqrt{v_4}}{\sqrt{v_4}} \right\} - \frac{1}{4} \right] \quad (39)$$

$$v_4 = \frac{(a_s - d)}{d} \quad (40)$$

O fator auxiliar  $\xi$  é dado pela Figura 21 ou pela solução real da Equação (41).

$$\xi^3 + \varepsilon_{st} \xi^2 - j^2 (1 + \varepsilon_{st}) = 0 \quad (41)$$

Figura 21:  $\xi$  como função de  $j$  e  $\varepsilon_{st}$ 

Fonte IEC 60865-1

### 3.6.2. Força de tração $F_{pi,d}$ no caso de os subcondutores não colidirem

Se  $j < 1$ , os subcondutores do feixe não colidem e a força de tração  $F_{pi,d}$ , em Newtons, é obtida a partir da Equação (42), onde o fator auxiliar  $v_e$ , adimensional, é dado pela Equação (43) e o fator auxiliar  $v_4$  pela Equação (44).

$$F_{pi,d} = F_{st} \left( 1 + \frac{v_e}{\varepsilon_{st}} \eta^2 \right) \quad (42)$$

$$v_e = \frac{1}{2} + \left[ \frac{9}{8} n(n-1) \frac{\mu_0}{2\pi} \left( \frac{I_k}{n} \right)^2 N v_2 \left( \frac{l_s}{(a_s - d)} \right)^4 \frac{\left( \sin \frac{180^\circ}{n} \right)^4}{\eta^4} \left\{ 1 - \frac{\arctan \sqrt{v_4}}{\sqrt{v_4}} \right\} - \frac{1}{4} \right] \quad (43)$$

$$v_4 = \eta \frac{a_s - d}{a_s - \eta(a_s - d)} \quad (44)$$

O fator auxiliar  $\eta$ , adimensional, pode ser determinado pela solução da Equação (45), para  $0 < \eta \leq 1$ ; podendo também ser determinado por um dos diagramas das Figura 22, Figura 23 ou Figura 24, dependendo do parâmetro  $\frac{a_s}{d}$ . Para  $2,5 < \frac{a_s}{d} \leq 5,0$  Figura 22, se  $5,0 < \frac{a_s}{d} \leq 10,0$  Figura 23 e para  $10,0 < \frac{a_s}{d} \leq 15,0$  Figura 24.

$$\eta^3 + \varepsilon_{st}\eta - j^2(1 + \varepsilon_{st})f_\eta = 0 \quad (45)$$

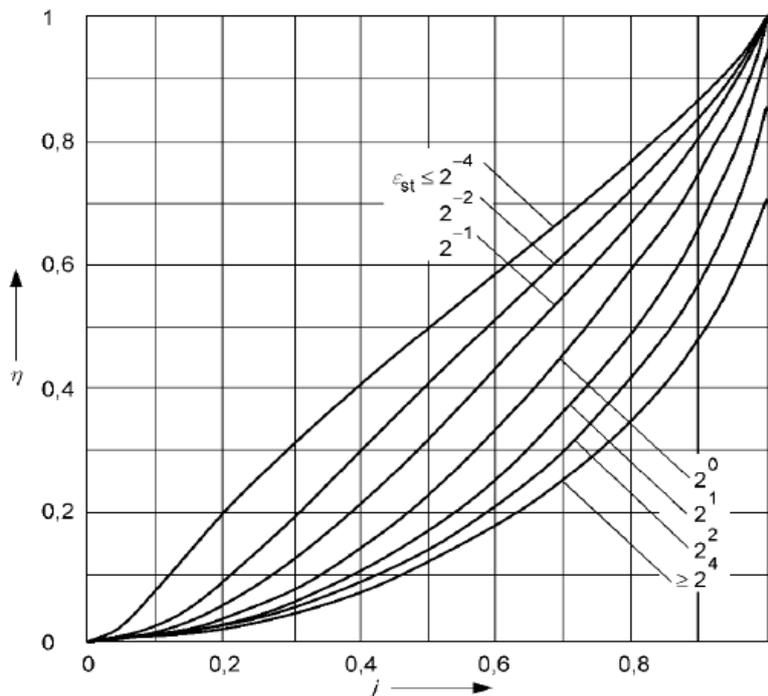
onde  $f_\eta$  é um fator auxiliar, dado pela Equação (46),  $a_{sw}/a_s$  é um fator auxiliar, dado pela Equação (47) e  $2y_a/a_s$  é um fator auxiliar dependente do próprio  $\eta$ , dado pela Equação (48).

$$f_\eta = \frac{v_3}{a_{sw}/a_s} \quad (46)$$

$$\frac{a_{sw}}{a_s} = \frac{2y_a/a_s}{\sin \frac{180^\circ}{n}} \frac{\sqrt{\frac{1 - 2y_a/a_s}{2y_a/a_s}}}{\arctan \sqrt{\frac{1 - 2y_a/a_s}{2y_a/a_s}}} \quad (47)$$

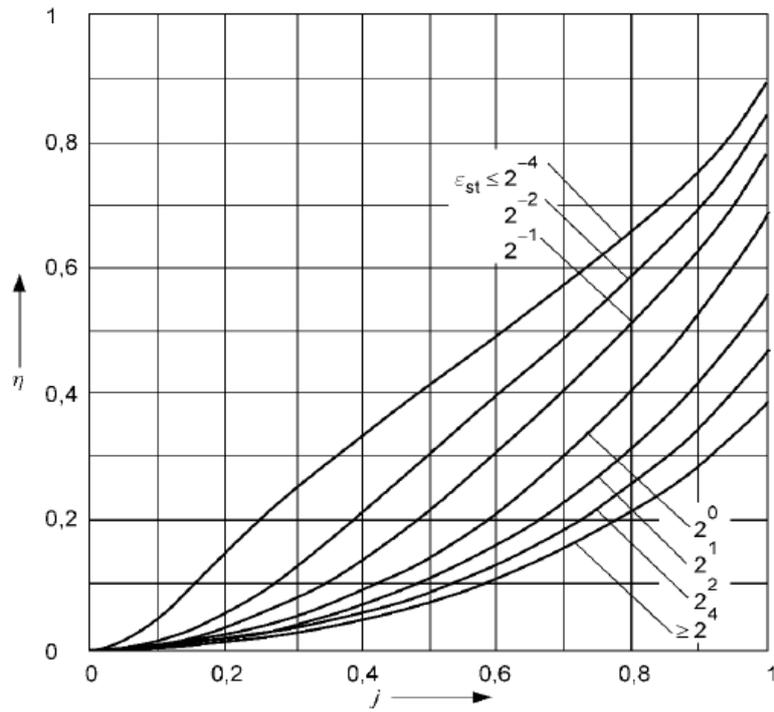
$$\frac{2y_a}{a_s} = 1 - \eta(1 - d/a_s) \quad (48)$$

Figura 22:  $\eta$  como função de  $j$  e est  $2,5 < a_s/d \leq 5,0$



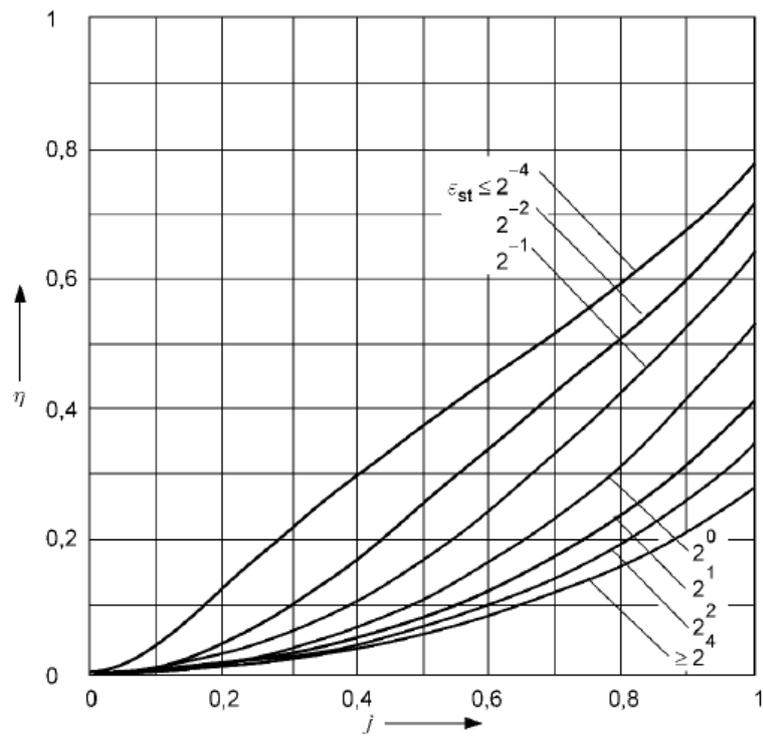
Fonte IEC 60865-1

Figura 23:  $\eta$  como função de  $j$  e  $\varepsilon_{st}$   $5,0 < as/d \leq 10,0$



Fonte IEC 60865-1

Figura 24:  $\eta$  como função de  $j$  e  $\varepsilon_{st}$   $10,0 < as/d \leq 15,0$



Fonte IEC 60865-1

### 3.7. Cargas estruturais

Por fim, a norma IEC60865-1 recomenda também que sejam considerados os itens 3.7.1 3.7.2 e 3.7.3 para o correto dimensionamento dos esforços em estruturas, isoladores, suportes e conectores.

#### 3.7.1. Carga de projeto para isoladores de poste, seus suportes e conectores

O valor máximo de  $F_{t,d}$ ,  $F_{f,d}$  ou  $F_{pi,d}$  para arranjos de condutores flexíveis não deve ser maior do que o valor suportado, que é fornecido pelo fabricante de suportes e isoladores. Para um isolador estressado por uma força de flexão, o valor de resistência nominal é dado como uma força que atua na cabeça do isolador.

NOTA 1 Para uma força que atua em um ponto superior à cabeça do isolador, um valor de resistência inferior ao nominal deve ser utilizado, com base na resistência ao momento de flexão na seção transversal do isolador crítico.

Os conectores para condutores flexíveis devem ser classificados com base no valor máximo de 1,5  $F_{t,d}$ , 1,0  $F_{f,d}$  ou 1,0  $F_{pi,d}$ .

NOTA 2 O fator 1,5 leva em consideração que a energia das oscilações é absorvida pela massa do isolador.

#### 3.7.2. Carga de projeto para estruturas, isoladores e conectores com forças de tração transmitido por cadeias de isoladores

O valor máximo de  $F_{t,d}$ ,  $F_{f,d}$  ou  $F_{pi,d}$  para vãos de condutores flexíveis deve ser aplicado à estrutura, isoladores e conectores como carga estática.

NOTA 1 No projeto de estruturas trifásicas para curtos-circuitos trifásicos, deve-se lembrar que o valor máximo de  $F_{t,d}$  ou  $F_{f,d}$  aparecerá em duas fases e a terceira fase será submetida apenas à tensão estática.

NOTA 2 Na concepção de estruturas trifásicas para curtos-circuitos trifásicos, diferentes valores máximos de  $F_{pi,d}$  podem ocorrer em diferentes momentos nas três fases. Este efeito é aproximadamente atingido aplicando a  $F_{pi,d}$  calculada, para duas fases da estrutura.

### 3.7.3. Carga de projeto para fundações

Para o projeto das fundações, 3.7.1 e 3.7.2 se aplicam em conformidade.

NOTA Devido à inércia e ao caráter dinâmico de um curto-circuito, os efeitos da instabilidade não precisam ser considerados na fase de projeto das fundações monolíticas (fundações monobloco). Pode-se assumir que a estabilidade é dada se um projeto, além de atender aos esforços calculados nesta norma, atenda a outras cargas de projeto, como força de tração estática e carga de vento.

## 4. Desenvolvimento do aplicativo em Excel

Para que a solução das equações do Capítulo 3, obtidas da IEC 61865-1, seja encontrada de forma quase instantânea, surgiu a ideia de aplicá-las em um programa que realizasse a sequência de cálculos, não mais tornando necessário que o projetista invista horas executando os cálculos, e após uma pequena alteração nos dados de entrada precise refazê-los. Optou-se pelo software Microsoft Excel pela popularidade do mesmo entre os projetistas que poderão vir a utilizar o arquivo para cálculo de esforços aqui desenvolvido, além da praticidade que o software Microsoft Excel fornece para que ao testar diferentes dados de entrada o usuário copie os novos resultados fornecidos em células vazias ao lado ou mesmo em outra aba ou planilha, onde o usuário sempre tem à mão todas as ferramentas do software Microsoft Excel para fazer comparações e análises rápidas entre os diferentes resultados obtidos.

Por se tratar de uma extensa sequência de cálculos, para garantir o correto funcionamento do programa e evitar que o usuário faça alterações nas equações, o que possivelmente comprometeria toda a análise e resultados, todos os tratamentos e cálculos são feitos em VBA (Visual Basic for Applications). Na interface com o usuário estão disponíveis apenas os campos relacionados aos dados de entrada, resultados intermediários de cálculos e dados de saída.

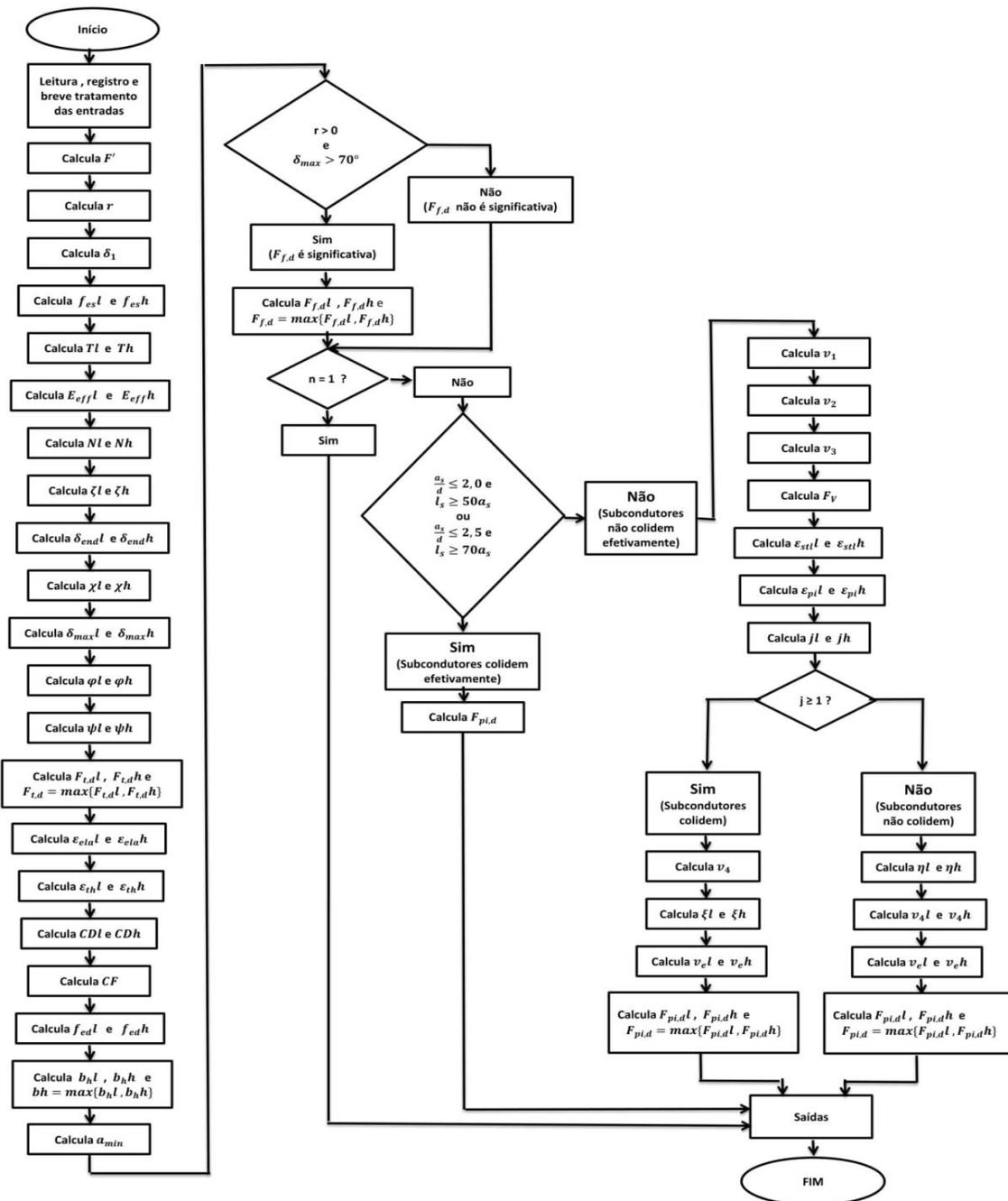
Visual Basic for Applications (VBA) é uma linguagem de programação desenvolvida pela Microsoft, disponível também em outros softwares do pacote Office, que geralmente é utilizada para gravar repetições de atividades, ou uma sequência de atividades pré-programadas, chamadas de macros, que normalmente são ativadas por botões inseridos na interface com o usuário, mas podem ser programadas para que sejam executadas automaticamente assim que ocorrer uma determinada situação pré-programada.

A programação em VBA, além de permitir que sejam feitas inúmeras edições visando melhorar a aparência e visualização do arquivo na interface com o usuário - estas, pouco utilizadas neste arquivo por não se tratarem do foco do trabalho - permite que se utilize todas as funções já existentes no software Microsoft Excel. E como qualquer ferramenta de programação também permite que se crie qualquer fórmula ou rotina do interesse utilizando conceitos básicos de programação (como “If, ElseIf, Else e End If”, “Do While – Loop” entre

outras), com a diferença apenas de que alguns casos necessitarão uma quantidade maior de linhas de código. A programação em VBA também permite que se divida o arquivo em várias Sub's (sub-rotinas) e acesse uma sub-rotina dentro da outra.

As equações do Capítulo 3, conforme a IEC60865, foram então adaptadas em linguagem de código VBA para reproduzir a sequência do fluxograma da Figura 25, que resume as etapas de cálculo deste projeto. Para visualizar o fluxograma em maior escala, consulte o Apêndice II.

Figura 25: Fluxograma

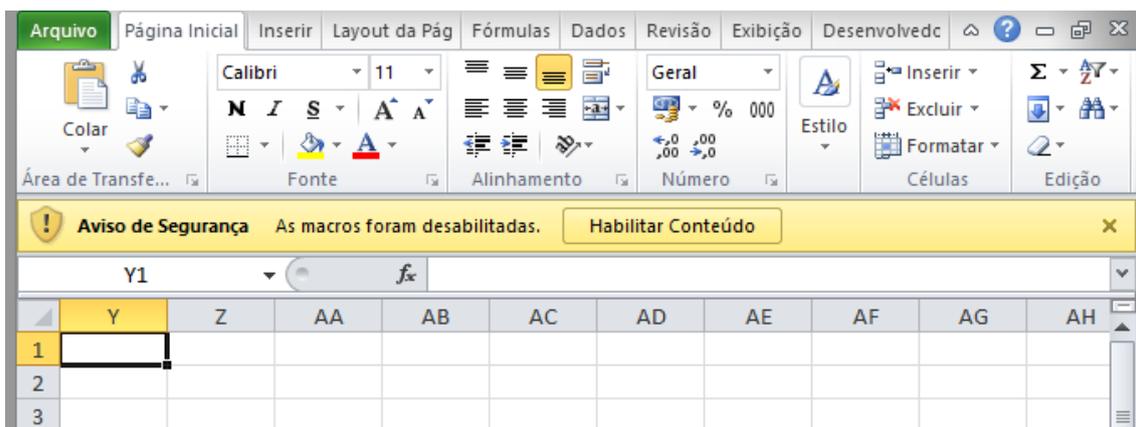


O fluxograma, para melhor visualização, omite os detalhes de tratamento das células. Estes tratamentos não são necessários para a execução da sequência de cálculos e obtenção de resultados e foram adicionados apenas para melhorar e facilitar a entrada de dados e leitura de dados de saída pelo usuário. Os detalhes de tratamentos das células serão comentados ao longo do capítulo.

O arquivo desenvolvido tem então a extensão “.xlsm”, que é a soma de uma planilha básica do Microsoft Excel (arquivo “.xls”) com um “m” ao final mostrando que a planilha é acrescida de macros. No caso de salvar o arquivo utilizando a opção “Salvar como” é necessário manter a extensão “.xlsm”, pois se o arquivo for salvo apenas como uma planilha “.xls” a nova versão perderá toda a programação feita e no caso deste arquivo específico, os resultados serão nulos.

Para executar um arquivo com macros é necessário tomar um cuidado inicial de habilitar as macros. Ao abrir um arquivo “.xlsm” desconhecido, o Microsoft Excel costuma ocultar as macros e exibe um alerta de segurança na parte superior do programa conforme Figura 26 . É necessário clicar na opção “Habilitar Conteúdo”. Caso contrário o usuário terá a sua disposição apenas uma planilha normal, perdendo todas as funções e sub-rotinas programadas em VBA.

Figura 26: Habilitar macros ao abrir o arquivo (se necessário)

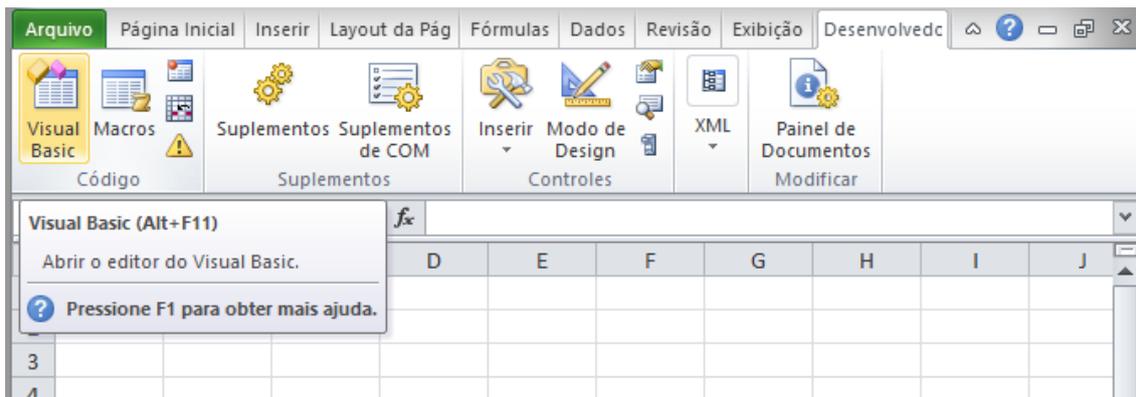


As ferramentas de desenvolvedor, por padrão, não são inicialmente exibidas no Microsoft Excel. É necessário ativá-las (gratuitamente) pela rápida sequência de instruções a seguir.

Clicar em “Arquivo”, na barra Arquivo clicar em “Opções”, na caixa de Opções clicar em “Personalizar Faixa de Opções” e na coluna “Guias Principais” marcar a caixa de seleção “Desenvolvedor”.

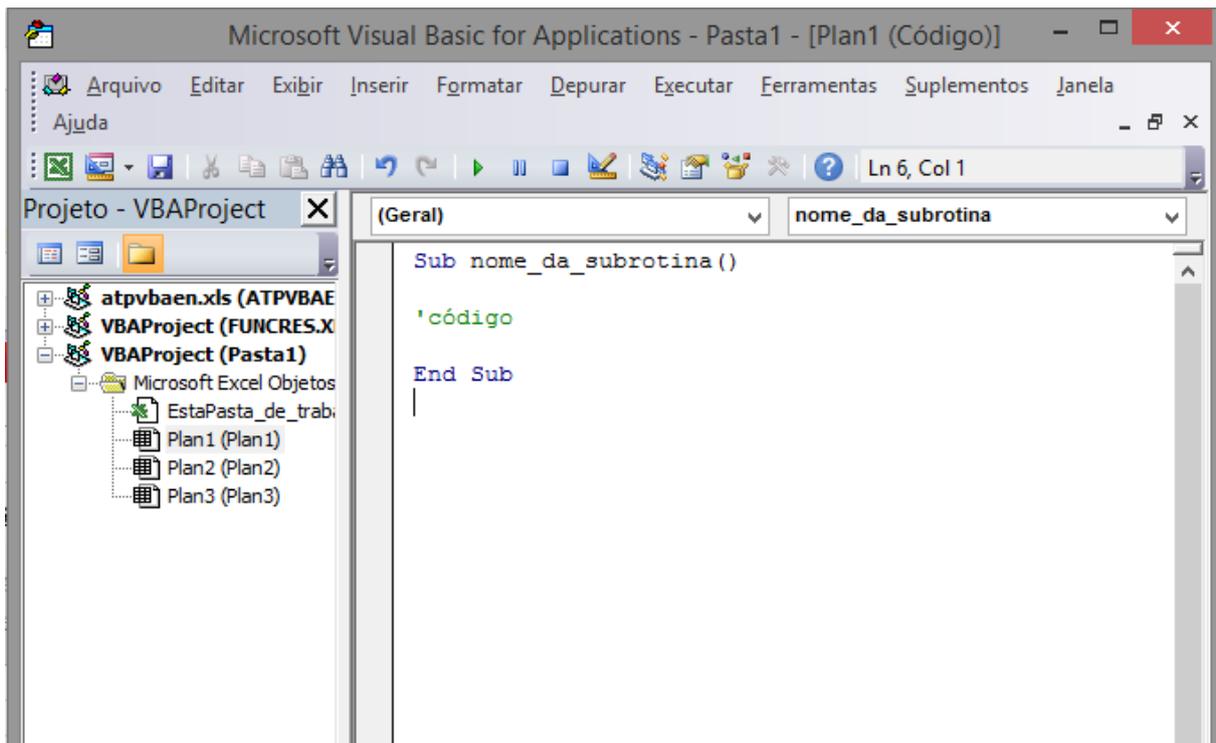
A interface de programação é acessada pelo atalho de teclado “Alt+F11”, ou simplesmente clicando em Visual Basic na aba Desenvolvedor conforme Figura 27.

Figura 27: Acessando a interface do VBA



Já na interface de programação, Figura 28, criam-se as sub-rotinas digitando `Sub nome_da_subrotina ( )` e então uma macro chamada `nome_da_subrotina` é criada e já fica disponível para ser adicionada a um botão na interface do usuário.

Figura 28: Interface do VBA



Dentro das sub-rotinas existem alguns procedimentos obrigatórios, porém para a criação das sub-rotinas o programa permite diversas combinações diferentes para encontrar um mesmo resultado. A ajuda do próprio programa é bastante útil além de existirem diversos Fóruns na internet específicos para a solução de problemas encontrados por usuários programando em VBA. Existem também cursos específicos para aprendizado de programação em VBA. O objetivo da sequência do capítulo não é ensinar uma forma correta de realizar a programação no software, e sim apenas mostrar alguns pontos úteis de conhecimentos adquiridos ao longo dos anos e que foram utilizados no código deste arquivo. O código completo está disponível ao fim deste trabalho como Apêndice I.

A inserção dos dados de entrada pode ser feita a partir de qualquer célula da planilha da interface do usuário ou em forma de uma nova caixa, como uma caixa de mensagens que se sobrepõe à planilha normal. Neste caso optou-se pela primeira opção, considerando que provavelmente o usuário vá utilizar várias vezes entradas semelhantes, alguns dados como informações de materiais dificilmente serão alterados. A entrada de dados pode ser vista na Figura 29. A entrada de dados utilizando a nova caixa também pode ser facilmente criada utilizando a interface para “Módulo”, selecionada na coluna do lado esquerdo da Figura 28.

É necessário inicialmente dimensionar as variáveis associadas a dados de entrada como Boolean, Byte, Integer, Long, Currency, Single, Double, Date, String, Object ou Variant, para este dimensionamento a ajuda do software é bastante autoexplicativa.

Para a leitura dos valores das células que contém os dados de entrada o método mais simples é literalmente ler o valor da célula. Exemplo: fazer a leitura da célula A3 (linha 1, coluna 3) e associar o valor à variável “z” ; `z=Cells(1,3).Value` ou ainda, `z=Range(“A3”).Value`.

Após o dimensionamento das variáveis de entrada e inserção dos dados de entrada o programador tem total liberdade para desenvolver o código. Para este arquivo, foi feita uma sub-rotina com código único que realiza todo o cálculo dos esforços, na sequência descrita no fluxograma da Figura 25. Foram criadas sub-rotinas adicionais apenas para tratamento da interface do usuário na visualização das entradas e saídas.

Por fim, os dados de saída são apresentados ao usuário de forma análoga a leitura dos dados de entrada. Exemplo: que a célula B5 (linha 2, coluna 5) receba o valor que dentro do

código foi associado à variável “saida1” ; `Cells(2,5).Value=saida1` ou ainda, `Range(“B5”).Value=saida1`.

Para acionar as sub-rotinas ou macros tem-se duas possibilidades: criar botões na interface com o usuário, assim as macros são acionados somente pelo clique do usuário ou utilizar a sub-rotina privada da planilha, “Private Sub Worksheet\_Change(ByVal Target As Range)”, que é permanentemente executada e todos os códigos e sub-rotinas que estiverem dentro dela são executados sempre que alguma célula do arquivo alterar seu valor (também existe, por exemplo, a possibilidade de executar a sub-rotina ao abrir o programa). Esta segunda opção é muito útil, porém pode tornar o programa bastante lento se não for tomado o cuidado de fixar sempre quais os dados (células) de interesse a se monitorar.

Neste arquivo, o cálculo dos esforços é acionado apenas quando o usuário clicar no botão, pois devido à sequência longa de cálculos o programa se torna bastante lento se o código todo for executado a cada alteração de célula; assim, ao concluir a inserção dos dados de entrada, o usuário clica no botão “RESULTADOS” e os resultados são mostrados logo abaixo. Também foram adicionados botões para “LIMPAR Dados de Entrada” e “LIMPAR Cálculos e Resultados”, autoexplicativos.

A sub-rotina privada foi utilizada apenas para melhor visualização dos dados de entrada e saídas. Nela estão sub-rotinas de tratamentos dos dados exibidos; tratamentos estes que não interferem no resultado gerado pelo arquivo; no caso de todos os tratamentos serem removidos do código o programa segue funcionando, porém o usuário precisa estar muito mais atento ao inserir as entradas e avaliar as saídas.

Exemplos de sub-rotinas inseridas na sub-rotina privada:

Avaliar se as células que devem conter dados de entrada estão em branco ou preenchidas, caso em branco elas se destacam em cor amarela, assim que preenchidas voltam a ter cor cinza.

Dependendo das entradas inseridas não são necessários todos os dados de entrada, então o programa oculta e mostra determinadas linhas, mostrando para o usuário apenas os dados de entrada relevantes a partir de cada entrada ou seleção feita. Por exemplo, quando se tem apenas um condutor por fase não faz sentido realizar o cálculo da Força  $F_{pi,d}$ , logo, os dados de entrada que só são utilizados neste cálculo não são necessários.

Nas saídas, da mesma forma, na tabela resumo só são exibidas as informações relevantes resultantes da sequência de cálculos. Os resultados detalhados estão logo abaixo, caso o usuário precise de valores intermediários específicos.

As sub-rotinas para limpar os dados inicialmente foram adicionadas na sub-rotina privada configurada para executar ao abrir o programa, porém, por frequentemente precisar inserir os mesmos dados de entrada, já no período de testes optou-se por executar estas opções apenas quando o usuário desejar. Além de que, a não utilização destes botões não interfere nos resultados; o arquivo executa estas sub-rotinas antes de realizar os cálculos. A ideia de deixar os botões disponíveis é para quando for iniciado um estudo novo o usuário tenha a opção de limpar todos os dados para evitar qualquer esquecimento de dado anterior de entrada.

Figura 29: Interface do usuário - dados de entrada

DADOS DE ENTRADA		
n =	< Selecione	n° subcondutores em cada fase
Tensão no condutor	< Selecione	
I3φ =	(kA)	Corrente de curto-circuito trifásica simétrica (kA)
I1φ =	(kA)	Corrente de curto-circuito fase-terra (kA)
Tk =	(s)	Tempo de duração do curto-circuito (s)
l =	(m)	Comprimento do vão (m)
a =	(m)	Distância média entre fases (m)
As =	(mm <sup>2</sup> )	Seção do subcondutor (mm <sup>2</sup> )
m =	(kg/m)	Massa específica do sub-condutor/unidade de comprimento (kg/m)
Fstl =	(N)	Tração (estática) à temperatura mínima de inverno (kN)
Fsth =	(N)	Tração (estática) à temperatura máxima de operação (kN)
E =	(N/mm <sup>2</sup> )	Módulo de Young (N/mm <sup>2</sup> ) - (1GPa=1000N/mm <sup>2</sup> e 1kgf/mm <sup>2</sup> ≈9,8N/mm <sup>2</sup> )
mc =	(kg)	Massa devido às conexões em um condutor (kg)
Cth conhecido?	< Selecione	Constante do material ((10 <sup>-18</sup> ) (m <sup>4</sup> /A <sup>2</sup> s)
Cth (10 <sup>-18</sup> ) =	(10 <sup>-18</sup> )(m <sup>4</sup> /A <sup>2</sup> s)	Constante do material ((10 <sup>-18</sup> ) (m <sup>4</sup> /A <sup>2</sup> s) ,ex: cobre=0,088.10 <sup>-18</sup>
Cth tabelado	Selecione >	< Selecione
S conhecido?	< Selecione	Constante de mola resultante dos pontos de fixação do vão (kN/m)
S =	(kN/m)	Constante de mola resultante de ambos os pontos de fixação do vão (kN/m)
S tabelado	(kN/m)	(tabelado) Constante de mola resultante dos pontos de fixação do vão (kN/m)
U = Selecione >	(kV)	Tensão nominal (kV)
li =	(m)	Comprimento de uma cadeia de isoladores
f =	(Hz)	Frequência de operação (Hz)
d =	(mm)	Diâmetro do condutor (mm)
ls =	(m)	Comprimento entre espaçadores (m)
as =	(m)	Distância entre subcondutores do bundle (m)
X/R ou k?	< Selecione	Relação X/R do condutor ou Fator k (adimensionais)
X/R =	-	Relação X/R do condutor (adimensional)

Figura 30: Interface do usuário – botões

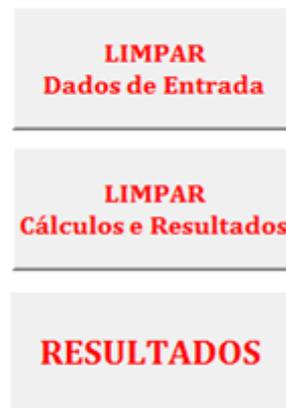


Figura 31: Interface do usuário – Resultados/Resumo

RESULTADOS/RESUMO		
Ftd =	(kN)	Força de tração durante o curto-circuito
Ffd =	(kN)	Força de tração após o curto-circuito
Ocorre choque?		
Fv =	(kN)	Esforço devido ao curto-circuito
Fpid =	(kN)	Esforço entre os subcondutores do feixe, devido ao efeito pinch
bh =	(m)	Deslocamento horizontal máximo (flecha)
amin =	(m)	Distância mínima entre fases
Tensões de Projeto	Isoladores/Suportes	(kN)
	Conectores/Ancoragens	(kN)
	Estruturas/Fundações	(kN)

Figura 32: Interface do usuário – Resultados (etapas de cálculo)

<b>RESULTADOS (Etapas de Cálculo)</b>			
Força eletromagnética (N/m)	$F' =$		
Relação Feletro/Fpeso (-)	$r =$		
Direção da força resultante sobre o condutor (rad)	$\delta 1$ (rad) =		
Direção da força resultante sobre o condutor (°)	$\delta 1$ (°) =		
Flecha estatica (m)	$fesl =$	$fesh =$	
Período das oscilações (s)	$Tl =$	$Th =$	
Período das oscilações durante o curto (s)	$Tresl =$	$Tresh =$	
Valor atual do módulo de Young (N/mm <sup>2</sup> )	$Eeffl =$	$Eeffh =$	
Norma da rigidez (1/N)	$Nl =$	$Nh =$	
Fator de stress (-)	$\zeta l =$	$\zeta h =$	
Ângulo de oscilação no final do curto (°)	$\delta endl =$	$\delta endh =$	
Fator auxiliar (-)	$\chi l =$	$\chi h =$	
Ângulo maximo de oscilação (°)	$\delta maxl =$	$\delta maxh =$	
Fator auxiliar (-)	$\phi l =$	$\phi h =$	
Fator auxiliar (-)	$\psi l =$	$\psi h =$	
Força de tração durante o curto (N)	$Ftdl =$	$Ftdh =$	
<b>Força de tração durante o curto (N)</b>	<b><math>Ftd</math> (N) =</b>		
Expansao elastica (-)	$\epsilon elal =$	$\epsilon elah =$	
Expansao termica (-)	$\epsilon thl =$	$\epsilon thh =$	
Fator de dilatação (-)	$CDl =$	$CDh =$	
Fator de forma (-)	$CF =$		
Flecha dinamica (m)	$fedl =$	$fedh =$	
Força de tração após o curto (N)	$Ffdl =$	$Ffdh =$	
<b>força de tração após o curto (N)</b>	<b><math>Ffd</math> (N) =</b>		
Máximo deslocamento horizontal (m)	$bhl =$	$bhh =$	
Máximo deslocamento horizontal (m)	$bh =$		
Distância mínima entre fases (m)	$amin =$		
	<b><math>Fsecolide =</math></b>		
Fator auxiliar (-)	$v1 =$		
Fator auxiliar (-)	$v2 =$		
Fator auxiliar (-)	$v3 =$		
Força de corrente de curto (N)	$Fv =$		
Força de pinch effect, se colidem efetivamente (N)	$Fpid =$		
Contração do feixe (-)	$\epsilon stl =$	$\epsilon sth =$	
Contração do feixe (-)	$\epsilon pil =$	$\epsilon pih =$	
Configuração do feixe durante o curto (-)	$jl =$	$jh =$	
Fator auxiliar (-)	$\xi l =$	$\xi h =$	
Fator auxiliar (-)	$v4 =$		
Fator auxiliar (-)	$vel =$	$veh =$	
Força causada pelo pinch effect, se colidem (N)	$Fpidl =$	$Fpidh =$	
<b>Força causada pelo pinch effect, se colidem (N)</b>	<b><math>Fpid</math> (N) =</b>		
Fator auxiliar (-)	$\eta l =$	$\eta h =$	
Fator auxiliar (-)	$v4l =$	$v4h =$	
Fator auxiliar (-)	$vel =$	$veh =$	
Força causada pelo pinch effect, se não colidem (N)	$Fpidl =$	$Fpidh =$	
<b>Força causada pelo pinch effect, se não colidem (N)</b>	<b><math>Fpid</math> (N) =</b>		

## 5. Estudo de caso

Para validação do funcionamento do arquivo foram testados os dois exemplos da segunda parte da norma, IEC60865-2.

### 5.1. Caso 1 - Efeitos mecânicos em um arranjo de 110 kV com condutores desestressados (*slack*)

O estudo de caso 1 tem como objeto uma conexão de barramento flexível trifásica com um condutor de corrente por fase, de alumínio, com diferentes distâncias entre os condutores como mostra a Figura 33. Os pontos de ancoragem em cada extremidade do vão são isoladores de poste em subestruturas de aço. A Figura 34 apresenta os dados de entrada fornecidos.

Figura 33: Caso 1 - Arranjo dos condutores

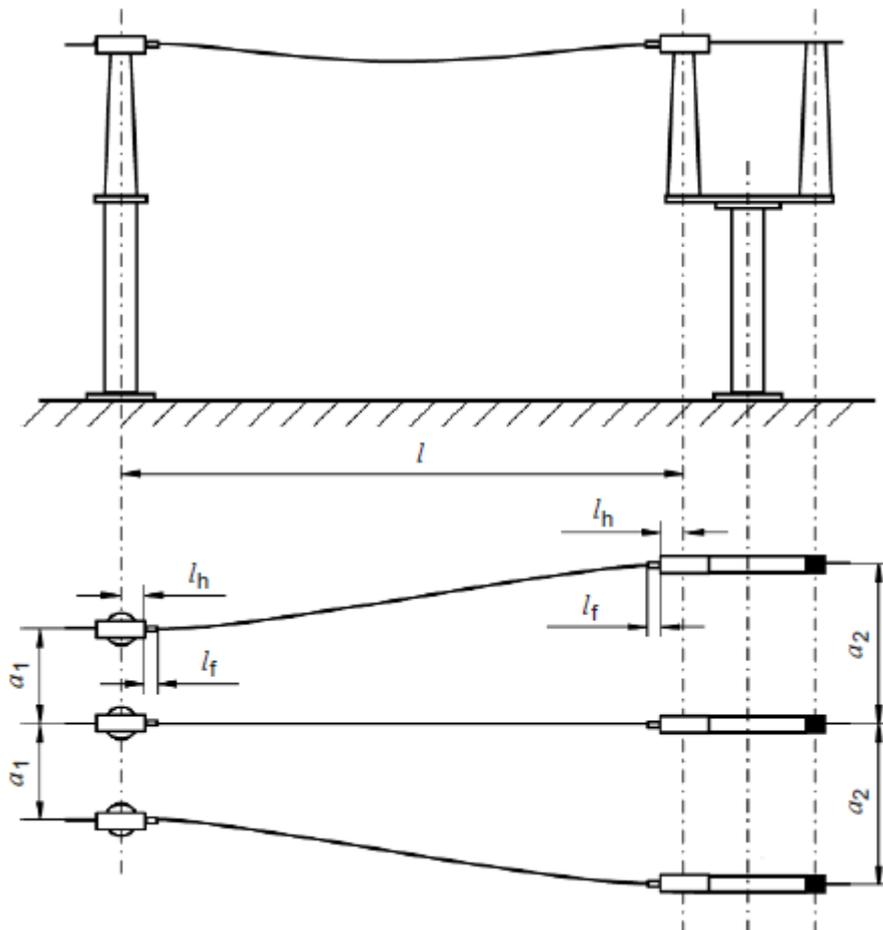


Figura 34: Caso 1 – Dados fornecidos

Initial symmetrical three-phase short-circuit current (r.m.s.)	$I_k^* = 19 \text{ kA}$
Duration of the first short-circuit current flow	$T_{k1} = 0,3 \text{ s}$
Centre-line distance between supports	$l = 11,5 \text{ m}$
Extend of one head armature and clamp	$l_h = 0,4 \text{ m}$
Form factor	$l_f = 0,15 \text{ m}$
Centre-line distances between conductors	$a_1 = 1,6 \text{ m}$
	$a_2 = 2,4 \text{ m}$
Resultant spring constant of both span supports	$S = 100 \text{ N/mm}$
All-aluminium stranded conductor EN 243-AL1	
– Number of sub-conductors	$n = 1$
– Cross section	$A_s = 243 \text{ mm}^2$
– Mass per unit length	$m'_s = 0,671 \text{ kg/m}$
– Young's modulus	$E = 55\,000 \text{ N/mm}^2$
Static tensile force of one flexible main conductor at a temperature of $-20^\circ\text{C}$ (local minimum winter temperature)	$F_{st,-20} = 350 \text{ N}$
Static tensile force of one flexible main conductor at a temperature of $60^\circ\text{C}$ (maximum operating temperature)	$F_{st,60} = 250 \text{ N}$
Conventional value of acceleration of gravity	$g = 9,81 \text{ m/s}^2$

Fonte: IEC60865-2

Conforme Figura 33 e Figura 34, o comprimento efetivo do vão,  $l$ , é a distância entre o eixo dos suportes reduzido pela extensão  $l_h$  da placa de conexão do equipamento incluindo o grampo e, foi fornecida também uma distância  $l_f$  proporcional a um fator de forma adicional da forma de montagem. Logo,

$$l_{efetivo} = l - 2l_h - 2l_f = 11,5 - 2 \cdot 0,4 - 2 \cdot 0,15 = 10,4 \text{ m}.$$

A partir das Figura 33 e Figura 34, tem-se também que a distância entre os condutores não é a mesma nas duas extremidades, considera-se a distância entre fases  $a$  no ponto central é igual à média das distâncias das duas extremidades; assim,

$$a = \frac{(a_1 + a_2)}{2} = \frac{1,6 + 2,4}{2} = 2,0 \text{ m}.$$

Após inserir os dados fornecidos na figura Figura 34 no arquivo desenvolvido, conforme Figura 35 e clicar no botão “RESULTADOS”, obtêm-se os resultados das Figura 36 e Figura 37. Na sequência, o Quadro 2 apresenta uma comparação entre os resultados obtidos utilizando o arquivo desenvolvido e os resultados da IEC60865-2, onde, o erro máximo encontrado foi nos cálculos da flecha dinâmica para a temperatura máxima de operação, do deslocamento horizontal máximo para a temperatura máxima de operação e da distância

mínima entre fases para a temperatura máxima de operação, todos com diferença de 1 cm entre o resultado do arquivo e a resposta fornecida na IEC 60865-2.

Figura 35: Dados de entrada – Caso 1

DADOS DE ENTRADA			
n =	1	< Selecione	n° subcondutores em cada fase
Tensão no condutor	Desestressado	< Selecione	
I3φ =	19	(kA)	Corrente de curto-circuito trifásica simétrica (kA)
I1φ =	0	(kA)	Corrente de curto-circuito fase-terra (kA)
Tk =	0.3	(s)	Tempo de duração do curto-circuito (s)
l =	10.4	(m)	Comprimento do vão (descontar suportes rígidos) (m)
a =	2	(m)	Distância média entre fases (m)
As =	243	(mm²)	Seção do subcondutor (mm²)
m =	0.671	(kg/m)	Massa específica do sub-condutor/unidade de comprimento (kg/m)
Fstl =	350	(N)	Tração (estática) à temperatura mínima de inverno (kN)
Fsth =	250	(N)	Tração (estática) à temperatura máxima de operação (kN)
E =	55000	(N/mm²)	Módulo de Young (N/mm²) - (1GPa=1000N/mm² e 1kgf/mm²≈9,8N/mm²)
mc =	0	(kg)	Massa devido às conexões em um condutor (kg)
Cth conhecido?	Não	< Selecione	Constante do material ((10 <sup>-18</sup> ) (m <sup>4</sup> )/A²s)
Cth tabelado	0.27	Selecione >	Alumínio, ligas de Al e Al-aço com relação de seção transversal Al/aço > 6 < Selecione
S conhecido?	Sim	< Selecione	Constante de mola resultante dos pontos de fixação do vão (kN/m)
S =	100	(kN/m)	Constante de mola resultante de ambos os pontos de fixação do vão (kN/m)

Figura 36: Resultados/Resumo – Caso 1

RESULTADOS/RESUMO			
Ftd =	2.37	(kN)	Força de tração durante o curto-circuito
Ffd =	2.76	(kN)	Força de tração após o curto-circuito
bh =	0.54	(m)	Deslocamento horizontal máximo (flecha)
amin =	0.91	(m)	Distância mínima entre fases
Tensões de Projeto	Isoladores/Suportes	2.76	(kN) Devido a Ffd - força após o curto
	Conectores/Ancoragem:	3.55	(kN) Devido a Ftd - força durante o curto
	Estruturas/Fundações	2.76	(kN) Devido a Ffd - força após o curto

Figura 37: Resultados (etapas de cálculo) – Caso 1

RESULTADOS (Etapas de Cálculo)					
Força eletromagnética (N/m)	F' =	27.08			
Relação Feleto/Fpeso (-)	r =	4.11			
Direção da força resultante sobre o condutor (rad)	$\delta 1$ (rad) =	1.33			
Direção da força resultante sobre o condutor (°)	$\delta 1$ (°) =	76.34			
Flecha estática (m)	fesl =	0.25	fesh =	0.36	
Período das oscilações (s)	Tl =	0.90	Th =	1.07	
Período das oscilações durante o curto (s)	Tresl =	0.49	Tresh =	0.59	
Valor atual do módulo de Young (N/mm <sup>2</sup> )	Eeffl =	18241.50	Eeffh =	17744.14	
Norma da rigidez (1/N)	Nl =	0.00	Nh =	0.00	
Fator de stress (-)	$\zeta l$ =	3.84	$\zeta h$ =	10.47	
Ângulo de oscilação no final do curto (°)	$\delta endl$ =	152.67	$\delta endh$ =	152.67	
Fator auxiliar (-)	$\chi l$ =	-3.11	$\chi h$ =	-3.11	
Ângulo máximo de oscilação (°)	$\delta maxl$ =	180.00	$\delta maxh$ =	180.00	
Fator auxiliar (-)	$\varphi l$ =	9.70	$\varphi h$ =	9.70	
Fator auxiliar (-)	$\psi l$ =	0.59	$\psi h$ =	0.75	
Força de tração durante o curto (N)	Ftdl =	2367.23	Ftdh =	2057.28	
Força de tração durante o curto (N)	Ftd (N) =	2367.23			
Expansão elástica (-)	$\epsilon elal$ =	2.39E-03	$\epsilon elah$ =	2.16E-03	
Expansão térmica (-)	$\epsilon thl$ =	2.04E-04	$\epsilon thh$ =	2.42E-04	
Fator de dilatação (-)	CDI =	1.62	CDh =	1.33	
Fator de forma (-)	CF =	1.15			
Flecha dinâmica (m)	fedl =	0.47	fedh =	0.54	
Força de tração após o curto (N)	Ffdl =	2364.41	Ffdh =	2762.16	
		Ffd é significativa		Ffd é significativa	
força de tração após o curto (N)	Ffd (N) =	2762.16			
Máximo deslocamento horizontal (m)	bhl =	0.47	bhh =	0.54	
Máximo deslocamento horizontal (m)	bh =	0.54			
Distância mínima entre fases (m)	amin =	0.91			

Quadro 2: Comparação dos resultados com a IEC 60865-2 – Caso 1

Parâmetros Calculados	Simb.	Calculado	IEC 60865-2	Diferença (módulo)	Erro %
Força eletromagnética (N/m)	F'	27.075	27.1	0.02	0%
Relação Feleto/Fpeso (-)	r	4.113	4.12	0.01	0%
Direção da força resultante sobre o condutor (°)	$\delta 1$	76.335	76.4	0.06	0%
Flecha estática (m)	fesl	0.254	0.254	0.00	0%
	fesh	0.356	0.356	0.00	0%
Período das oscilações (s)	Tl	0.905	0.904	0.00	0%
	Th	1.071	1.071	0.00	0%
Período das oscilações durante o curto (s)	Tresl	0.495	0.494	0.00	0%
	Tresh	0.585	0.585	0.00	0%
Valor real do módulo de Young (N/mm <sup>2</sup> )	Eeffl	1.824E+04	1.820E+04	41.50	0%
	Eeffh	1.774E+04	1.780E+04	55.86	0%
Norma da rigidez (1/N)	Nl	1.187E-06	1.188E-06	0.00	0%
	Nh	1.193E-06	1.193E-06	0.00	0%

Continuação de Quadro 2

Fator de stress (-)	$\zeta_l$	3.836	3.84	0.00	0%
	$\zeta_h$	10.472	10.5	0.03	0%
Ângulo de oscilação no final do curto (°)	$\delta_{endl}$	152.671	153	0.33	0%
	$\delta_{endh}$	152.671	153	0.33	0%
Fator auxiliar (-)	$\chi_l$	-3.113	-3.12	0.01	0%
	$\chi_h$	-3.113	-3.12	0.01	0%
Ângulo máximo de oscilação (°)	$\delta_{maxl}$	180.000	180	0.00	0%
	$\delta_{maxh}$	180.000	180	0.00	0%
Fator auxiliar (-)	$\phi_l$	9.699	9.72	0.02	0%
	$\phi_h$	9.699	9.72	0.02	0%
Fator auxiliar (-)	$\psi_l$	0.594	0.594	0.00	0%
	$\psi_h$	0.745	0.745	0.00	0%
Força de tração durante o curto (N)	$F_{tdl}$	2367.233	2371	3.77	0%
	$F_{tdh}$	2057.276	2060	2.72	0%
Força de tração durante o curto (N)	$F_{td}$	2367.233	2370	2.77	0%
Expansão elástica (-)	$\epsilon_{elah}$	2.157E-03	2.160E-03	0.00	0%
Expansão térmica (-)	$\epsilon_{thh}$	2.415E-04	2.410E-04	0.00	0%
Fator de dilatação (-)	CDh	1.330	1.33	0.00	0%
Fator de forma (-)	CF	1.150	1.15	0.00	0%
Flecha dinâmica (m)	$f_{edh}$	0.544	0.55	0.01	1%
Força de tração após o curto (N)	$F_{fdl}$	2364.414	2366	1.59	0%
	$F_{fdh}$	2762.158	2766	3.84	0%
força de tração após o curto (N)	$F_{fd}$	2762.158	2766	3.84	0%
Máximo deslocamento horizontal (m)	bh	0.544	0.55	0.01	1%
Distância mínima entre fases (m)	$a_{min}$	0.911	0.9	0.01	1%

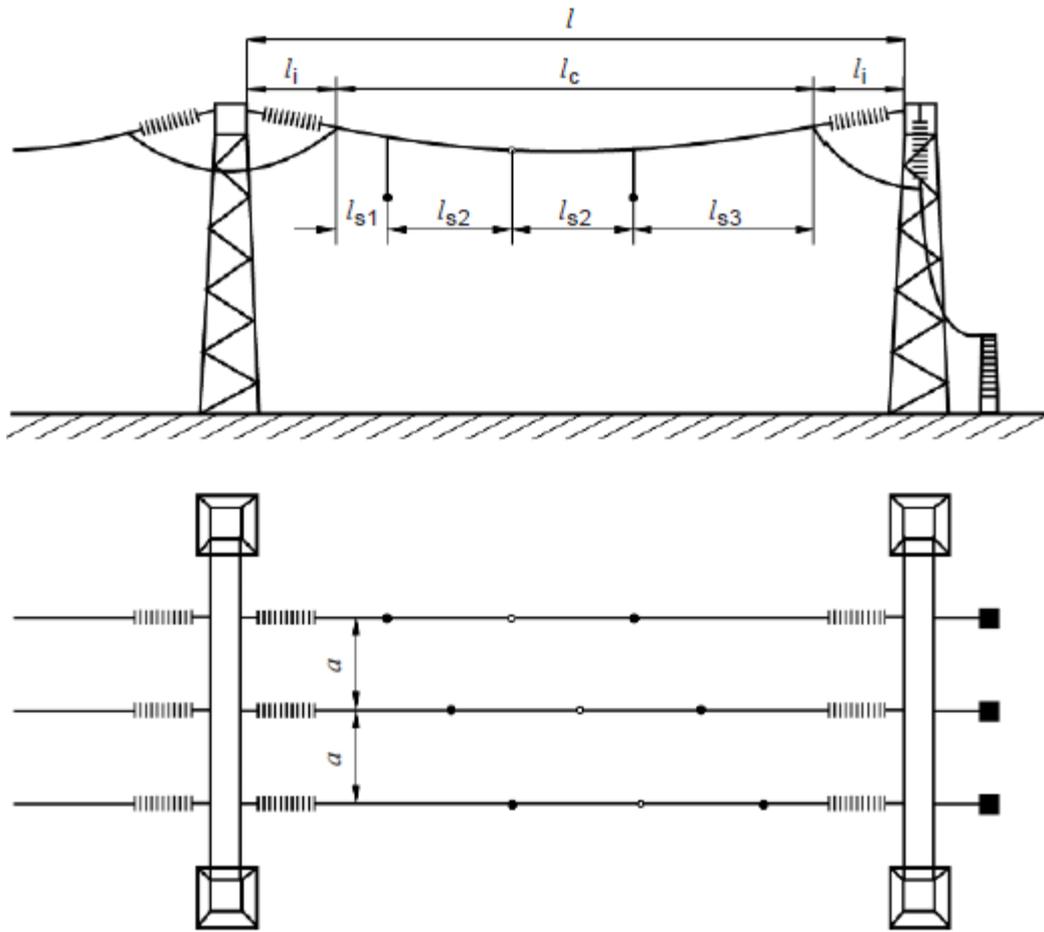
## 5.2. Caso 2 – Efeitos mecânicos em condutores estressados (*strained*)

O estudo de caso 2 tem como objeto um arranjo trifásico de 380 kV com condutores estressados (*strained*) e dois condutores por fase, como mostra a Figura 38. No vão há duas conexões de chaves seccionadoras pantográficas que também funcionam como espaçadores, e entre as conexões um espaçador.

O cálculo é realizado para duas distâncias diferentes entre os subcondutores do feixe, mostrando as forças do efeito *pinch*.

A Figura 38 apresenta o arranjo dos condutores, e a Figura 39 os dados de entrada fornecidos.

Figura 38: Caso 2 - Arranjo dos condutores



Fonte: IEC60865-2

Figura 39: Caso 2 – Dados fornecidos

Initial symmetrical three-phase short-circuit current (r.m.s.)	$I_k^*$	=	63 kA
Factor for the calculation of the peak short-circuit current	$\kappa$	=	1,81
Duration of the short-circuit current flow	$T_{k1}$	=	0,5 s
System frequency	$f$	=	50 Hz
Centre-line distance between supports	$l$	=	48 m
Length of one insulator chain	$l_i$	=	5,3 m
Cord length $l_c = l - 2l_i$	$l_c$	=	37,4 m
Centre-line distance between conductors	$a$	=	5 m
Resultant spring constant of both span supports of one span	$S$	=	500 N/mm
Twin conductor 2 EN 1046-AL1/45-ST1A			
– Number of sub-conductors	$n$	=	2
– Outer diameter of one sub-conductor	$d$	=	43 mm
– Cross-section of one sub-conductor	$A_s$	=	1 090 mm <sup>2</sup>
– Mass per unit length of one sub-conductor	$m'_s$	=	3,25 kg/m
– Young's modulus	$E$	=	60 000 N/mm <sup>2</sup>
Static tensile force of one flexible main conductor at a temperature of –20°C (local minimum winter temperature)	$F_{st,-20}$	=	17,8 kN
Static tensile force of one flexible main conductor at a temperature of 60°C (maximum operating temperature)	$F_{st,60}$	=	15,4 kN
Additional concentrated masses representing the connections of pantograph disconnectors			
– Number of spacers	$n_c$	=	3
– Mass of one connection	$m_c$	=	36 kg
– Mass of one spacer	$m_{cs}$	=	2 kg
– Distances	$l_{s1}$	=	4,2 m
	$l_{s2}$	=	9,5 m
	$l_{s3}$	=	14,2 m
Conventional value of acceleration of gravity	$g$	=	9,81 m/s <sup>2</sup>

Fonte: IEC60865-2

Conforme as Figura 38 e Figura 39, o vão possui três diferentes comprimentos entre espaçadores,  $l_s$ , a IEC considera que se utilize um comprimento médio, entre  $l_{s1}$ ,  $l_{s2}$  e  $l_{s3}$ . Logo,

$$l_s = \frac{l_{s1} + 2l_{s2} + l_{s3}}{4} = \frac{4,2 + 2 \cdot 9,5 + 14,2}{4} = 9,35 \text{ m}$$

A partir da Figura 39, tem-se também que a massa  $m_c$  de uma conexão é 36 kg e a massa  $m_{cs}$  de um espaçador é 2 kg. Logo, a uma massa total de conexões no vão  $m'_s$  é dada por

$$m'_s = 2m_c + m_{cs} = 2.36 + 2 = 74kg$$

Após inserir os dados fornecidos na Figura 39 no arquivo desenvolvido, conforme Figura 40 e clicar no botão “RESULTADOS”, obtêm-se os resultados das Figura 41 e Figura 42. Na sequência, o Quadro 3 apresenta uma comparação entre os resultados obtidos utilizando o arquivo desenvolvido e os resultados da IEC60865-2, onde, o erro máximo encontrado foi no cálculo do fator auxiliar  $\chi$  para a máxima temperatura de operação, apresentando erro de 5% em relação ao valor da IEC. Este erro é visível nos demais fatores dependentes de  $\chi_h$ , inclusive no valor da força depois do curto-circuito, que apresentou diferença de mais de 1kN. Em busca da causa de tamanha diferença, os cálculos foram refeitos a punho e calculadora, onde verificou-se que a diferença vem de um arredondamento feito na IEC no valor de r, a relação entre a força eletromagnética e a força peso. Mostrando mais uma razão para que estes cálculos sejam executados por um programa ou arquivo como este, considerando que ao realizar os cálculos de próprio punho é bastante provável que sejam feitos arredondamentos com consequências significativas, como neste caso.

Figura 40: Dados de entrada – Caso 2

DADOS DE ENTRADA			
n =	2	< Selezione	n° subcondutores em cada fase
Tensão no condutor	Estressado	< Selezione	
I3 $\phi$ =	63	(kA)	Corrente de curto-circuito trifásica simétrica (kA)
I1 $\phi$ =	0	(kA)	Corrente de curto-circuito fase-terra (kA)
Tk =	0.5	(s)	Tempo de duração do curto-circuito (s)
l =	48	(m)	Comprimento do vão (descontar suportes rígidos) (m)
a =	5	(m)	Distância média entre fases (m)
As =	1090	(mm <sup>2</sup> )	Seção do subcondutor (mm <sup>2</sup> )
ms =	3.25	(kg/m)	Massa específica do sub-condutor/unidade de comprimento (kg/m)
Fstl =	17800	(N)	Tração (estática) à temperatura mínima de inverno (kN)
Fsth =	15400	(N)	Tração (estática) à temperatura máxima de operação (kN)
E =	60000	(N/mm <sup>2</sup> )	Módulo de Young (N/mm <sup>2</sup> ) - (1GPa=1000N/mm <sup>2</sup> e 1kgf/mm <sup>2</sup> ≈9,8N/mm <sup>2</sup> )
mc =	74	(kg)	Massa devido às conexões em um condutor (kg)
Cth conhecido?	Não	< Selezione	Constante do material ((10 <sup>-18</sup> ) (m <sup>4</sup> /A <sup>2</sup> s)
Cth tabelado	0.27	Selezione >	Alumínio, ligas de Al e Al-aço com relação de seção transversal Al/aço > 6 < Selezione
S conhecido?	Sim	< Selezione	Constante de mola resultante dos pontos de fixação do vão (kN/m)
S =	500	(kN/m)	Constante de mola resultante de ambos os pontos de fixação do vão (kN/m)
li =	5.3	(m)	Comprimento de uma cadeia de isoladores
f =	50	(Hz)	Frequência de operação (Hz)
d =	43	(mm)	Diâmetro do condutor (mm)
ls =	9.35	(m)	Comprimento entre espaçadores (m)
as =	0.1	(m)	Distância entre subcondutores do bundle (m)
X/R ou k?	k	< Selezione	Relação X/R do condutor ou Fator k (adimensionais)
k =	1.81	-	Fator utilizado no cálculo da corrente de curto (adimensional)

Figura 41: Resultados/Resumo – Caso 2

RESULTADOS/RESUMO					
Ftd =	<b>39.80</b>	(kN)	Força de tração durante o curto-circuito		
Ffd =	<b>69.98</b>	(kN)	Força de tração após o curto-circuito		
Ocorre choque?	<b>Sim</b>				
Fpid =	<b>39.80</b>	(kN)	Esforço entre os subcondutores do feixe, devido ao efeito pinch		
bh =	<b>1.48</b>	(m)	Deslocamento horizontal máximo (flecha)		
amin =	<b>2.03</b>	(m)	Distância mínima entre fases		
Tensões de Projeto	Isoladores/Suportes	<b>69.98</b>	(kN)	Devido a Ffd - força após o curto	
	Conectores/Ancoragens	<b>69.98</b>	(kN)	Devido a Ffd - força após o curto	
	Estruturas/Fundações	<b>69.98</b>	(kN)	Devido a Ffd - força após o curto	

Figura 42: Resultados (etapas de cálculo) – Caso 2

## RESULTADOS (Etapas de Cálculo)

Força eletromagnética (N/m)	F' =	92.78		
Relação Feletro/Fpeso (-)	r =	1.12		
Direção da força resultante sobre o condutor (rad)	$\delta 1$ (rad) =	0.84		
Direção da força resultante sobre o condutor (°)	$\delta 1$ (°) =	48.12		
Flecha estatica (m)	fesl =	1.35	fesh =	1.56
Período das oscilações (s)	Tl =	2.08	Th =	2.24
Período das oscilações durante o curto (s)	Tresl =	1.78	Tresh =	1.91
Valor atual do módulo de Young (N/mm <sup>2</sup> )	Eeffl =	28655.88	Eeffh =	27244.69
Norma da rigidez (1/N)	Nl =	0.00	Nh =	0.00
Fator de stress (-)	$\zeta l$ =	2.04	$\zeta h$ =	3.11
Ângulo de oscilação no final do curto (°)	$\delta endl$ =	57.45	$\delta endh$ =	51.57
Fator auxiliar (-)	$\chi l$ =	0.06	$\chi h$ =	0.13
Ângulo máximo de oscilação (°)	$\delta maxl$ =	96.57	$\delta maxh$ =	96.57
Fator auxiliar (-)	$\varphi l$ =	1.49	$\varphi h$ =	1.49
Fator auxiliar (-)	$\psi l$ =	0.69	$\psi h$ =	0.76
Força de tração durante o curto (N)	Ftdl =	36180.25	Ftdh =	32875.08
Força de tração durante o curto (N)	Ftd (N) =	36180.25		
Expansão elastica (-)	$\epsilon elal$ =	1.06E-03	$\epsilon elah$ =	1.02E-03
Expansão termica (-)	$\epsilon thl$ =	1.00E-04	$\epsilon thh$ =	1.08E-04
Fator de dilatação (-)	CDI =	1.25	CDh =	1.18
Fator de forma (-)	CF =	1.08		
Flecha dinamica (m)	fedl =	1.81	fedh =	1.99
Força de tração após o curto (N)	Ffdl =	66743.50	Ffdh =	69982.78
	Ffd é significativa		Ffd é significativa	
força de tração após o curto (N)	Ffd (N) =	69982.78		
Máximo deslocamento horizontal (m)	bhl =	1.35	bhh =	1.48
Máximo deslocamento horizontal (m)	bh =	1.48		
Distância mínima entre fases (m)	amin =	2.03		
	Fsecolide =	39798.27	colidem efetivamente	

Quadro 3: Comparação dos resultados com a IEC 60865-2 – Caso 2

Parâmetros Calculados	Simb.	Calculado	IEC60865-2	Diferença (módulo)	Erro %
Força eletromagnética (N/m)	F'	92.775	92.80	0.02	0%
Relação Feletro/Fpeso (-)	r	1.115	1.12	0.00	0%
Direção da força resultante sobre o condutor (°)	$\delta 1$	48.123	48.20	0.08	0%

Continuação de Quadro 3

Flecha estática (m)	fesl	1.346	1.35	0.00	0%
	fesh	1.555	1.56	0.00	0%
Período das oscilações (s)	TI	2.081	2.09	0.01	0%
	Th	2.238	2.24	0.00	0%
Período das oscilações durante o curto (s)	Tresl	1.779	1.79	0.01	1%
	Tresh	1.913	1.91	0.00	0%
Valor real do módulo de Young (N/mm <sup>2</sup> )	Eeffl	2.866E+04	2.87E+04	44.12	0%
	Eeffh	2.724E+04	2.72E+04	44.69	0%
Norma da rigidez (1/N)	NI	5.767E-08	5.77E-08	0.00	0%
	Nh	5.850E-08	5.85E-08	0.00	0%
Fator de stress (-)	ζl	2.042	2.04	0.00	0%
	ζh	3.108	3.11	0.00	0%
Ângulo de oscilação no final do curto (°)	δendl	57.451	57.00	0.45	1%
	δendh	51.571	51.80	0.23	0%
Fator auxiliar (-)	χl	0.060	0.06	0.00	2%
	χh	0.126	0.12	0.01	5%
Ângulo máximo de oscilação (°)	δmaxl	96.573	96.50	0.07	0%
	δmaxh	96.573	93.10	3.47	4%
Fator auxiliar (-)	φl	1.494	1.50	0.01	0%
	φh	1.494	1.50	0.01	0%
Fator auxiliar (-)	ψl	0.691	0.69	0.00	0%
	ψh	0.759	0.76	0.00	0%
Força de tração durante o curto (N)	Ftdl	3.62E+04	3.63E+04	119.75	0%
	Ftdh	3.29E+04	3.29E+04	24.92	0%
Força de tração durante o curto (N)	Ftd	3.62E+04	3.63E+04	119.75	0%
Expansão elástica (-)	εelah	1.022E-03	1.02E-03	0.00	0%
Expansão térmica (-)	εthh	1.078E-04	1.08E-04	0.00	0%
Fator de dilatação (-)	CDh	1.185	1.18	0.00	0%
Fator de forma (-)	CF	1.082	1.08	0.00	0%
Flecha dinâmica (m)	fedh	1.993	1.99	0.00	0%
Força de tração após o curto (N)	Ffdl	6.67E+04	6.67E+04	43.50	0%
	Ffdh	7.00E+04	6.88E+04	1182.78	2%
força de tração após o curto (N)	Ffd	7.00E+04	6.88E+04	1182.78	2%
Máximo deslocamento horizontal (m)	bh	1.484	1.48	0.00	0%
Distância mínima entre fases (m)	amin	2.032	2.04	0.01	0%
Força de <i>pinch effect</i> , se colidem (N)	Fsecolide	3.98E+04	3.99E+04	101.73	0%
Subcondutores colidem efetivamente					

### 5.3. Caso 2.1 – Efeitos mecânicos em condutores estressados (*strained*) – Caso 2 com aumento da distância entre os subcondutores

O estudo de caso 2.1 parte do mesmo arranjo dos condutores e dados de entrada do estudo de caso 2, já expostos nas Figura 38 e Figura 39 da Seção 5.2, com alteração apenas da distância  $a_s$  entre os subcondutores do feixe, que passa a ser de 0,4m.

Alterando apenas a distância  $a_s$  no arquivo utilizado no estudo de caso 2, conforme Figura 43, ao clicar no botão “RESULTADOS”, obtêm-se os resultados das Figura 44 e Figura 45. Na sequência, o Quadro 4 apresenta uma comparação entre os resultados obtidos utilizando o arquivo desenvolvido e os resultados da IEC60865-2. Novamente o erro máximo encontrado está no cálculo do fator auxiliar  $\chi$  para a máxima temperatura de operação, apresentando erro de 5% em relação ao valor da IEC, onde verificou-se que a diferença vem de um arredondamento feito na IEC no valor de  $r$ , a relação entre a força eletromagnética e a força peso. Como averiguado no estudo de caso 2, essa diferença mostra mais uma razão para que estes cálculos sejam executados por um programa ou arquivo como este, considerando que ao realizar os cálculos de próprio punho é bastante provável que sejam feitos arredondamentos com consequências significativas, como neste caso.

Figura 43: Dados de entrada – Caso 2.1

DADOS DE ENTRADA			
n =	2	< Selecione	n° subcondutores em cada fase
Tensão no condutor	Estressado	< Selecione	
I3φ =	63	(kA)	Corrente de curto-circuito trifásica simétrica (kA)
I1φ =	0	(kA)	Corrente de curto-circuito fase-terra (kA)
Tk =	0.5	(s)	Tempo de duração do curto-circuito (s)
l =	48	(m)	Comprimento do vão (descontar suportes rígidos) (m)
a =	5	(m)	Distância média entre fases (m)
As =	1090	(mm²)	Seção do subcondutor (mm²)
ms =	3.25	(kg/m)	Massa específica do sub-condutor/unidade de comprimento (kg/m)
Fstl =	17800	(N)	Tração (estática) à temperatura mínima de inverno (kN)
Fsth =	15400	(N)	Tração (estática) à temperatura máxima de operação (kN)
E =	60000	(N/mm²)	Módulo de Young (N/mm²) - (1GPa=1000N/mm² e 1kgf/mm²≈9,8N/mm²)
mc =	74	(kg)	Massa devido às conexões em um condutor (kg)
Cth conhecido?	Não	< Selecione	Constante do material ((10 <sup>-18</sup> ) (m <sup>4</sup> )/A²s)
Cth tabelado	0.27	Selecione >	Alumínio, ligas de Al e Al-aço com relação de seção transversal Al/aço > 6 < Selecione
S conhecido?	Sim	< Selecione	Constante de mola resultante dos pontos de fixação do vão (kN/m)
S =	500	(kN/m)	Constante de mola resultante de ambos os pontos de fixação do vão (kN/m)
li =	5.3	(m)	Comprimento de uma cadeia de isoladores
f =	50	(Hz)	Frequência de operação (Hz)
d =	43	(mm)	Diâmetro do condutor (mm)
ls =	9.35	(m)	Comprimento entre espaçadores (m)
as =	0.4	(m)	Distância entre subcondutores do bundle (m)
X/R ou k?	k	< Selecione	Relação X/R do condutor ou Fator k (adimensionais)
k =	1.81	-	Fator utilizado no cálculo da corrente de curto (adimensional)

Figura 44 : Resultados/Resumo – Caso 2.1

RESULTADOS/RESUMO				
Ftd =	<b>36.18</b>	(kN)	Força de tração durante o curto-circuito	
Ffd =	<b>69.98</b>	(kN)	Força de tração após o curto-circuito	
Ocorre choque?	<b>Não de forma efetiva</b>			
Fv =	<b>41.06</b>	(kN)	Esforço devido ao curto-circuito	
<b>j&gt;=1 (ocorre choque entre os subcondutores do bundle)</b>				
Fpid =	<b>72.61</b>	(kN)	Esforço entre os subcondutores do feixe, devido ao efeito pinch	
bh =	<b>1.48</b>	(m)	Deslocamento horizontal máximo (flecha)	
amin =	<b>2.03</b>	(m)	Distância mínima entre fases	
Tensões de Projeto	Isoladores/Suportes	<b>72.61</b>	(kN)	Devido a Fpid - força causada pelo efeito pinch
	Conectores/Ancoragens	<b>72.61</b>	(kN)	Devido a Fpid - força causada pelo efeito pinch
	Estruturas/Fundações	<b>72.61</b>	(kN)	Devido a Fpid - força causada pelo efeito pinch

Figura 45: Resultados (etapas de cálculo) – Caso 2.1

## RESULTADOS (Etapas de Cálculo)

Força eletromagnética (N/m)	F' =	92.78		
Relação Feleto/Fpeso (-)	r =	1.12		
Direção da força resultante sobre o condutor (rad)	$\delta 1$ (rad) =	0.84		
Direção da força resultante sobre o condutor (°)	$\delta 1$ (°) =	48.12		
Flecha estatica (m)	fesl =	1.35	fesh =	1.56
Período das oscilações (s)	Tl =	2.08	Th =	2.24
Período das oscilações durante o curto (s)	Tresl =	1.78	Tresh =	1.91
Valor atual do módulo de Young (N/mm <sup>2</sup> )	Eeffl =	28655.88	Eeffh =	27244.69
Norma da rigidez (1/N)	Nl =	0.00	Nh =	0.00
Fator de stress (-)	$\zeta$ l =	2.04	$\zeta$ h =	3.11
Ângulo de oscilação no final do curto (°)	$\delta$ endl =	57.45	$\delta$ endh =	51.57
Fator auxiliar (-)	$\chi$ l =	0.06	$\chi$ h =	0.13
Ângulo máximo de oscilação (°)	$\delta$ maxl =	96.57	$\delta$ maxh =	96.57
Fator auxiliar (-)	$\phi$ l =	1.49	$\phi$ h =	1.49
Fator auxiliar (-)	$\psi$ l =	0.69	$\psi$ h =	0.76
Força de tração durante o curto (N)	Ftdl =	36180.25	Ftdh =	32875.08
Força de tração durante o curto (N)	Ftd (N) =	36180.25		
Expansão elastica (-)	$\epsilon$ elal =	1.06E-03	$\epsilon$ elah =	1.02E-03
Expansão termica (-)	$\epsilon$ thl =	1.00E-04	$\epsilon$ thh =	1.08E-04
Fator de dilatação (-)	CDI =	1.25	CDh =	1.18
Fator de forma (-)	CF =	1.08		
Flecha dinamica (m)	fedl =	1.81	fedh =	1.99
Força de tração após o curto (N)	Ffdl =	66743.50	Ffdh =	69982.78
	Ffd é significativa		Ffd é significativa	
força de tração após o curto (N)	Ffd (N) =	69982.78		
Máximo deslocamento horizontal (m)	bhl =	1.35	bhh =	1.48
Máximo deslocamento horizontal (m)	bh =	1.48		
Distância mínima entre fases (m)	amin =	2.03		
	Fsecolide =	0.00	não colidem efetivamente	
Fator auxiliar (-)	v1 =	2.42		
Fator auxiliar (-)	v2 =	2.22		
Fator auxiliar (-)	v3 =	0.25		
Força de corrente de curto (N)	Fv =	41060.91		
Contração do feixe (-)	$\epsilon$ stl =	1.06	$\epsilon$ sth =	0.93
Contração do feixe (-)	$\epsilon$ pil =	31.91	$\epsilon$ pih =	32.37
Configuração do feixe durante o curto (-)	j1 =	3.94	jh =	4.10
	j>=1 (ocorre choque entre os subcondutores do bundle)			
Fator auxiliar (-)	$\xi$ l =	2.86	$\xi$ h =	2.91
Fator auxiliar (-)	v4 =	8.30		
Fator auxiliar (-)	vel =	1.14	veh =	1.12
Força causada pelo pinch effect, se colidem (N)	Fpidl =	72612.70	Fpidh =	69445.15
Força causada pelo pinch effect, se colidem (N)	Fpid (N) =	72612.70	os subcondutores colidem	

Quadro 4: Comparação dos resultados com a IEC 60865-2 – Caso 2.1

Parâmetros Calculados	Simb.	Calculado	IEC60865-2	Diferença (módulo)	Erro %
Força eletromagnética (N/m)	F'	92.775	92.80	0.02	0%
Relação Feletro/Fpeso (-)	r	1.115	1.12	0.00	0%
Direção da força resultante sobre o condutor (°)	$\delta 1$	48.123	48.20	0.08	0%
Flecha estatica (m)	fesl	1.346	1.35	0.00	0%
	fesh	1.555	1.56	0.00	0%
Período das oscilações (s)	Tl	2.081	2.09	0.01	0%
	Th	2.238	2.24	0.00	0%
Período das oscilações durante o curto (s)	Tresl	1.779	1.79	0.01	1%
	Tresh	1.913	1.91	0.00	0%
Valor real do módulo de Young (N/mm <sup>2</sup> )	Eeffl	2.87E+04	2.87E+04	44.12	0%
	Eeffh	2.72E+04	2.72E+04	44.69	0%
Norma da rigidez (1/N)	Nl	5.77E-08	5.77E-08	0.00	0%
	Nh	5.85E-08	5.85E-08	0.00	0%
Fator de stress (-)	$\zeta l$	2.042	2.04	0.00	0%
	$\zeta h$	3.108	3.11	0.00	0%
Ângulo de oscilação no final do curto (°)	$\delta endl$	57.451	57.00	0.45	1%
	$\delta endh$	51.571	51.80	0.23	0%
Fator auxiliar (-)	$\chi l$	0.060	0.06	0.00	2%
	$\chi h$	0.126	0.12	0.01	5%
Ângulo máximo de oscilação (°)	$\delta maxl$	96.573	96.50	0.07	0%
	$\delta maxh$	96.573	93.10	3.47	4%
Fator auxiliar (-)	$\varphi l$	1.494	1.50	0.01	0%
	$\varphi h$	1.494	1.50	0.01	0%
Fator auxiliar (-)	$\psi l$	0.691	0.69	0.00	0%
	$\psi h$	0.759	0.76	0.00	0%
Força de tração durante o curto (N)	Ftdl	3.62E+04	3.63E+04	119.75	0%
	Ftdh	3.29E+04	3.29E+04	24.92	0%
Força de tração durante o curto (N)	Ftd	3.62E+04	3.63E+04	119.75	0%
Expansão elastica (-)	$\epsilon elah$	1.022E-03	1.02E-03	0.00	0%
Expansão termica (-)	$\epsilon ethh$	1.078E-04	1.08E-04	0.00	0%
Fator de dilatação (-)	CDh	1.185	1.18	0.00	0%
Fator de forma (-)	CF	1.082	1.08	0.00	0%
Flecha dinamica (m)	fedh	1.993	1.99	0.00	0%
Força de tração após o curto (N)	Ffdl	6.67E+04	6.67E+04	43.50	0%
	Ffdh	7.00E+04	6.88E+04	1182.78	2%
força de tração após o curto (N)	Ffd	7.00E+04	6.88E+04	1182.78	2%
Máximo deslocamento horizontal (m)	bh	1.484	1.48	0.00	0%
Distância mínima entre fases (m)	amin	2.032	2.04	0.01	0%

Continuação de Quadro 4

Fator auxiliar (-)	v1	2.418	2.42	0.00	0%
Fator auxiliar (-)	v2	2.217	2.22	0.00	0%
Fator auxiliar (-)	v3	0.250	0.25	0.00	0%
Força de corrente de curto (N)	Fv	4.11E+04	4.12E+04	139.09	0%
Contração do feixe (-)	estl	1.056	1.06	0.00	0%
	esth	0.927	0.93	0.00	0%
Contração do feixe (-)	epil	31.908	32.00	0.09	0%
	epih	32.367	32.50	0.13	0%
Configuração do feixe durante o curto (-)	jl	3.939	3.94	0.00	0%
	jh	4.098	4.11	0.01	0%
Fator auxiliar (-)	$\xi$ l	2.856	2.86	0.00	0%
	$\xi$ h	2.906	2.91	0.00	0%
Fator auxiliar (-)	v4	8.302	8.30	0.00	0%
Fator auxiliar (-)	vel	1.139	1.14	0.00	0%
	veh	1.120	1.12	0.00	0%
Força causada pelo <i>pinch</i> effect (N)	Fpidl	7.26E+04	7.26E+04	12.70	0%
	Fpidh	6.94E+04	6.95E+04	54.85	0%
Força causada pelo <i>pinch</i> effect (N)	Fpid (N)	7.26E+04	7.26E+04	12.70	0%
os subcondutores colidem					

## 6. Conclusão

A constante expansão do sistema elétrico, com a inserção de novas unidades geradoras aumentando os níveis de curto-circuito, faz com que seja necessário que se confirmem os cálculos estruturais de subestações com barramentos flexíveis, considerando que o projeto destas, quando feito, deve ter negligenciado os efeitos das correntes de curto-circuito, até porque, os níveis de curto-circuito eram significativamente mais baixos, e por consequência os esforços causados pelas correntes de curto-circuito seriam irrelevantes frente aos esforços comumente calculados.

Devido aos elevados coeficientes de segurança normalmente utilizados, e considerando a rara ocorrência de curtos-circuitos com valor igual ao previsto, é possível que os primeiros grandes problemas relacionados a esforços mecânicos causados por correntes de curto-circuito levem anos para ocorrer, porém, se nunca forem considerados para um correto dimensionamento, vão vir a ocorrer, já que os níveis de curto-circuito devem seguir aumentando. Por outro lado, é também necessário estudar o projeto de reatores e dispositivos que diminuam ou amenizem essas elevadas correntes.

O objetivo do trabalho foi atingido, onde foi desenvolvido um arquivo que reproduza os cálculos dos efeitos mecânicos em barramentos flexíveis dispostos horizontalmente, causados por correntes de curto-circuito. O arquivo foi desenvolvido e testado de acordo com os exemplos da norma, como mostra o capítulo 5, comprovando seu funcionamento e permitindo ao usuário uma análise rápida e eficiente dos esforços causados pelas correntes de curto-circuito, assim, o usuário além dos cálculos habituais, rapidamente utiliza o arquivo tornando seu projeto estrutural mais confiável.

Como sugestão para trabalhos futuros e melhorias, fica a adição dos códigos para o cálculo nos cabos de conexão entre equipamentos e o barramento (*droppers*) desta mesma norma [1] além de pesquisa sobre o cálculo das forças em *jumpers* e espaçadores (sujeitos a forças maiores durante a força de efeito *pinch*).

## 7. Referências

- [1] IEC 60865-1, “**Short-circuit currents – Calculation of effects – Part 1: Definitions and calculation methods,**” International Electrotechnical Commission, Geneva, 2011.
- [2] CIGRE-105 1996. **The mechanical effects of short-circuit currents in open-air substations (Rigid and flexible bus-bars).** Paris: CIGRÉ, technical brochure N°105. 2 volumes (180 paginas).
- [3] Manuzio C. 1967. **An investigation of forces on bundle conductor spacers under fault conditions.** IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems, **Vol. 86**, N°2, 1967, pp166-185.
- [4] INSTITUTE OF ELETRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **Bare Overhead Transmission and Distribution Conductor Design Overview.** IEE Conference Paper, 1995.
- [5] SHORT, T.A. **Electric Power Distribution Handbook.** CRC Press, Boca Raton, Florida, USA: 2004
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR07271 – **Cabos de Alumínio com Alma de Aço para Linhas Aéreas.** 1988
- [7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR07271 – **Cabos de Alumínio para Linhas Aéreas.** 1988
- [8] JESUS, E. S. M. - **Desenvolvimento de “Software” Educativo para o Dimensionamento de Subestações** – Dissertação de Mestrado- Universidade do Porto – Portugal- 2014

[9] F. M. Yusop, M. K. M. Jamil, D. Ishak, M. Husaini e S. Masri, “**Investigation of Electromagnetic Force During Short-Circuit Test in Three-Phase Busbar System,**” em IEEE Colloquium on Humanities, Science and Engineering Research, Penang, 2011.

[10] F. M. Yusop, M. K. M. Jamil, D. Ishak e S. Masri, “**Study on the Electromagnetic Force Affected by Short-Circuit Current in Vertical and Horizontal Arrangement of Busbar System,**” em International Conference on Electrical, Control and Computer Engineering, Pahang, Malaysia, 2011.

[11] International Council on Large Electric Systems, “**The Mechanical Effects of Short-Circuit Currents in Open Air Substations (PART II),**” CIGRÉ, 2002.

[12] M. Abd-El-Aziz, M. N. F. Nashed, A. Adly e E. Abou-El-Zahab, “**Electromagnetic Forces Densities for 3 Phase Busbar Parallel Connected to Rectifier Load,**” em The International Conference on Advanced Power System Automation and Protection, 2011.

[13] D. Simpson, “**The Use of Compression Technology on Busbars,**” em 79th EESA Conference, Sydney Australia, 2003.

[14]” **SHORT-CIRCUIT DESIGN FORCES IN POWER LINES AND SUBSTATIONS**” encontrado em [www.tdee.ulg.ac.be/userfiles/file/cours\\_effets\\_CC.doc](http://www.tdee.ulg.ac.be/userfiles/file/cours_effets_CC.doc) - acesso em 15/07/2017

[15] CEI 865-1, “**Short-circuit currents- Calculation of effects,**” CEI, Geneve, 1994.

[16] DUAILIBE, P. **Subestações : Tipos , Equipamentos e Proteção. Consultoria para Uso Eficiente de Energia,** p. 1–85, 1999.

[17] Leite, A. O, Corrêa, D. A, Baciuk, F. L, Lorençon, F. “**SOFTWARE PARA VERIFICAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO DE BARRAMENTOS QUANTO A ESFORÇOS TÉRMICOS E MECÂNICOS DEVIDO A CORRENTE DE CURTO**

**CIRCUITO**” Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná – Projeto Final de Graduação – Curitiba - 2004

[18] FONSECA, C. M. – **Dimensionamento de barramento em subestações – Projeto de Diplomação** – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre - 2009

[19] SILVA, R.F. - **COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA OS ESFORÇOS DEVIDOS A CURTO-CIRCUITO EM BARRAMENTOS FLEXÍVEIS A PARTIR DA UTILIZAÇÃO DAS NORMAS NBR 5422 E NBR 6123** – Trabalho Final de Graduação - UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ – Itajubá – 2015.

[20] BEER, Ferdinand Pierre, JONHSTON, E. Russel, **Resistência dos Materiais**. São Paulo: McGraw-Hill, 1989,1982.

[21] DIB, Wanderley Mauro, **Projetos de Quadros de Baixa e Média Tensão**, Informativo Técnico vol. XXII - Siemens.

[22] ANEEL- **AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA** – <http://www.aneel.gov.br/> - Acesso em 15/07/2017.

[23] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS - **Guide for Bus Design in Air Insulated Substations** -New York -IEEE Srd 605<sup>TM</sup>-2008- 247 pages

[24] IEC 60865-2 1994. *Short-circuit currents - Calculation of effects. Part 2: Examples of calculation*. Genève: IEC, 1994.

[25] CIGRE-214 2002. *The mechanical effects of short-circuit currents in open-air substations (Rigid and flexible bus-bars) (Part II)* CIGRÉ, technical brochure N°214. 2 volumes (200 pages).

[26] IEC 60909 1988. *Short-circuit current calculation in three-phase a. c. systems*. Geneva: IEC, 1988

[27] GENERAL CABLE - **CABO DE ALUMÍNIO REFORÇADO COM LIGA DE ALUMÍNIO (ACAR)** – Catálogo de cabos condutores

[28] Catálogo de espaçadores amortecedor preformado – encontrado em “<http://www.plp.com.br/site/transmissao-catalogo/item/53-espador-amortecedor-preformado>” - acesso em 15/07/2017.

[29] Cappellari, T. T. O. – “**Determinação da Resposta Dinâmica de Feixes de Condutores em Linhas Aéreas de Transmissão**” Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre – 2005.

[30] CREDER, Hélio, **Instalações Elétricas**. Rio de Janeiro: Editora LTC, 1995.

13ª Edição.

## Apêndice I – Código

'Codigo do arquivo .xlsm para calculo de esforços em condutores flexíveis causados por correntes de curto-circuito, conforme equações da IEC 60865-1

'contato para envio (gratuito) do arquivo: [isaschreinerheck@gmail.com](mailto:isaschreinerheck@gmail.com)

'

---

```

Private Sub Worksheet_Change(ByVal Target As Range)
If Target.Address = "$D$4" Then
    testar_n
ElseIf Target.Address = "$D$5" Then
    testar_stress
ElseIf Target.Address = "$D$17" Then
    testar_Cth
ElseIf Target.Address = "$D$20" Then
    testar_S
ElseIf Target.Address = "$D$29" Then
    testar_XRouk
ElseIf Target.Address = "$C$44" Then
    testar_amin
End If
    Dim KeyCells As Range
    Set KeyCells = Range("D4:D30")
    If Not Application.Intersect(KeyCells, Range(Target.Address)) _
        Is Nothing Then
        se_entrada_vazia_marcar_colorido
    End If
End Sub
Sub limpar_dados_de_entrada()
Plan1.Rows("4:30").EntireRow.Hidden = False
Range("D4:D30").ClearContents
Range("F19").ClearContents
End Sub
Sub limpar_resultados()

Plan1.Rows("35:100").EntireRow.Hidden = False

Range("C37:C44").ClearContents
Range("D45:D47").ClearContents
Range("F45:F47").ClearContents
Range("C44").Interior.ColorIndex = 50
Range("E44").Value = "Distância mínima entre fases"

Range("H50:H97").ClearContents

```

```

Range("J50:J97").ClearContents
Range("G73").ClearContents
Range("I73").ClearContents
Range("I78").ClearContents
Range("G87").ClearContents
Range("I92").ClearContents
Range("I97").ClearContents
End Sub
Sub testar_n()
If Range("D4").Value = 1 Then
    Plan1.Rows("25:30").EntireRow.Hidden = True
End If
If Range("D4").Value > 1 Then
    Plan1.Rows("25:30").EntireRow.Hidden = False
End If
End Sub
Sub testar_stress()
If Range("D5").Value = "Estressado" Then
    Plan1.Rows("24:24").EntireRow.Hidden = False
End If
If Range("D5").Value = "Desestressado" Then
    Plan1.Rows("24:24").EntireRow.Hidden = True
End If
End Sub
Sub testar_Cth()
If Range("D17").Value = " " Then
    Plan1.Rows("18:19").EntireRow.Hidden = True
End If
If Range("D17").Value = "Sim" Then
    Plan1.Rows("18:18").EntireRow.Hidden = False
    Plan1.Rows("19:19").EntireRow.Hidden = True
End If
If Range("D17").Value = "Não" Then
    Range("F19").ClearContents
    Plan1.Rows("18:18").EntireRow.Hidden = True
    Plan1.Rows("19:19").EntireRow.Hidden = False
End If
End Sub
Sub testar_S()
If Range("D20").Value = " " Then
    Plan1.Rows("21:22").EntireRow.Hidden = True
End If
If Range("D20").Value = "Sim" Then
    Plan1.Rows("21:21").EntireRow.Hidden = False

```

```

    Plan1.Rows("22:22").EntireRow.Hidden = True
    Plan1.Rows("23:23").EntireRow.Hidden = True
End If
If Range("D20").Value = "Não" Then
    Plan1.Rows("21:21").EntireRow.Hidden = True
    Plan1.Rows("22:22").EntireRow.Hidden = False
    Plan1.Rows("23:23").EntireRow.Hidden = False
End If
End Sub
Sub testar_XRouk()
If Range("D29").Value = "X/R" Then
    Plan1.Range("C30").Value = "X/R ="
    Plan1.Range("F30").Value = "Relação X/R do condutor (adimensional)"
End If
If Range("D29").Value = "k" Then
    Plan1.Range("C30").Value = "k ="
    Plan1.Range("F30").Value = "Fator utilizado no cálculo da corrente de curto
(adimensional)"
End If
End Sub
Sub testar_amin()
If Range("C44").Value < 0 Then
    Range("C44").Interior.ColorIndex = 44
    Range("E44").Value = "AUMENTAR A DISTÂNCIA ENTRE FASES! Fases
colidem! (amin = a - 2.bh)"
ElseIf Range("C44").Value >= Range("D10").Value Then
    Range("C44").Interior.ColorIndex = 44
    Range("E44").Value = "AUMENTAR A DISTÂNCIA ENTRE FASES (amin = a
- 2.bh)"
Else
    Range("C44").Interior.ColorIndex = 50
    Range("E44").Value = "Distância mínima entre fases"
End If
End Sub

Sub se_entrada_vazia_marcar_colorido()
i = 1
Do While i <= 26
If Cells(4 + i, 4).Value = "" Then
Cells(4 + i, 4).Interior.ColorIndex = 44
Else
Cells(4 + i, 4).Interior.ColorIndex = 16
End If
i = i + 1

```

```

Loop
i = 0
If Plan1.Range("D4").Value = "" Then
Range("D4").Interior.ColorIndex = 44
Range("E4").Interior.ColorIndex = 44
Else
Range("D4").Interior.ColorIndex = 16
Range("E4").Interior.ColorIndex = 15
End If
If Plan1.Range("D5").Value = "" Then
Range("D5").Interior.ColorIndex = 44
Range("E5").Interior.ColorIndex = 44
Else
Range("D5").Interior.ColorIndex = 16
Range("E5").Interior.ColorIndex = 15
End If
If Plan1.Range("D17").Value = "" Then
Range("D17").Interior.ColorIndex = 44
Range("E17").Interior.ColorIndex = 44
Else
Range("D17").Interior.ColorIndex = 16
Range("E17").Interior.ColorIndex = 15
End If
If Plan1.Range("D20").Value = "" Then
Range("D20").Interior.ColorIndex = 44
Range("E20").Interior.ColorIndex = 44
Else
Range("D20").Interior.ColorIndex = 16
Range("E20").Interior.ColorIndex = 15
End If
If Plan1.Range("D29").Value = "" Then
Range("D29").Interior.ColorIndex = 44
Range("E29").Interior.ColorIndex = 44
Else
Range("D29").Interior.ColorIndex = 16
Range("E29").Interior.ColorIndex = 15
End If
If Plan1.Range("D17").Value = "Não" Then mat1 = 1
If Plan1.Range("F19").Value = "" Then mat2 = 1
mat = mat1 + mat2
  If mat = 2 Then
    Range("E19").Interior.ColorIndex = 44
    Range("F19").Interior.ColorIndex = 44
    Range("D19").Interior.ColorIndex = 16
  
```

```

Else
Range("E19").Interior.ColorIndex = 15
Range("F19").Interior.ColorIndex = 15
Range("D19").Interior.ColorIndex = 16
End If
If Plan1.Range("F19").Value <> "" Then Range("F19").Interior.ColorIndex = 15

If Plan1.Range("D20").Value = "Não" Then mate1 = 1
If Plan1.Range("D23").Value = "" Then mate2 = 1
mate = mate1 + mate2
  If mate = 2 Then
    Range("D23").Interior.ColorIndex = 44
    Range("D22").Interior.ColorIndex = 16
  Else
    Range("D23").Interior.ColorIndex = 16
    Range("D22").Interior.ColorIndex = 16
  End If
End Sub

Sub esforcos_em_barramentos_flexiveis_causados_por_correntes_de_curto()
Dim XR, Ik3i, Ik1i, Tk, f, n, Di, As_area, l, li, ls, A, as_dist, Fstli, Fsthi, tetab, tetae,
M, Ei, testeCth, Cthi, mc, testeS, si As Double

Plan1.Rows("34:200").EntireRow.Hidden = False

n = Cells(4, 4).Value 'numero de subcondutores por fase
testestress = Cells(5, 4).Value
Ik3i = Cells(6, 4).Value 'corrente de curto circuito trifasico (kA)"
Ik1i = Cells(7, 4).Value 'corrente de curto circuito monofasico (kA)
Tk = Cells(8, 4).Value 'tempo de duracao do curto circuito (s)
l = Cells(9, 4).Value 'comprimento do vao (m)
A = Cells(10, 4).Value 'distancia media entre fases (m)
As_areai = Cells(11, 4).Value 'area da seção de um subcondutor (mm^2)
M = Cells(12, 4).Value 'massa especifica do subcondutor por unidade de
comprimento (kg/m)
Fstl = Cells(13, 4).Value 'tracao (estatica) a temperatura mínima - inverno (kN)
Fsth = Cells(14, 4).Value 'tracao (estatica) a temperatura maxima - operação(kN)
Ei = Cells(15, 4).Value 'modulo de Young (N/mm^2)
mc = Cells(16, 4).Value 'massa devido as conexoes em um condutor (kg)
testeCth = Cells(17, 4).Value 'constante do material*10^-18 m^4/A^2 s
testeS = Cells(20, 4).Value 'constante de mola resultante de ambos pontos de
fixação do vão
li = Cells(24, 4).Value 'comprimento da cadeia de isoladores (m)
f = Cells(25, 4).Value 'frequencia (Hz)

```

$D_i = \text{Cells}(26, 4).Value$  'diametro do condutor (mm)  
 $l_s = \text{Cells}(27, 4).Value$  'comprimento entre espaçadores (m)  
 $as\_dist = \text{Cells}(28, 4).Value$  'distancia entre subcondutores do bundle (m)  
 $testeXR = \text{Cells}(29, 4).Value$  'relacao X/R ou k  
 $XRouk = \text{Cells}(30, 4).Value$  'relacao X/R ou k

$I_{k3} = I_{k3i} * 1000$  'converter para A  
 $I_{k1} = I_{k1i} * 1000$  'converter para A  
 $As\_area = As\_areai * (10)^{-6}$  'converter para  $m^2$   
 $E = E_i * (10)^6$  'Converter para  $N/m^2$   
 $D = D_i / 1000$  'Converter para metro

$Pi = \text{WorksheetFunction.Pi}$   
 $M_o = 4 * Pi * (10)^{-7}$  'constante magnetica - permeabilidade no vacuo  
 $g = 9.81$  'constante universal da gravidade

$l_c$  é o comprimento do cabo do condutor no vão  
 If testestress = "Desestressado" Then  
      $l_c = l$   
 ElseIf testestress = "Estressado" Then  
      $l_c = l - 2 * l_i$   
 End If

$ms$  é a massa total de um subcondutor por unidade de comprimento  
 $ms = M + mc / (n * l_c)$

$\sigma_{afin} = 50000000$  ( $N/m^2$ )  $\sigma_{afin}$  é o valor mais baixo do estresse do cabo quando o modulo de Young se torna constante

$C_{th}$  é uma constante do material  $(10^{-18})(m^4)/(A^2.s)$   
 If testeCth = "Sim" Then  
      $C_{thi} = \text{Cells}(18, 4).Value$   
 ElseIf testeCth = "Não" Then  
      $C_{th1} = 0.27$   
      $C_{th2} = 0.17$   
      $C_{th3} = 0.088$   
     If Range("F19").Value = "Alumínio, ligas de Al e Al-aço com relação de seção transversal Al/aço > 6" Then  
         Range("D19").Value =  $C_{th1}$   
          $C_{thi} = C_{th1}$   
     ElseIf Range("F19").Value = "Alumínio-aço com relação de seção transversal Al/aço <= 6" Then  
         Range("D19").Value =  $C_{th2}$   
          $C_{thi} = C_{th2}$

```

ElseIf Range("F19").Value = "Cobre" Then
    Range("D19").Value = Cth3
    Cthi = Cth3
End If
End If
Cth = Cthi * (10) ^ (-18)

'S é a constante de mola resultante de ambos pontos de fixação do vão
If testeS = "Sim" Then
    si = Cells(21, 4).Value
ElseIf testeS = "Não" Then
    ss1 = 100
    ss2 = 150
    ss3 = 500
    ss4 = 500
    ss5 = 600
    If Range("D23").Value = "Até 69kV" Then
        si = ss1
        Range("D22").Value = ss1
    ElseIf Range("D23").Value = "138kV" Then
        si = ss2
        Range("D22").Value = ss2
    ElseIf Range("D23").Value = "230kV" Then
        si = ss3
        Range("D22").Value = ss3
    ElseIf Range("D23").Value = "380kV" Then
        si = ss4
        Range("D22").Value = ss4
    ElseIf Range("D23").Value = "420kV" Then
        si = ss5
        Range("D22").Value = ss5
    End If
End If
s = si * 1000

If testeXR = "k" Then
    k = XRouk
End If
If testeXR = "X/R" Then
    XR = XRouk
End If

```

'Flinha é a carga eletromagnética característica no condutor, por unidade de comprimento, considerando condutores flexíveis e sistemas trifásicos

'considerando que a corrente flui ao longo de toda a extensão do condutor

$$\text{Flinha} = (\text{Mo} / (2 * \text{Pi})) * 0.75 * (((\text{Ik3}) ^ 2) / \text{A}) * (\text{lc} / \text{l})$$

'r é a relação entre a força eletromagnética no curto e a força peso do condutor

$$r = \text{Flinha} / (\text{n} * \text{ms} * \text{g})$$

'delta1 é a direção da força resultante exercida sobre o condutor

$$\text{delta1} = \text{Atn}(r)$$

$$\text{delta1emgraus} = \text{delta1} * 180 / \text{Pi}$$

'flecha\_estatica\_equivalente do condutor no vao medio

$$\text{fesl} = (\text{n} * \text{ms} * \text{g} * (\text{l}) ^ 2) / (8 * \text{Fstl})$$

$$\text{fesh} = (\text{n} * \text{ms} * \text{g} * (\text{l}) ^ 2) / (8 * \text{Fsth})$$

'T é o periodo das oscilacoes do condutor, aplica-se para pequenos angulos sem fluxo de corrente no condutor

$$\text{Tl} = 2 * \text{Pi} * \text{Sqr}(0.8 * \text{fesl} / \text{g})$$

$$\text{Th} = 2 * \text{Pi} * \text{Sqr}(0.8 * \text{fesh} / \text{g})$$

'Tres é o periodo resultante da oscilacao do condutor durante o fluxo de corrente de curto

$$\text{Tresl} = \text{Tl} / (((1 + (r) ^ 2) ^ (1 / 4)) * (1 - (((\text{Pi}) ^ 2) / 64) * ((\text{delta1emgraus} / 90) ^ 2))))$$

$$\text{Tresh} = \text{Th} / (((1 + (r) ^ 2) ^ (1 / 4)) * (1 - (((\text{Pi}) ^ 2) / 64) * ((\text{delta1emgraus} / 90) ^ 2))))$$

'Eeff é o valor do modulo de Young

If (Fstl / (n \* As\_area)) <= sigmafin Then

$$\text{Eeffl} = \text{E} * (0.3 + 0.7 * \text{Sin}(\text{Fstl} * (\text{Pi} / 2) / (\text{n} * \text{As\_area} * \text{sigmafin})))$$

End If

If (Fstl / (n \* As\_area)) > sigmafin Then

$$\text{Eeffl} = \text{E}$$

End If

If (Fsth / (n \* As\_area)) <= sigmafin Then

$$\text{Eeffh} = \text{E} * (0.3 + 0.7 * \text{Sin}(\text{Fsth} * (\text{Pi} / 2) / (\text{n} * \text{As\_area} * \text{sigmafin})))$$

End If

If (Fsth / (n \* As\_area)) > sigmafin Then

$$\text{Eeffh} = \text{E}$$

End If

'N é a norma da rigidez do condutor

$$Nl = (1 / (s * l)) + (1 / (n * Eeffl * As\_area))$$

$$Nh = (1 / (s * l)) + (1 / (n * Eeffh * As\_area))$$

'zeta é o fator de stress do condutor

$$zetal = ((n * ms * g * l) ^ 2) / (24 * ((Fstl) ^ 3) * Nl)$$

$$zetah = ((n * ms * g * l) ^ 2) / (24 * ((Fsth) ^ 3) * Nh)$$

'deltaend é o angulo de oscilacao no final do fluxo da corrente de curto

teste, se a duração do curto Tk for maior que 0,4\*T (período), utiliza-se  
Tk=0,4\*T

```
If Tl < Th Then Tmenor = Tl
If Th < Tl Then Tmenor = Th
t = 0.4 * Tmenor
If Tk > t Then Tk = Tmenor
```

```
If 0 <= (Tk / Tresl) <= 0.5 Then
  deltaendl = delta1emgraus * (1 - Cos((2 * Pi) * Tk / Tresl))
End If
If (Tk / Tresl) > 0.5 Then
  deltaendl = 2 * delta1emgraus
End If
If 0 <= (Tk / Tresh) <= 0.5 Then
  deltaendh = delta1emgraus * (1 - Cos((2 * Pi) * Tk / Tresh))
End If
If (Tk / Tresh) > 0.5 Then
  deltaendh = 2 * delta1emgraus
End If
```

'qui é um fator auxiliar para o calculo do deltamax

```
If 0 <= deltaendl <= 90 Then
  quil = 1 - r * Sin(deltaendl * Pi / 180)
End If
If deltaendl > 90 Then
  quil = 1 - r
End If
If 0 <= deltaendh <= 90 Then
  quih = 1 - r * Sin(deltaendh * Pi / 180)
End If
If deltaendh > 90 Then
  quih = 1 - r
End If
```

'deltamax é o angulo maximo de oscilacao do vao considerando o pior caso (duracao do curto igual ou inferior ao Tk estabelecido)

If quil < -0.985 Then deltamaxl = 180

If 0.766 < quil Then q1 = 1

If quil <= 1 Then q2 = 1

q3 = q1 + q2

If q3 = 2 Then deltamaxl = 1.25 \* (180 / Pi) \*

Application.WorksheetFunction.Acos(quil)

If -0.985 <= quil Then q4 = 1

If quil <= 0.766 Then q5 = 1

q6 = q4 + q5

If q6 = 2 Then deltamaxl = 10 + (180 / Pi) \*

Application.WorksheetFunction.Acos(quil)

If quih < -0.985 Then deltamaxh = 180

If 0.766 < quih Then q7 = 1

If quih <= 1 Then q8 = 1

q9 = q7 + q8

If q9 = 2 Then deltamaxh = 1.25 \* (180 / Pi) \*

Application.WorksheetFunction.Acos(quil)

If -0.985 <= quih Then q10 = 1

If quih <= 0.766 Then q11 = 1

q12 = q10 + q11

If q12 = 2 Then deltamaxh = 10 + (180 / Pi) \*

Application.WorksheetFunction.Acos(quil)

'fi é um fator auxiliar para o calculo de Ftd

If Tk >= (Tresl / 4) Then fil = 3 \* (Sqr(1 + (r) ^ 2) - 1)

If Tk < (Tresl / 4) Then fil = 3 \* (r \* Sin(deltaendl) + Cos(deltaendl) - 1)

If Tk >= (Tresh / 4) Then fih = 3 \* (Sqr(1 + (r) ^ 2) - 1)

If Tk < (Tresh / 4) Then fih = 3 \* (r \* Sin(deltaendh) + Cos(deltaendh) - 1)

'psi é um fator auxiliar para o calculo de Ftd

'psil

AA = (fil) ^ 2

BB = fil \* (2 + zetal)

CC = 1 + (2 \* zetal)

DD = -zetal \* (2 + fil)

AM = BB / AA

BM = CC / AA

CM = DD / AA

p = BM - (AM \* AM) / 3

q = CM - AM \* BM / 3 + 2 \* AM \* AM \* AM / 27

DM = q \* q / 4 + p \* p \* p / 27

Pi = 3.14159265358979

If DM < 0 Then

```

M = Sqr(-DM)
r = Sqr(((q ^ 2) / 4) + M ^ 2)
X = -q / (2 * r)
t = Atn(-X / Sqr(-X * X + 1)) + 2 * Atn(1)
r1 = 2 * (r ^ (1 / 3)) * Math.Cos(t / 3) - AM / 3
psil = r1
Else
    u3 = (-q / 2) + Sqr(DM)
    If u3 < 0 Then
        U = -((-u3) ^ (1 / 3))
        Else: U = (u3) ^ (1 / 3)
    End If
    v3 = (-q / 2) - Math.Sqr(DM)
    If v3 < 0 Then
        v = -((-v3) ^ (1 / 3))
        Else: v = v3 ^ (1 / 3)
    End If
    r1 = U + v - (AM / 3)
    r1 = Math.Round(r1 * 100000000#) / 100000000#
psil = r1
End If
'psih
AA = (fih) ^ 2
BB = fih * (2 + zetah)
CC = 1 + (2 * zetah)
DD = -zetah * (2 + fih)
AM = BB / AA
BM = CC / AA
CM = DD / AA
p = BM - (AM * AM) / 3
q = CM - AM * BM / 3 + 2 * AM * AM * AM / 27
DM = q * q / 4 + p * p * p / 27
Pi = 3.14159265358979
If DM < 0 Then
    M = Sqr(-DM)
    r = Sqr(((q ^ 2) / 4) + M ^ 2)
    X = -q / (2 * r)
    t = Atn(-X / Sqr(-X * X + 1)) + 2 * Atn(1)
    r1 = 2 * (r ^ (1 / 3)) * Math.Cos(t / 3) - AM / 3
    psih = r1
    Else
        u3 = (-q / 2) + Sqr(DM)
        If u3 < 0 Then
            U = -((-u3) ^ (1 / 3))

```

```

        Else: U = (u3) ^ (1 / 3)
    End If
    v3 = (-q / 2) - Math.Sqrt(DM)
    If v3 < 0 Then
        v = -((-v3) ^ (1 / 3))
    Else: v = v3 ^ (1 / 3)
    End If
    r1 = U + v - (AM / 3)
    r1 = Math.Round(r1 * 1000000000#) / 1000000000#
    psih = r1
End If

```

---

'Ftd é a força de tração durante o curto causada pelo balanço (sem droppers no vão)

```

    Ftdl = Fstl * (1 + fil * psil)
    Ftdh = Fsth * (1 + fih * psih)
    If Ftdl > Ftdh Then
        Ftd = Ftdl
    Else: Ftd = Ftdh
    End If

```

'Eela é a expansao elastica

```

    Eelal = NI * (Ftdl - Fstl)
    Eelah = Nh * (Ftdh - Fsth)

```

'Eth é a expansão termica

```

    If Tk >= (Tresl / 4) Then Ethl = Cth * ((Ik3 / (n * As_area)) ^ 2) * (Tresl / 4)
    If Tk < (Tresl / 4) Then Ethl = Cth * ((Ik3 / (n * As_area)) ^ 2) * Tk
    If Tk >= (Tresh / 4) Then Ethh = Cth * ((Ik3 / (n * As_area)) ^ 2) * (Tresh / 4)
    If Tk < (Tresh / 4) Then Ethh = Cth * ((Ik3 / (n * As_area)) ^ 2) * Tk

```

'CD fator de dilatacao

```

    CDl = Sqr(1 + (3 / 8) * ((1 / fesl) ^ 2) * (Eelal + Ethl))
    CDh = Sqr(1 + (3 / 8) * ((1 / fesh) ^ 2) * (Eelah + Ethh))

```

'CF fator de forma

```

    If r <= 0.8 Then CF = 1.05
    If 0.8 <= r < 1.8 Then CF = 0.97 + 0.1 * r
    If r >= 1.8 Then CF = 1.15

```

'fed é a flecha dinamica

```

    fedl = CF * CDl * fesl
    fedh = CF * CDh * fesh

```

```

'Ffd é a força de tração apos o curto causada pela queda
'testar se a força de tração apos o curto é significativa
If r > 0.6 Then teste1 = 1
If deltamaxl >= 70 Then Teste2 = 1
If deltamaxh >= 70 Then teste3 = 1
testel = teste1 + Teste2
testeh = teste1 + teste3
If testel = 2 Then
    Ffdl = 1.2 * Fstl * Sqr(1 + 8 * zetal * (deltamaxl / 180))
    Cells(73, 7).Value = "Ffd é significativa"
Else:
    Ffdl = 0
    Cells(73, 7).Value = "Ffd não é significativa"
End If
If testeh = 2 Then
    Ffdh = 1.2 * Fsth * Sqr(1 + 8 * zetah * (deltamaxh / 180))
    Cells(73, 9).Value = "Ffd é significativa"
Else
    Ffdh = 0
    Cells(73, 9).Value = "Ffd não é significativa"
End If
' End If
If Ffdl > Ffdh Then
    Ffd = Ffdl
Else: Ffd = Ffdh
End If

'bh é o maximo deslocamento horizontal no vao medio, devido ao curto
If testestress = "Desestressado" Then
    If deltamaxl >= 90 Then bhl = fedl
    If deltamaxl < 90 Then bhl = fedl * Sin(deltamaxl * Pi / 180)
    If deltamaxh >= 90 Then bhh = fedh
    If deltamaxh < 90 Then bhh = fedh * Sin(deltamaxh * Pi / 180)
ElseIf testestress = "Estressado" Then
    If deltamaxl >= delta1emgraus Then bhl = fedl * Sin(delta1)
    If deltamaxl < delta1emgraus Then bhl = fedl * Sin(deltamaxl * Pi / 180)
    If deltamaxh >= delta1emgraus Then bhh = fedh * Sin(delta1)
    If deltamaxh < delta1emgraus Then bhh = fedh * Sin(deltamaxh * Pi / 180)
End If

If bhl > bhh Then
    bh = bhl
Else: bh = bhh

```

End If

'amin é a distancia minima entre dois condutores durante o curto

$$amin = A - 2 * bh$$

Cells(50, 8).Value = Flinha

Cells(51, 8).Value = r

Cells(52, 8).Value = delta1

Cells(53, 8).Value = delta1emgraus

Cells(54, 8).Value = fesl

Cells(54, 10).Value = fesh

Cells(55, 8).Value = Tl

Cells(55, 10).Value = Th

Cells(56, 8).Value = Tresl

Cells(56, 10).Value = Tresh

Cells(57, 8).Value = Eeffl / 1000000

Cells(57, 10).Value = Eeffh / 1000000

Cells(58, 8).Value = Nl

Cells(58, 10).Value = Nh

Cells(59, 8).Value = zetal

Cells(59, 10).Value = zetah

Cells(60, 8).Value = deltaendl

Cells(60, 10).Value = deltaendh

Cells(61, 8).Value = quil

Cells(61, 10).Value = quih

Cells(62, 8).Value = deltamaxl

Cells(62, 10).Value = deltamaxh

Cells(63, 8).Value = fil

Cells(63, 10).Value = fih

Cells(64, 8).Value = psil

Cells(64, 10).Value = psih

Cells(65, 8).Value = Ftdl

Cells(65, 10).Value = Ftdh

Cells(66, 8).Value = Ftd

Cells(67, 8).Value = Eelal

Cells(67, 10).Value = Eelah

Cells(68, 8).Value = Ethl

Cells(68, 10).Value = Ethh

Cells(69, 8).Value = CDl

Cells(69, 10).Value = CDh

Cells(70, 8).Value = CF

Cells(71, 8).Value = fedl

Cells(71, 10).Value = fedh

Cells(72, 8).Value = Ffdl

```

Cells(72, 10).Value = Ffdh
Cells(74, 8).Value = Ffd
Cells(75, 8).Value = bhl
Cells(75, 10).Value = bhh
Cells(76, 8).Value = bh
Cells(77, 8).Value = amin

```

---

```

'feixe de condutores (bundle) - até 4 subcondutores por fase
If n = 1 Then
Plan1.Rows("78:97").EntireRow.Hidden = True
'saidas
Ftd = Ftd / 1000
Ffd = Ffd / 1000
Cells(37, 3).Value = Ftd
If Cells(73, 7).Value = "Ffd é significativa" Then
    Cells(38, 3).Value = Ffd
Else
    Rows("38:38").EntireRow.Hidden = True
End If
Rows("39:42").EntireRow.Hidden = True
Cells(43, 3).Value = bh
Cells(44, 3).Value = amin
If Ftd > Ffd Then
    Fsuports = Ftd
    Cells(45, 6).Value = "Devido a Ftd - força durante o curto"
ElseIf Ftd < Ffd Then
    Fsuports = Ffd
    Cells(45, 6).Value = "Devido a Ffd - força após o curto"
ElseIf Ftd = Ffd Then
    Fsuports = Ftd
    Cells(45, 6).Value = "As forças Ftd(durante) e Ffd(após) o curto são iguais"
End If
Cells(45, 4).Value = Fsuports
Ftdclamp = 1.5 * Ftd
If Ftdclamp > Ffd Then
    Fclamp = Ftdclamp
    Cells(46, 6).Value = "Devido a Ftd - força durante o curto"
ElseIf Ftdclamp < Ffd Then
    Fclamp = Ffd
    Cells(46, 6).Value = "Devido a Ffd - força após o curto"
ElseIf Ftdclamp = Ffd Then
    Fclamp = Ftdclamp
    Cells(46, 6).Value = "As forças Ftd(durante) e Ffd(após) o curto são iguais"

```

```

End If
Cells(46, 4).Value = Fclamp
If Ftd > Ffd Then
    Ffoundations = Ftd
    Cells(47, 6).Value = "Devido a Ftd - força durante o curto"
    ElseIf Ftd < Ffd Then
        Ffoundations = Ffd
        Cells(47, 6).Value = "Devido a Ffd - força após o curto"
    ElseIf Ftd = Ffd Then
        Ffoundations = Ftd
        Cells(47, 6).Value = "As forças Ftd(durante) e Ffd(após) o curto são iguais"
    End If
    Cells(47, 4).Value = Ffoundations
Exit Sub
End If

If n > 1 Then

Ftd = 1.1 * Ftd

'avaluar se os subcondutores colidem efetivamente
    If (as_dist / D) <= 2 Then aux1 = 1
    If ls >= 50 * as_dist Then aux2 = 1
    If (as_dist / D) <= 2.5 Then auxi1 = 1
    If ls >= 70 * as_dist Then auxi2 = 1
    aux = aux1 + aux2
    auxi = auxi1 + auxi2
    If aux = 2 Or auxi = 2 Then
        Ftd = Ftd / 1000
        Ffd = Ffd / 1000
        Fpid = Fpid / 1000
        Fpid = Ftd
        Cells(78, 8).Value = Fpid * 1000
        Cells(78, 9).Value = "colidem efetivamente"
        'saidas/resumo
        Cells(37, 3).Value = Ftd / 1.1
        If Cells(73, 7).Value = "Ffd é significativa" Then
            Cells(38, 3).Value = Ffd
        Else
            Rows("38:38").EntireRow.Hidden = True
        End If
        Cells(39, 3).Value = "Sim"
        Rows("40:41").EntireRow.Hidden = True
        Cells(42, 3).Value = Fpid

```

```

Cells(43, 3).Value = bh
Cells(44, 3).Value = amin
  If Ftd >= Ffd Then Fs1 = 1
  If Ftd >= Fpid Then Fs2 = 1
  If Fs1 + Fs2 = 2 Then
    Fsuports = Ftd
    Cells(45, 6).Value = "Devido a Ftd - força durante o curto"
  End If
  If Ffd >= Ftd Then Fs3 = 1
  If Ffd >= Fpid Then Fs4 = 1
  If Fs3 + Fs4 = 2 Then
    Fsuports = Ffd
    Cells(45, 6).Value = "Devido a Ffd - força após o curto"
  End If
  If Fpid >= Ftd Then Fs5 = 1
  If Fpid >= Ffd Then Fs6 = 1
  If Fs5 + Fs6 = 2 Then
    Fsuports = Fpid
    Cells(45, 6).Value = "Devido a Fpid - força causada pelo efeito pinch"
  End If
  If Ftd = Ffd Then Fs7 = 1
  If Ftd = Fpid Then Fs8 = 1
  If Fs7 + Fs8 = 2 Then
    Fsuports = Ftd
    Cells(45, 6).Value = "As forças Ftd(durante), Ffd(após) e Fpid(pinch) são
iguais"
  End If
Cells(45, 4).Value = Fsuports
Ftdcon = 1.5 * Ftd

  If Ftdcon >= Ffd Then Fs1 = 1
  If Ftdcon >= Fpid Then Fs2 = 1
  If Fs1 + Fs2 = 2 Then
    Fconnectors = Ftdcon
    Cells(46, 6).Value = "Devido a Ftd - força durante o curto"
  End If
  If Ffd >= Ftdcon Then Fs3 = 1
  If Ffd >= Fpid Then Fs4 = 1
  If Fs3 + Fs4 = 2 Then
    Fconnectors = Ffd
    Cells(46, 6).Value = "Devido a Ffd - força após o curto"
  End If
  If Fpid >= Ftdcon Then Fs5 = 1
  If Fpid >= Ffd Then Fs6 = 1

```

```

If Fs5 + Fs6 = 2 Then
  Fconnectors = Fpid
  Cells(46, 6).Value = "Devido a Fpid - força causada pelo efeito pinch"
End If
If Ftdcon = Ffd Then Fs7 = 1
If Ftdcon = Fpid Then Fs8 = 1
If Fs7 + Fs8 = 2 Then
  Fconnectors = Ftd
  Cells(46, 6).Value = "As forças Ftd(durante), Ffd(após) e Fpid(pinch) são
iguais"
End If
Cells(46, 4).Value = Fconnectors

If Ftd >= Ffd Then Fs1 = 1
If Ftd >= Fpid Then Fs2 = 1
If Fs1 + Fs2 = 2 Then
  Ffoundations = Ftd
  Cells(47, 6).Value = "Devido a Ftd - força durante o curto"
End If
If Ffd >= Ftd Then Fs3 = 1
If Ffd >= Fpid Then Fs4 = 1
If Fs3 + Fs4 = 2 Then
  Ffoundations = Ffd
  Cells(47, 6).Value = "Devido a Ffd - força após o curto"
End If
If Fpid >= Ftd Then Fs5 = 1
If Fpid >= Ffd Then Fs6 = 1
If Fs5 + Fs6 = 2 Then
  Ffoundations = Fpid
  Cells(47, 6).Value = "Devido a Fpid - força causada pelo efeito pinch"
End If
If Ftd = Ffd Then Fs7 = 1
If Ftd = Fpid Then Fs8 = 1
If Fs7 + Fs8 = 2 Then
  Ffoundations = Ftd
  Cells(47, 6).Value = "As forças Ftd(durante), Ffd(após) e Fpid(pinch) são
iguais"
End If
Cells(47, 4).Value = Ffoundations
End If
If aux = 2 Or auxi = 2 Then
  Plan1.Rows("79:97").EntireRow.Hidden = True
  Exit Sub
End If

```

If aux <> 2 And auxi <> 2 Then

Cells(78, 8).Value = 0

Cells(78, 9).Value = "não colidem efetivamente"

End If

If Ik3 > Ik1 Then

Ik = Ik3

Else: Ik = Ik1

End If

'se nao colidem efetivamente, avaliar os fatores abaixo

'v1 = fator auxiliar

$$v1 = f * (1 / (\sin(\pi / n))) * \sqrt{((as\_dist - D) * M) / ((Mo / (2 * \pi)) * ((Ik / n)^2 * ((n - 1) / as\_dist)))}$$

'v2 = fator auxiliar

If Cells(29, 4).Value = "k" Then k = Cells(30, 4).Value

If Cells(29, 4).Value = "X/R" Then k = 1.02 + 0.98 \* Exp(-3 / XR)

tau = -1 / ((2 \* Pi \* f / 3) \* Log((k - 1.02) / 0.98))

gama = (Atn(2 \* Pi \* f \* tau)) \*(180 / Pi)

i = 1

v2 = 0.4

dif = 1

ftpi = v1 / (Sqr(v2))

isa1 = ((Sin((4 \* Pi \* ftpi) - (2 \* gama)) + Sin(2 \* gama)) / (4 \* Pi \* ftpi))

isa2 = ((f \* tau / ftpi) \* (1 - Exp((-2 \* ftpi) / (f \* tau))) \* (Sin(gama) ^ 2))

isa3 = ((8 \* Pi \* f \* tau \* Sin(gama)) / (1 + ((2 \* Pi \* f \* tau) ^ 2)))

isa4 = (2 \* Pi \* f \* tau \* (Cos(2 \* Pi \* ftpi - gama)) / (2 \* Pi \* ftpi))

isa5 = (Sin(2 \* Pi \* ftpi - gama) / (2 \* Pi \* ftpi))

isa6 = Exp(-ftpi / (f \* tau))

isa7 = ((Sin(gama) - 2 \* Pi \* f \* tau \* Cos(gama)) / (2 \* Pi \* ftpi))

v22 = 1 - isa1 + isa2 - (isa3 \* (((isa4 + isa5) \* isa6) + isa7))

Do While dif > 0.01

v2 = v22

ftpi = v1 / (Sqr(v2))

isa1 = ((Sin(4 \* Pi \* ftpi - 2 \* gama) + Sin(2 \* gama)) / (4 \* Pi \* ftpi))

isa2 = ((f \* tau / ftpi) \* (1 - Exp((-2 \* ftpi) / (f \* tau))) \* (Sin(gama) ^ 2))

isa3 = ((8 \* Pi \* f \* tau \* Sin(gama)) / (1 + ((2 \* Pi \* f \* tau) ^ 2)))

isa4 = (2 \* Pi \* f \* tau \* (Cos(2 \* Pi \* ftpi - gama)) / (2 \* Pi \* ftpi))

isa5 = (Sin(2 \* Pi \* ftpi - gama) / (2 \* Pi \* ftpi))

isa6 = Exp(-ftpi / (f \* tau))

isa7 = ((Sin(gama) - 2 \* Pi \* f \* tau \* Cos(gama)) / (2 \* Pi \* ftpi))

v2 = 1 - isa1 + isa2 - (isa3 \* (((isa4 + isa5) \* isa6) + isa7))

ftpi = v1 / (Sqr(v2))

```

isa1 = ((Sin(4 * Pi * ftpi - 2 * gama) + Sin(2 * gama)) / (4 * Pi * ftpi))
isa2 = ((f * tau / ftpi) * (1 - Exp((-2 * ftpi) / (f * tau))) * (Sin(gama) ^ 2))
isa3 = ((8 * Pi * f * tau * Sin(gama)) / (1 + ((2 * Pi * f * tau) ^ 2)))
isa4 = (2 * Pi * f * tau * (Cos(2 * Pi * ftpi - gama)) / (2 * Pi * ftpi))
isa5 = (Sin(2 * Pi * ftpi - gama) / (2 * Pi * ftpi))
isa6 = Exp(-ftpi / (f * tau))
isa7 = ((Sin(gama) - 2 * Pi * f * tau * Cos(gama)) / (2 * Pi * ftpi))
v22 = 1 - isa1 + isa2 - (isa3 * (((isa4 + isa5) * isa6) + isa7))
dif = Abs(v2 - v22)
i = i + 1
Loop
v2 = v22

```

'v3 = fator auxiliar

```

v3 = ((D / as_dist) / (Sin(Pi / n))) * ((Sqr((as_dist / D) - 1)) / (Atn((Sqr((as_dist /
D) - 1))))))

```

'Fv é a força de corrente de curto

```

FVi = (n - 1) * (Mo / (2 * Pi)) * ((Ik3 / n) ^ 2) * (ls / as_dist) * (v2 / v3)

```

'Fpid é a força de tração causada pelo pinch effect (compressao dos subcondutores do bundle)

```

Fpid = 1.1 * Ftd

```

'contração do feixe

```

Estl = ((1.5 * Fstl * ((ls) ^ 2) * NI) / ((as_dist - D) ^ 2)) * ((Sin(Pi / n)) ^ 2)

```

```

Esth = ((1.5 * Fsth * ((ls) ^ 2) * Nh) / ((as_dist - D) ^ 2)) * ((Sin(Pi / n)) ^ 2)

```

```

Epil = ((0.375 * n * FVi * ((ls) ^ 3) * NI) / ((as_dist - D) ^ 3)) * ((Sin(Pi / n)) ^ 3)

```

```

Epih = ((0.375 * n * FVi * ((ls) ^ 3) * Nh) / ((as_dist - D) ^ 3)) * ((Sin(Pi / n)) ^ 3)

```

'j é o parâmetro que determina a configuração do feixe durante o fluxo de corrente de curto

```

j1 = Sqr(Epil / (1 + Estl))

```

```

j2 = Sqr(Epih / (1 + Esth))

```

```

If j1 >= 1 Then j1 = 1

```

```

If j2 >= 1 Then j2 = 1

```

```

j = j1 + j2

```

If j = 2 Then Cells(87, 7).Value = "j>=1 (ocorre choque entre os subcondutores do bundle)"

If j <> 2 Then Cells(87, 7).Value = "j<1 (não ocorre choque entre os subcondutores do bundle)"

```

Cells(79, 8).Value = v1

```

```

Cells(80, 8).Value = v2

```

```

Cells(81, 8).Value = v3

```

```

Cells(82, 8).Value = FVi
If Cells(78, 8).Value = 0 Then
    Rows("83:83").EntireRow.Hidden = True
Else
    Cells(83, 8).Value = Fpid
End If
Cells(84, 8).Value = Estl
Cells(84, 10).Value = Esth
Cells(85, 8).Value = Epil
Cells(85, 10).Value = Epih
Cells(86, 8).Value = jl
Cells(86, 10).Value = jh

    If j = 2 Then 'j >=1 ..colide
'csi é um fator auxiliar para calcular Fpid quando os subcondutores colidem
'csil
    A1 = 1
    B1 = Estl
    C1 = 0
    D1 = (-((jl) ^ 2) * (1 + Estl))
    AM = B1 / A1
    BM = C1 / A1
    CM = D1 / A1
    p = BM - (AM * AM) / 3
    q = CM - AM * BM / 3 + 2 * AM * AM * AM / 27
    DM = q * q / 4 + p * p * p / 27
    Pi = 3.14159265358979
    If DM < 0 Then
        M = Sqr(-DM)
        r = Sqr(((q ^ 2) / 4) + M ^ 2)
        X = -q / (2 * r)
        t = Atn(-X / Sqr(-X * X + 1)) + 2 * Atn(1)
        r1 = 2 * (r ^ (1 / 3)) * Math.Cos(t / 3) - AM / 3
        csil = r1
    Else
        u3 = (-q / 2) + Sqr(DM)
        If u3 < 0 Then
            U = -((-u3) ^ (1 / 3))
            Else: U = (u3) ^ (1 / 3)
        End If
        v3 = (-q / 2) - Math.Sqr(DM)
        If v3 < 0 Then
            v = -((-v3) ^ (1 / 3))
            Else: v = v3 ^ (1 / 3)
    End If

```

```

        End If
        r1 = U + v - (AM / 3)
        r1 = Math.Round(r1 * 1000000000#) / 1000000000#
        csih = r1
    End If
'csih
    A1 = 1
    B1 = Esth
    C1 = 0
    D1 = -((jh) ^ 2) * (1 + Esth))
    AM = B1 / A1
    BM = C1 / A1
    CM = D1 / A1
    p = BM - (AM * AM) / 3
    q = CM - AM * BM / 3 + 2 * AM * AM * AM / 27
    DM = q * q / 4 + p * p * p / 27
    Pi = 3.14159265358979
    If DM < 0 Then
        M = Sqr(-DM)
        r = Sqr(((q ^ 2) / 4) + M ^ 2)
        X = -q / (2 * r)
        t = Atn(-X / Sqr(-X * X + 1)) + 2 * Atn(1)
        r1 = 2 * (r ^ (1 / 3)) * Math.Cos(t / 3) - AM / 3
        csih = r1
    Else
        u3 = (-q / 2) + Sqr(DM)
        If u3 < 0 Then
            U = -((-u3) ^ (1 / 3))
        Else: U = (u3) ^ (1 / 3)
        End If
        v3 = (-q / 2) - Math.Sqr(DM)
        If v3 < 0 Then
            v = -((-v3) ^ (1 / 3))
        Else: v = v3 ^ (1 / 3)
        End If
        r1 = U + v - (AM / 3)
        r1 = Math.Round(r1 * 1000000000#) / 1000000000#
        csih = r1
    End If

```

'v4 é fator auxiliar

$$v4 = (as\_dist - D) / D$$

've é fator auxiliar

$$\text{vel} = (1 / 2) + \text{Sqr}(((9 / 8) * n * (n - 1) * (\text{Mo} / (2 * \text{Pi})) * ((\text{Ik} / n) ^ 2) * \text{NI} * \text{v2} * ((\text{ls} / (\text{as\_dist} - \text{D})) ^ 4) * (((\text{Sin}(\text{Pi} / n)) ^ 4) / ((\text{csil}) ^ 3)) * (1 - (\text{Atn}(\text{Sqr}(\text{v4}))) / (\text{Sqr}(\text{v4}))) - 1 / 4))$$

$$\text{veh} = (1 / 2) + \text{Sqr}(((9 / 8) * n * (n - 1) * (\text{Mo} / (2 * \text{Pi})) * ((\text{Ik} / n) ^ 2) * \text{Nh} * \text{v2} * ((\text{ls} / (\text{as\_dist} - \text{D})) ^ 4) * (((\text{Sin}(\text{Pi} / n)) ^ 4) / ((\text{csih}) ^ 3)) * (1 - (\text{Atn}(\text{Sqr}(\text{v4}))) / (\text{Sqr}(\text{v4}))) - 1 / 4))$$

'Fpid é a força causada pelo pinch effect

Fpidl = Fstl \* (1 + (vel \* csil / Estl))

Fpidh = Fsth \* (1 + (veh \* csih / Esth))

If Fpidl > Fpidh Then

Fpid = Fpidl

Else: Fpid = Fpidh

End If

Cells(88, 8).Value = csil

Cells(88, 10).Value = csih

Cells(89, 8).Value = v4

Cells(90, 8).Value = vel

Cells(90, 10).Value = veh

Cells(91, 8).Value = Fpidl

Cells(91, 10).Value = Fpidh

Cells(92, 8).Value = Fpid

Cells(92, 9).Value = "os subcondutores colidem"

'saidas/resumo

Ftd = Ftd / 1000

Ffd = Ffd / 1000

Fpid = Fpid / 1000

Cells(37, 3).Value = Ftd / 1.1

If Cells(73, 7).Value = "Ffd é significativa" Then

Cells(38, 3).Value = Ffd

Else

Rows("38:38").EntireRow.Hidden = True

End If

Cells(39, 3).Value = "Não de forma efetiva"

Cells(40, 3).Value = FVi / 1000

Cells(41, 3).Value = Cells(87, 7).Value

Cells(42, 3).Value = Fpid

Cells(43, 3).Value = bh

Cells(44, 3).Value = amin

If Ftd >= Ffd Then Fs1 = 1

If Ftd >= Fpid Then Fs2 = 1

If Fs1 + Fs2 = 2 Then

```

    Fsuports = Ftd
    Cells(45, 6).Value = "Devido a Ftd - força durante o curto"
End If
If Ffd >= Ftd Then Fs3 = 1
If Ffd >= Fpid Then Fs4 = 1
If Fs3 + Fs4 = 2 Then
    Fsuports = Ffd
    Cells(45, 6).Value = "Devido a Ffd - força após o curto"
End If
If Fpid >= Ftd Then Fs5 = 1
If Fpid >= Ffd Then Fs6 = 1
If Fs5 + Fs6 = 2 Then
    Fsuports = Fpid
    Cells(45, 6).Value = "Devido a Fpid - força causada pelo efeito pinch"
End If
If Ftd = Ffd Then Fs7 = 1
If Ftd = Fpid Then Fs8 = 1
If Fs7 + Fs8 = 2 Then
    Fsuports = Ftd
    Cells(45, 6).Value = "As forças Ftd(durante), Ffd(após) e Fpid(pinch) são
iguais"
End If
Cells(45, 4).Value = Fsuports
Ftdcon = 1.5 * Ftd

If Ftdcon >= Ffd Then Fs1 = 1
If Ftdcon >= Fpid Then Fs2 = 1
If Fs1 + Fs2 = 2 Then
    Fconnectors = Ftdcon
    Cells(46, 6).Value = "Devido a Ftd - força durante o curto"
End If
If Ffd >= Ftdcon Then Fs3 = 1
If Ffd >= Fpid Then Fs4 = 1
If Fs3 + Fs4 = 2 Then
    Fconnectors = Ffd
    Cells(46, 6).Value = "Devido a Ffd - força após o curto"
End If
If Fpid >= Ftdcon Then Fs5 = 1
If Fpid >= Ffd Then Fs6 = 1
If Fs5 + Fs6 = 2 Then
    Fconnectors = Fpid
    Cells(46, 6).Value = "Devido a Fpid - força causada pelo efeito pinch"
End If
If Ftdcon = Ffd Then Fs7 = 1

```

```

If Ftdcon = Fpid Then Fs8 = 1
If Fs7 + Fs8 = 2 Then
    Fconnectors = Ftd
    Cells(46, 6).Value = "As forças Ftd(durante), Ffd(após) e Fpid(pinch) são
iguais"
End If
Cells(46, 4).Value = Fconnectors

If Ftd >= Ffd Then Fs1 = 1
If Ftd >= Fpid Then Fs2 = 1
If Fs1 + Fs2 = 2 Then
    Ffoundations = Ftd
    Cells(47, 6).Value = "Devido a Ftd - força durante o curto"
End If
If Ffd >= Ftd Then Fs3 = 1
If Ffd >= Fpid Then Fs4 = 1
If Fs3 + Fs4 = 2 Then
    Ffoundations = Ffd
    Cells(47, 6).Value = "Devido a Ffd - força após o curto"
End If
If Fpid >= Ftd Then Fs5 = 1
If Fpid >= Ffd Then Fs6 = 1
If Fs5 + Fs6 = 2 Then
    Ffoundations = Fpid
    Cells(47, 6).Value = "Devido a Fpid - força causada pelo efeito pinch"
End If
If Ftd = Ffd Then Fs7 = 1
If Ftd = Fpid Then Fs8 = 1
If Fs7 + Fs8 = 2 Then
    Ffoundations = Ftd
    Cells(47, 6).Value = "As forças Ftd(durante), Ffd(após) e Fpid(pinch) são
iguais"
End If
Cells(47, 4).Value = Ffoundations
Plan1.Rows("93:97").EntireRow.Hidden = True
Exit Sub
End If

If j <> 2 Then 'jmenorque1naocolide
'ni é um fator auxiliar para calcular Fpid quando os subcondutores não colidem
'nil
i = 1
nil = 0.01
dif = 1

```

```

YA = (1 - nil * (1 - (D / as_dist)))
ASW = (YA / Sin(Pi / n)) * (Sqr((1 - YA) / YA)) / Atn(Sqr((1 - YA) / YA))
fnil = v3 / ASW
AA = 1
BB = 0
CC = Estl
DD = -((jl) ^ 2) * (1 + Estl) * fnil
AM = BB / AA
BM = CC / AA
CM = DD / AA
p = BM - (AM * AM) / 3
q = CM - AM * BM / 3 + 2 * AM * AM * AM / 27
DM = q * q / 4 + p * p * p / 27
Pi = 3.14159265358979
If DM < 0 Then
  M = Sqr(-DM)
  r = Sqr(((q ^ 2) / 4) + M ^ 2)
  X = -q / (2 * r)
  t = Atn(-X / Sqr(-X * X + 1)) + 2 * Atn(1)
  r1 = 2 * (r ^ (1 / 3)) * Math.Cos(t / 3) - AM / 3
  nil = r1
Else
  u3 = (-q / 2) + Sqr(DM)
  If u3 < 0 Then
    U = -((-u3) ^ (1 / 3))
  Else: U = (u3) ^ (1 / 3)
  End If
  vv3 = (-q / 2) - Math.Sqr(DM)
  If vv3 < 0 Then
    v = -((-vv3) ^ (1 / 3))
  Else: v = vv3 ^ (1 / 3)
  End If
  r1 = U + v - (AM / 3)
  r1 = Math.Round(r1 * 100000000#) / 100000000#
End If
nil = r1
Do While dif > 0.1
'calcula uma vez e chama r1 de nil1
YA = (1 - nil * (1 - (D / as_dist)))
ASW = (YA / Sin(Pi / n)) * (Sqr((1 - YA) / YA)) / Atn(Sqr((1 - YA) / YA))
fnil = v3 / ASW
AA = 1
BB = 0
CC = Estl

```

```

DD = -((jl) ^ 2) * (1 + Estl) * fnil
AM = BB / AA
BM = CC / AA
CM = DD / AA
p = BM - (AM * AM) / 3
q = CM - AM * BM / 3 + 2 * AM * AM * AM / 27
DM = q * q / 4 + p * p * p / 27
Pi = 3.14159265358979
If DM < 0 Then
  M = Sqr(-DM)
  r = Sqr(((q ^ 2) / 4) + M ^ 2)
  X = -q / (2 * r)
  t = Atn(-X / Sqr(-X * X + 1)) + 2 * Atn(1)
  r1 = 2 * (r ^ (1 / 3)) * Math.Cos(t / 3) - AM / 3
  nil1 = r1
Else
  u3 = (-q / 2) + Sqr(DM)
  If u3 < 0 Then
    U = -((-u3) ^ (1 / 3))
  Else: U = (u3) ^ (1 / 3)
  End If
  vv3 = (-q / 2) - Math.Sqr(DM)
  If vv3 < 0 Then
    v = -((-vv3) ^ (1 / 3))
  Else: v = vv3 ^ (1 / 3)
  End If
  r1 = U + v - (AM / 3)
  r1 = Math.Round(r1 * 100000000#) / 100000000#
End If
nil1 = r1
'calcula mais uma vez e chama r1 de nil2
nil = nil1
YA = (1 - nil * (1 - (D / as_dist)))
ASW = (YA / Sin(Pi / n)) * (Sqr((1 - YA) / YA)) / Atn(Sqr((1 - YA) / YA))
fnil = v3 / ASW
AA = 1
BB = 0
CC = Estl
DD = -((jl) ^ 2) * (1 + Estl) * fnil
AM = BB / AA
BM = CC / AA
CM = DD / AA
p = BM - (AM * AM) / 3
q = CM - AM * BM / 3 + 2 * AM * AM * AM / 27

```

```

DM = q * q / 4 + p * p * p / 27
Pi = 3.14159265358979
If DM < 0 Then
  M = Sqr(-DM)
  r = Sqr(((q ^ 2) / 4) + M ^ 2)
  X = -q / (2 * r)
  t = Atn(-X / Sqr(-X * X + 1)) + 2 * Atn(1)
  r1 = 2 * (r ^ (1 / 3)) * Math.Cos(t / 3) - AM / 3
  nil2 = r1
Else
  u3 = (-q / 2) + Sqr(DM)
  If u3 < 0 Then
    U = -((-u3) ^ (1 / 3))
    Else: U = (u3) ^ (1 / 3)
  End If
  vv3 = (-q / 2) - Math.Sqr(DM)
  If vv3 < 0 Then
    v = -((-vv3) ^ (1 / 3))
    Else: v = vv3 ^ (1 / 3)
  End If
  r1 = U + v - (AM / 3)
  r1 = Math.Round(r1 * 1000000000#) / 1000000000#
End If
nil2 = r1
dif = Abs(nil2 - nil1)
i = i + 1
nil = nil2
Loop

'nih
i = 1
nih = 0.01
dif = 1
YA = (1 - nih * (1 - (D / as_dist)))
ASW = (YA / Sin(Pi / n)) * (Sqr((1 - YA) / YA)) / Atn(Sqr((1 - YA) / YA))
fnih = v3 / ASW
AA = 1
BB = 0
CC = Esth
DD = -((jh) ^ 2) * (1 + Esth) * fnih
AM = BB / AA
BM = CC / AA
CM = DD / AA
p = BM - (AM * AM) / 3

```

```

q = CM - AM * BM / 3 + 2 * AM * AM * AM / 27
DM = q * q / 4 + p * p * p / 27
Pi = 3.14159265358979
If DM < 0 Then
  M = Sqr(-DM)
  r = Sqr(((q ^ 2) / 4) + M ^ 2)
  X = -q / (2 * r)
  t = Atn(-X / Sqr(-X * X + 1)) + 2 * Atn(1)
  r1 = 2 * (r ^ (1 / 3)) * Math.Cos(t / 3) - AM / 3
  nih = r1
Else
  u3 = (-q / 2) + Sqr(DM)
  If u3 < 0 Then
    U = -((-u3) ^ (1 / 3))
  Else: U = (u3) ^ (1 / 3)
  End If
  vv3 = (-q / 2) - Math.Sqr(DM)
  If vv3 < 0 Then
    v = -((-vv3) ^ (1 / 3))
  Else: v = vv3 ^ (1 / 3)
  End If
  r1 = U + v - (AM / 3)
  r1 = Math.Round(r1 * 100000000#) / 100000000#
End If
nih = r1
Do While dif > 0.1
'calcula uma vez e chama r1 de nih1
YA = (1 - nih * (1 - (D / as_dist)))
ASW = (YA / Sin(Pi / n)) * (Sqr((1 - YA) / YA)) / Atn(Sqr((1 - YA) / YA))
fnih = v3 / ASW
AA = 1
BB = 0
CC = Esth
DD = -((jh) ^ 2) * (1 + Esth) * fnih
AM = BB / AA
BM = CC / AA
CM = DD / AA
p = BM - (AM * AM) / 3
q = CM - AM * BM / 3 + 2 * AM * AM * AM / 27
DM = q * q / 4 + p * p * p / 27
Pi = 3.14159265358979
If DM < 0 Then
  M = Sqr(-DM)
  r = Sqr(((q ^ 2) / 4) + M ^ 2)

```

```

X = -q / (2 * r)
t = Atn(-X / Sqr(-X * X + 1)) + 2 * Atn(1)
r1 = 2 * (r ^ (1 / 3)) * Math.Cos(t / 3) - AM / 3
nih1 = r1
Else
  u3 = (-q / 2) + Sqr(DM)
  If u3 < 0 Then
    U = -((-u3) ^ (1 / 3))
  Else: U = (u3) ^ (1 / 3)
  End If
  vv3 = (-q / 2) - Math.Sqr(DM)
  If vv3 < 0 Then
    v = -((-vv3) ^ (1 / 3))
  Else: v = vv3 ^ (1 / 3)
  End If
  r1 = U + v - (AM / 3)
  r1 = Math.Round(r1 * 100000000#) / 100000000#
End If
nih1 = r1
'calcula mais uma vez e chama r1 de nih2
nih = nih1
YA = (1 - nih * (1 - (D / as_dist)))
ASW = (YA / Sin(Pi / n)) * (Sqr((1 - YA) / YA)) / Atn(Sqr((1 - YA) / YA))
fnih = v3 / ASW
AA = 1
BB = 0
CC = Esth
DD = -((jh) ^ 2) * (1 + Esth) * fnih
AM = BB / AA
BM = CC / AA
CM = DD / AA
p = BM - (AM * AM) / 3
q = CM - AM * BM / 3 + 2 * AM * AM * AM / 27
DM = q * q / 4 + p * p * p / 27
Pi = 3.14159265358979
If DM < 0 Then
  M = Sqr(-DM)
  r = Sqr(((q ^ 2) / 4) + M ^ 2)
  X = -q / (2 * r)
  t = Atn(-X / Sqr(-X * X + 1)) + 2 * Atn(1)
  r1 = 2 * (r ^ (1 / 3)) * Math.Cos(t / 3) - AM / 3
  nih2 = r1
Else
  u3 = (-q / 2) + Sqr(DM)

```

```

    If u3 < 0 Then
        U = -((-u3) ^ (1 / 3))
    Else: U = (u3) ^ (1 / 3)
    End If
    vv3 = (-q / 2) - Math.Sqrt(DM)
    If vv3 < 0 Then
        v = -((-vv3) ^ (1 / 3))
    Else: v = vv3 ^ (1 / 3)
    End If
    r1 = U + v - (AM / 3)
    r1 = Math.Round(r1 * 1000000000#) / 1000000000#
End If
nih2 = r1
dif = Abs(nil2 - nil1)
i = i + 1
nih = nih2
Loop

v4l = nil * (as_dist - D) / (as_dist - nil * (as_dist - D))
v4h = nih * (as_dist - D) / (as_dist - nih * (as_dist - D))

vel = (1 / 2) + Sqr(((9 / 8) * n * (n - 1) * (Mo / (2 * Pi)) * ((Ik / n) ^ 2) * NI * v2 *
((ls / (as_dist - D)) ^ 4) * (((Sin(Pi / n)) ^ 4) / ((nil) ^ 4)) * (1 - (Atn(Sqr(v4l))) / (Sqr(v4l))) - 1
/ 4))
veh = (1 / 2) + Sqr(((9 / 8) * n * (n - 1) * (Mo / (2 * Pi)) * ((Ik / n) ^ 2) * Nh * v2 *
((ls / (as_dist - D)) ^ 4) * (((Sin(Pi / n)) ^ 4) / ((nih) ^ 4)) * (1 - (Atn(Sqr(v4h))) / (Sqr(v4h))) -
1 / 4))

Fpidl = Fstl * (1 + (vel / Estl) * (nil) ^ 2)
Fpidh = Fsth * (1 + (veh / Esth) * (nih) ^ 2)
If Fpidl > Fpidh Then
    Fpid = Fpidl
Else: Fpid = Fpidh
End If

Cells(87, 7).Value = "j<1 (não ocorre choque entre os subcondutores do bundle)"
Cells(93, 8).Value = nil
Cells(93, 10).Value = nih
Cells(94, 8).Value = v4l
Cells(94, 10).Value = v4h
Cells(95, 8).Value = vel
Cells(95, 10).Value = veh
Cells(96, 8).Value = Fpidl
Cells(96, 10).Value = Fpidh

```

```

Cells(97, 8).Value = Fpid
Cells(97, 9).Value = "se aproximam mas não colidem"
'saidas/resumo
Ftd = Ftd / 1000
Ffd = Ffd / 1000
Fpid = Fpid / 1000
Cells(37, 3).Value = Ftd / 1.1
If Cells(73, 7).Value = "Ffd é significativa" Then
  Cells(38, 3).Value = Ffd
  Else
    Rows("38:38").EntireRow.Hidden = True
  End If
Cells(39, 3).Value = "Não de forma efetiva"
Cells(40, 3).Value = FVi / 1000
Cells(41, 3).Value = Cells(87, 7).Value
Cells(42, 3).Value = Fpid
Cells(43, 3).Value = bh
Cells(44, 3).Value = amin
  If Ftd >= Ffd Then Fs1 = 1
  If Ftd >= Fpid Then Fs2 = 1
  If Fs1 + Fs2 = 2 Then
    Fsuports = Ftd
    Cells(45, 6).Value = "Devido a Ftd - força durante o curto"
  End If
  If Ffd >= Ftd Then Fs3 = 1
  If Ffd >= Fpid Then Fs4 = 1
  If Fs3 + Fs4 = 2 Then
    Fsuports = Ffd
    Cells(45, 6).Value = "Devido a Ffd - força após o curto"
  End If
  If Fpid >= Ftd Then Fs5 = 1
  If Fpid >= Ffd Then Fs6 = 1
  If Fs5 + Fs6 = 2 Then
    Fsuports = Fpid
    Cells(45, 6).Value = "Devido a Fpid - força causada pelo efeito pinch"
  End If
  If Ftd = Ffd Then Fs7 = 1
  If Ftd = Fpid Then Fs8 = 1
  If Fs7 + Fs8 = 2 Then
    Fsuports = Ftd
    Cells(45, 6).Value = "As forças Ftd(durante), Ffd(após) e Fpid(pinch) são
iguais"
  End If
Cells(45, 4).Value = Fsuports

```

Ftdcon = 1.5 \* Ftd

If Ftdcon >= Ffd Then Fs1 = 1

If Ftdcon >= Fpid Then Fs2 = 1

If Fs1 + Fs2 = 2 Then

Fconnectors = Ftdcon

Cells(46, 6).Value = "Devido a Ftd - força durante o curto"

End If

If Ffd >= Ftdcon Then Fs3 = 1

If Ffd >= Fpid Then Fs4 = 1

If Fs3 + Fs4 = 2 Then

Fconnectors = Ffd

Cells(46, 6).Value = "Devido a Ffd - força após o curto"

End If

If Fpid >= Ftdcon Then Fs5 = 1

If Fpid >= Ffd Then Fs6 = 1

If Fs5 + Fs6 = 2 Then

Fconnectors = Fpid

Cells(46, 6).Value = "Devido a Fpid - força causada pelo efeito pinch"

End If

If Ftdcon = Ffd Then Fs7 = 1

If Ftdcon = Fpid Then Fs8 = 1

If Fs7 + Fs8 = 2 Then

Fconnectors = Ftd

Cells(46, 6).Value = "As forças Ftd(durante), Ffd(após) e Fpid(pinch) são

iguais"

End If

Cells(46, 4).Value = Fconnectors

If Ftd >= Ffd Then Fs1 = 1

If Ftd >= Fpid Then Fs2 = 1

If Fs1 + Fs2 = 2 Then

Ffoundations = Ftd

Cells(47, 6).Value = "Devido a Ftd - força durante o curto"

End If

If Ffd >= Ftd Then Fs3 = 1

If Ffd >= Fpid Then Fs4 = 1

If Fs3 + Fs4 = 2 Then

Ffoundations = Ffd

Cells(47, 6).Value = "Devido a Ffd - força após o curto"

End If

If Fpid >= Ftd Then Fs5 = 1

If Fpid >= Ffd Then Fs6 = 1

If Fs5 + Fs6 = 2 Then

```

    Ffoundations = Fpid
    Cells(47, 6).Value = "Devido a Fpid - força causada pelo efeito pinch"
End If
If Ftd = Ffd Then Fs7 = 1
If Ftd = Fpid Then Fs8 = 1
If Fs7 + Fs8 = 2 Then
    Ffoundations = Ftd
    Cells(47, 6).Value = "As forças Ftd(durante), Ffd(após) e Fpid(pinch) são
iguais"
End If
Cells(47, 4).Value = Ffoundations
Plan1.Rows("88:92").EntireRow.Hidden = True
Exit Sub
End If
End Sub

```

## Apêndice II – Fluxograma

