

Projeto Elétrico Industrial

Parte III

Análise da Corrente de Curto - Circuito

A Análise da corrente de curto circuito em sistemas de baixa tensão é necessária para dimensionar corretamente a proteção do equipamento (disjuntor de proteção) ou da instalação elétrica (Cabos condutores).

Para realizar a análise, temos que representar o sistema elétrico da indústria (transformadores e condutores elétricos) em circuitos unifilares representados por impedância ($Z=R+j\omega l$), onde os valores de R (Resistência) e Z (impedância) para o transformador são retirados da tabela 1 e dos condutores elétricos são retirados da tabela 22 R(Resistência) e XL (ωl) (reatância indutiva) (Dimensionamento Pirelli).

** OBS. $Z=R+j\omega l$ e o seu módulo: $|Z| = \sqrt{(R)^2 + (XL)^2} = \sqrt{(R)^2 + (\omega l)^2}$

Tipos de Corrente de Curto - Circuito

1. Curto - circuito Monofásico (F-N ou F-T)

$$I_{cc} = \frac{V_F}{Z_F + Z_N}$$

2. Curto – circuito Bifásico (F-F)

$$I_{cc} = \frac{V_L}{2 \times Z_{FF}}$$

3. Curto – circuito Trifásico (F-F-F)

$$I_{cc} = \frac{V_L}{\sqrt{3} \times Z_{FF}}$$

I_{cc} - Corrente de curto –
circuito;

V_F – Tensão de Fase;

V_L – Tensão de Linha;

Z_F – Impedância de Fase;

Z_N – Impedância de Neutro;

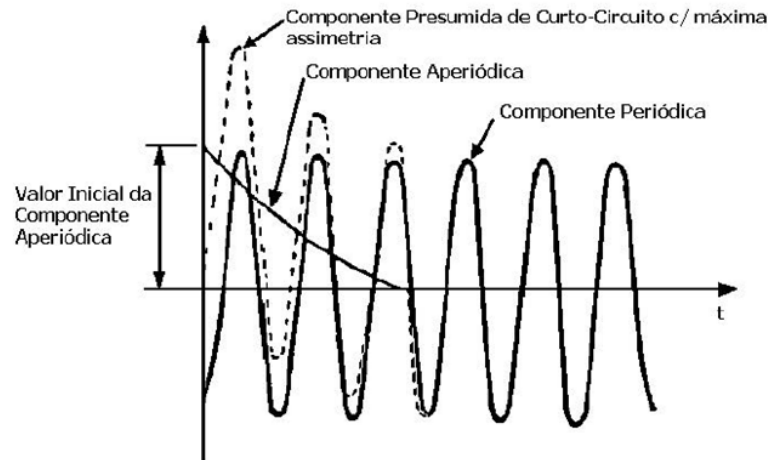
Dentre estes curto -circuitos o pior caso é o curto – circuito trifásico (produz a maior intensidade nominal de corrente de curto – circuito).

Corrente de Impulso

No momento do curto – circuito, a corrente sofre uma alteração brusca de intensidade e após um determinado instante de tempo ela retorna ao seu estado nominal. Para isso temos um fator de correção denominado fator de impulso, que é referente a assimetria da corrente ao período transiente.

$$fi = 1,02 + 0,98 \times e^{-3,03 \times \frac{R}{XL}}$$

$$I_K = \sqrt{2} \times fi \times I_{cc}$$



Onde:

I_K = Corrente de Impulso do Curto Circuito presumido;

I_{cc} = Corrente de curto – circuito;

fi = fator de assimetria;

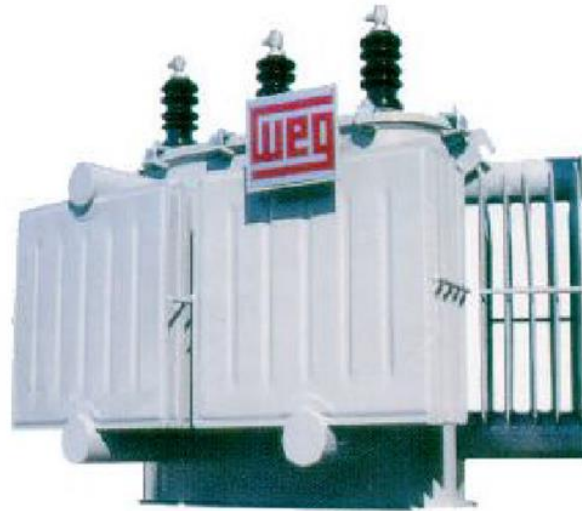
I_{cc} = Corrente de curto-circuito;

R = resistência total do percurso do transformador até o ponto de curto – circuito;

XL = Reatância indutiva total do percurso do transformador até o ponto de curto – circuito;

Impedância do Transformador

Tabela I – Impedância dos Transformadores – catálogo WEG



KVA	150	225	300	500	750	1000	1500
Z%	3,5	4,5	4,5	4,5	5	5	6
R%	1,4	1,3	1,2	1,1	1,6	1,5	1,5

Exemplo de Cálculo de Impedância

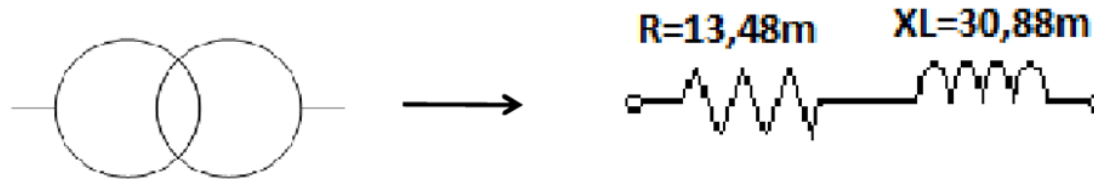
Transformador – 150 kVA

$$R_T = \frac{R\%}{100} \times \frac{V_L^2}{P_T} = \frac{1,4}{100} \times \frac{380^2}{150 \cdot 10^3} = 13,48 m\Omega$$

$$Z_T = \frac{Z\%}{100} \times \frac{V_L^2}{P_T} = \frac{3,5}{100} \times \frac{380^2}{150 \cdot 10^3} = 33,69 m\Omega$$

$$|Z| = \sqrt{(R)^2 + (XL)^2} = \sqrt{(R)^2 + (\omega l)^2}$$

$$XL_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{(33,69 m)^2 - (13,48 m)^2} = 30,88 m\Omega$$



Exemplo de Cálculo de Impedância

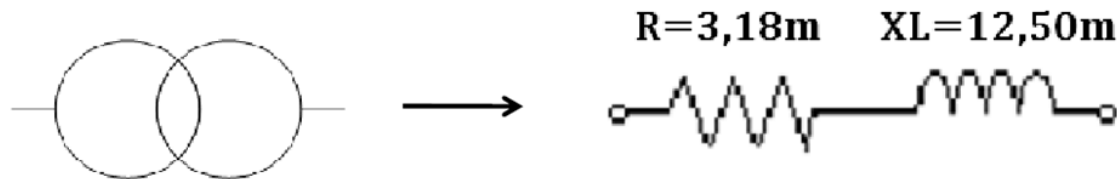
Transformador – 500 kVA

$$R_T = \frac{R\%}{100} \times \frac{V_L^2}{P_T} = \frac{1,1}{100} \times \frac{380^2}{500 \cdot 10^3} = 3,18 m\Omega$$

$$Z_T = \frac{Z\%}{100} \times \frac{V_L^2}{P_T} = \frac{4,5}{100} \times \frac{380^2}{500 \cdot 10^3} = 12,90 m\Omega$$

$$|Z| = \sqrt{(R)^2 + (XL)^2} = \sqrt{(R)^2 + (\omega l)^2}$$

$$XL_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{(12,9m)^2 - (3,18m)^2} = 12,50 m\Omega$$



Impedância dos Condutores

Utilizando a Tabela 22 (Dimensionamento Pirelli)

$$\text{Cabo de } 10\text{mm}^2 \longrightarrow R_C = 2,19 \Omega/\text{km} \quad XL_C = 0,13 \Omega/\text{km}$$

$$\text{Cabo de } 35\text{mm}^2 \longrightarrow R_C = 0,63 \Omega/\text{km} \quad XL_C = 0,11 \Omega/\text{km}$$

$$\text{Cabo de } 120\text{mm}^2 \longrightarrow R_C = 0,19 \Omega/\text{km} \quad XL_C = 0,10 \Omega/\text{km}$$

$$2 \text{ Cabo de } 120\text{mm}^2 \text{ em paralelo} \longrightarrow R_C = 0,095 \Omega/\text{km} \quad XL_C = 0,05 \Omega/\text{km}$$

$$3 \text{ Cabo de } 120\text{mm}^2 \text{ em paralelo} \longrightarrow R_C = 0,063 \Omega/\text{km} \quad XL_C = 0,033 \Omega/\text{km}$$

$$4 \text{ Cabo de } 120\text{mm}^2 \text{ em paralelo} \longrightarrow R_C = 0,0475 \Omega/\text{km} \quad XL_C = 0,025 \Omega/\text{km}$$

Exemplo de Aplicação

➤ Curto – circuito no Quadro de Distribuição Geral - QDG



1MVA / 380V

Impedância do Transformador:

$$R_T = \frac{R\%}{100} \times \frac{V_L^2}{P_T} = \frac{1,5}{100} \times \frac{380^2}{1000 \cdot 10^3} = 2,17 m\Omega$$

$$Z_T = \frac{Z\%}{100} \times \frac{V_L^2}{P_T} = \frac{5}{100} \times \frac{380^2}{1000 \cdot 10^3} = 7,22 m\Omega$$

$$XL_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{(7,22m)^2 - (2,17m)^2} = 6,89 m\Omega$$

Cabo 3x240mm² por Fase
Comprimento: 10 m



Exemplo de Aplicação

Impedância do Condutor:

1 Cabo de 240mm²:

$$R_C = 0,094 \Omega/km \quad XL_C = 0,098 \Omega/km$$

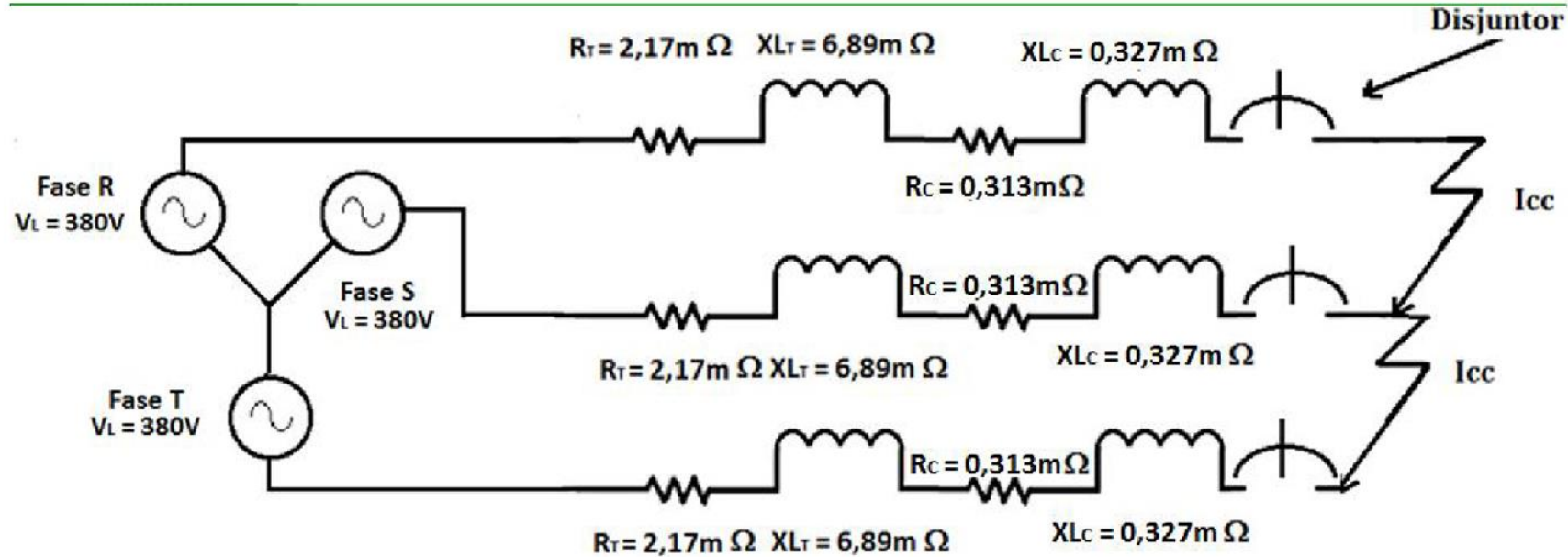
3 Cabo de 240mm² em paralelo com 10m de comprimento:

$$R_C = 0,0313 \Omega/km \quad XL_C = 0,0327 \Omega/km$$

$$R_C = 0,0313 \times \frac{10}{1000} = 313 \mu = 0,313 m\Omega$$

$$XL_C = 0,0327 \times \frac{10}{1000} = 327 \mu = 0,327 m\Omega$$

Representação do sistema



$$Z_F = (R_T + jX_{L_T}) + (R_C + jX_{L_C})$$

$$Z_F = 2,17m + j6,89m + 0,313m + j0,327m = 2,483m + j7,217m$$

$$|Z_F| = \sqrt{(R)^2 + (XL)^2} = \sqrt{(2,483m)^2 + (7,217m)^2} = 7,63m\Omega$$

$$I_{cc} = \frac{V_L}{\sqrt{3} \times Z_F} = \frac{380}{\sqrt{3} \times (7,23 \times 10^{-3})} = 30,34kA$$

Corrente de Curto presumida

Fator de Assimetria:

$$fi = 1,02 + 0,98 \times e^{-3,03 \times \frac{R}{XL}}$$

$$fi = 1,02 + 0,98 \times e^{-3,03 \times \frac{2,483m}{7,217m}}$$

$$fi = 1,365$$

Corrente Máxima de Curto –Circuito presumido

$$I_K = \sqrt{2} \times fi \times I_{cc}$$

$$I_K = \sqrt{2} \times 1,365 \times 30,34 \times 10^3$$

$$I_K = 58,57kA \longrightarrow \text{O disjuntor deve suportar este valor de intensidade de curto circuito}$$

Disjuntores

Para instalações elétricas industriais

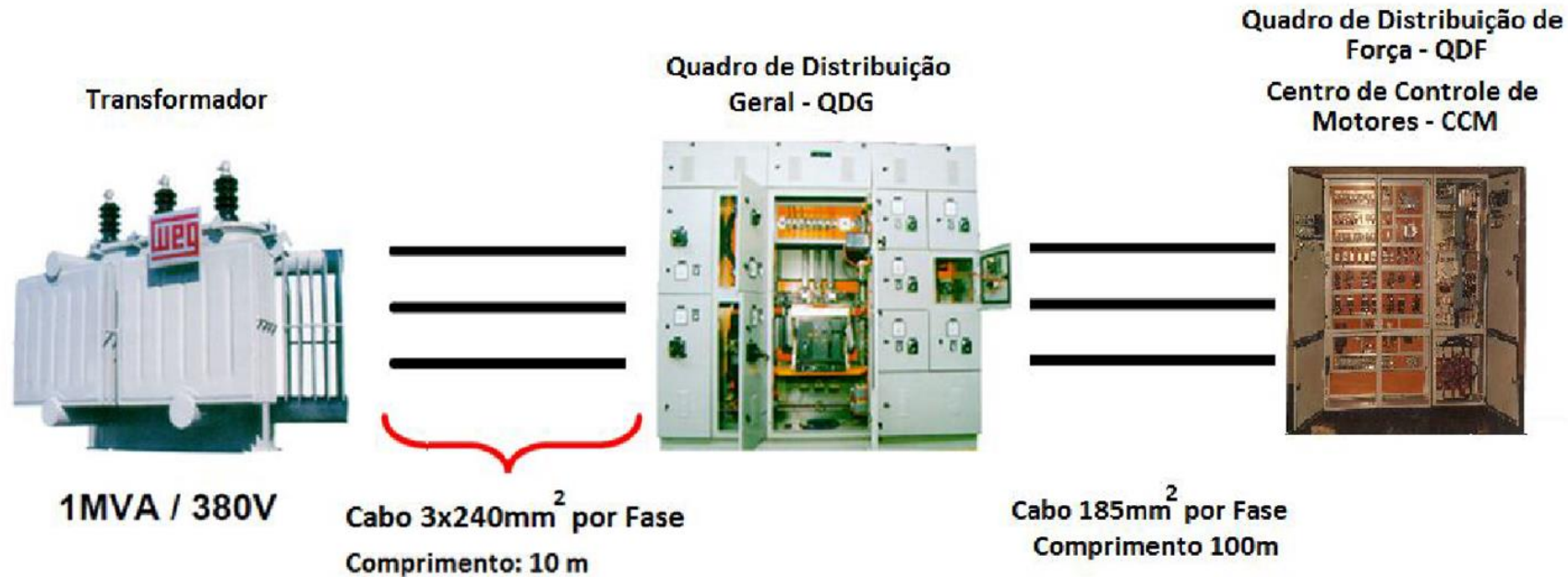


Tabela de escolha ¹⁾

Tipo Pólos	3VL37 (VL 250) tripolar ²⁾			3VL47 (VL 400) tripolar ²⁾		
Corrente nominal (50°C) (A)	250			400		
Tensão nominal máxima (V)	690			690		
Corrente máxima de interrupção IEC 947-2 - I _{cu} 220/240 V (kA) 380/415 V 440 V 500 V NEMA 480 V	65	100	200	65	100	200
	40	70	100	45	70	100
	25	50	100	35	50	100
	25	50	65	25	50	65
	25	50	65	25	50	65
Para completar o tipo	1	2	3 Fornecedor sob consulta	1	2	3 Fornecedor sob consulta

Exemplo de Aplicação 2

➤ Curto Circuito no Centro de Controle de Motores - CCM



Exemplo de Aplicação 2

Impedância até o QDG:

$$R = 2,483m\Omega \quad e \quad XL = 7,217m\Omega$$

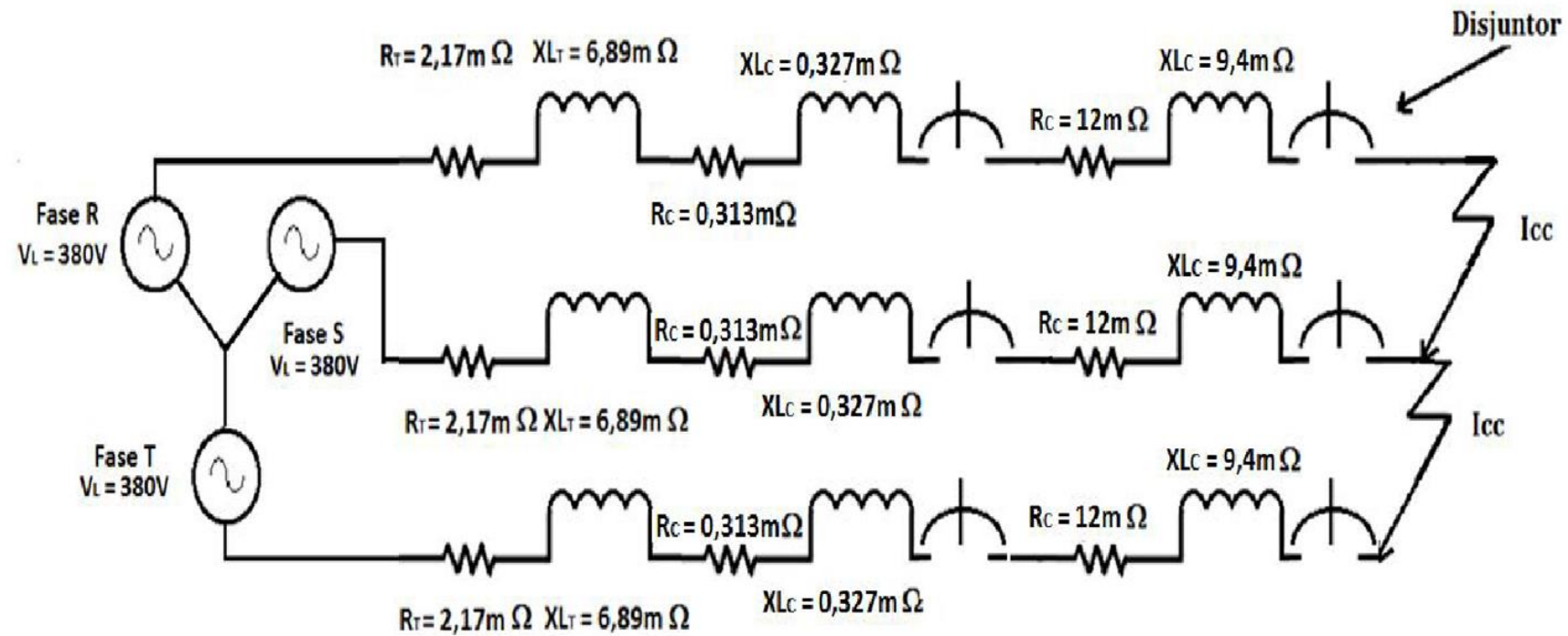
Impedância do Cabo de 185mm² (tabela 22):

$$R_c = 0,12 \Omega/km \quad XL_c = 0,094 \Omega/km$$

Impedância do cabo para comprimento de 100m:

$$R_c = 0,12 \times \frac{100}{1000} = 12m\Omega \quad XL_c = 0,094 \times \frac{100}{1000} = 9,4m\Omega$$

Exemplo de Aplicação



Exemplo de Aplicação 2

$$Z_F = (R_T + jXL_T) + (R_C + jXL_C)$$

$$Z_F = 2,483m + j7,217m + 12m + j9,4m = 14,483m + j16,617m$$

$$|Z_F| = \sqrt{(R)^2 + (XL)^2} = \sqrt{(14,483m)^2 + (16,617m)^2} = 22,04m\Omega$$

$$I_{cc} = \frac{V_L}{\sqrt{3} \times Z_F} = \frac{380}{\sqrt{3} \times (22,04 \times 10^{-3})} = 9,95kA$$

Fator de Assimetria:

$$fi = 1,02 + 0,98 \times e^{-3,03 \times \frac{R}{XL}} = 1,02 + 0,98 \times e^{-3,03 \times \frac{14,483m}{16,617m}}$$

$$fi = 1,09$$

Corrente Máxima de curto – circuito presumido:

$$I_K = \sqrt{2} \times fi \times I_{cc} = \sqrt{2} \times 1,09 \times 9,95 \times 10^3$$

$$I_K = 16,34kA$$

Especificação do disjuntor pela corrente de curto - circuito

Disjuntores

Para instalações elétricas industriais



Tabela de escolha ¹⁾

Tipo Polos	3VL77 (VL 1250) tripolar ²⁾			3VL87 (VL 1600) tripolar ²⁾		
Corrente nominal (50°C) (A)	1250			1600		
Tensão nominal máxima (V)	690			690		
Corrente máxima de Interrupção IEC 947-2 - Icu 220/240 V (kA) 380/415 V 440 V 500 V NEMA 480 V	65	100	200	65	100	200
	50	70	100	50	70	100
	35	50	100	35	50	100
	25	50	65	25	50	65
	25	50	65	25	50	65
Para completar o tipo	1	2	3 Fornecedor sob consulta	1	2	3 Fornecedor sob consulta

Classificação dos Disjuntores

➤ Características dos Disjuntores:

- Número de Pólos:
 - Monopolares ou unipolares
 - Bipolares
 - Tripolares
- Tensão de Operação:
 - Disjuntores de Baixa Tensão (até 1000V)
 - I. Minidisjuntores
 - II. Disjuntores em Caixa Moldada
 - III. Disjuntores Abertos
 - Disjuntores de Média e Alta Tensão (acima de 1000V)
 - I. Vácuo
 - II. Ar comprimido
 - III. Óleo
 - IV. SF₆

Classificação dos Disjuntores

- **1) NBR NM 60898: disjuntores especialmente projetados para serem manipulados por usuários leigos**, ou seja, para uso por pessoas não qualificadas e para não sofrerem manutenção (normalmente instalações residenciais ou similares)
- **2) NBR IEC 60947-2: disjuntores para serem manipulados por pessoas qualificadas**, ou seja, com formação técnica, e para sofrerem ajustes e manutenção (normalmente instalações industriais ou similares).
 - **Disjuntores Térmicos:** proteção contra sobrecarga;
 - **Disjuntores Magnéticos:** proteção contra curto circuito;
 - **Disjuntores Termomagnéticos:** proteção contra sobrecarga e curto circuito. Podem ter ajuste do valor da proteção térmica e da proteção magnética de atuação.

Classificação dos Disjuntores

Tab. I – As diferentes categorias de disjuntores BT

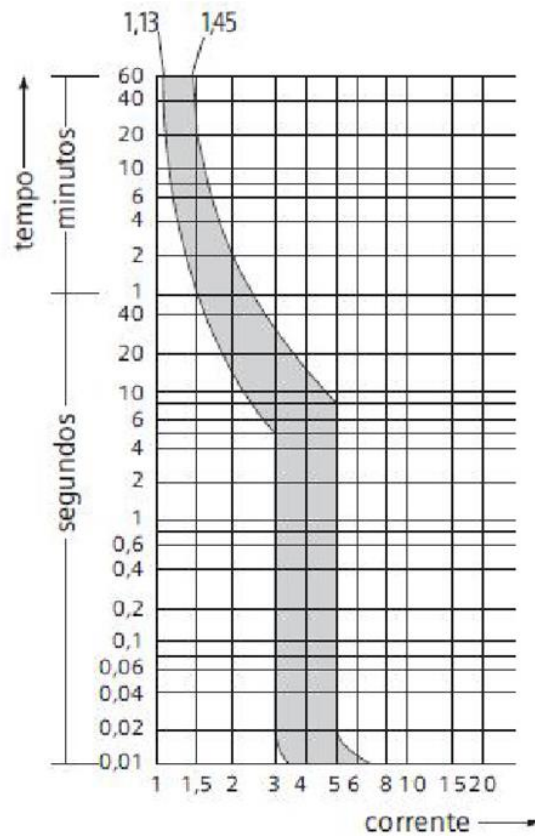
Categoria	Características	Normas	Correntes nominais	Aplicações
Minidisjuntores – Disjuntores para instalações domésticas e análogas	• Construção modular, montagem em trilho (quando padrão DIN) • Disparador não ajustável	IEC 60898	0,5 a 125 A	Proteção de circuitos terminais em instalações com tensão de no máximo 440 VCA
Disjuntores para uso geral:	Construção consagrada, e tecnologia em constante aperfeiçoamento. Ampla variedade de disparadores e acessórios Ao lado da tradicional construção aberta, versões em invólucros isolantes. Unidades de disparo versáteis e com amplos recursos, incluindo comunicação	IEC 60947-2	40 a 3200 A	Proteção de circuitos principais, de distribuição e terminais
• Disjuntores em caixa moldada • Disjuntores de potência			630 a 6300 A	Proteção do quadro geral (QGBT)
Disjuntor-motor	Características apropriadas às dos motores. Podem ser usados como dispositivo de partida.	IEC 60947-2 IEC 60947-4.1	0,1 a 63 A	Circuitos de alimentação de motores, máquinas e processos industriais
Disjuntores para equipamentos	Dispositivos simples, geralmente proporcionando proteção contra sobrecargas mas não contra curtos-circuitos	IEC 60934	0,1 a 125 A	Destinados a ser incorporados a equipamentos de utilização (eletrodomésticos, bombas, etc.)

Curva Característica do Disjuntor

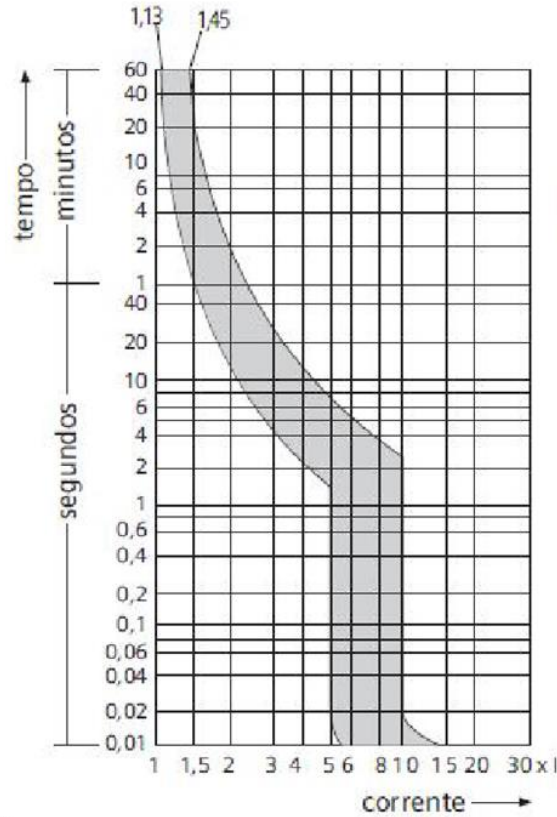
Curvas características de disparo:

- **Curva B :** Para proteção de circuitos que alimentam cargas com características predominantemente resistivas, como lâmpadas incandescentes, chuveiros, torneiras e aquecedores elétricos, além dos circuitos de tomadas de uso geral.
- **Curva C :** Para proteção de circuitos que alimentam especificamente cargas de natureza indutiva que apresentam picos de corrente no momento de ligação, como microondas, ar condicionado, motores para bombas, além de circuitos com cargas de características semelhantes a essas.
- **Curva D :** Para proteção de circuitos que alimentam cargas altamente indutivas que apresentam elevados picos de corrente no momento de ligação, como grandes motores, transformadores, além de circuitos com cargas de características semelhantes a essas.

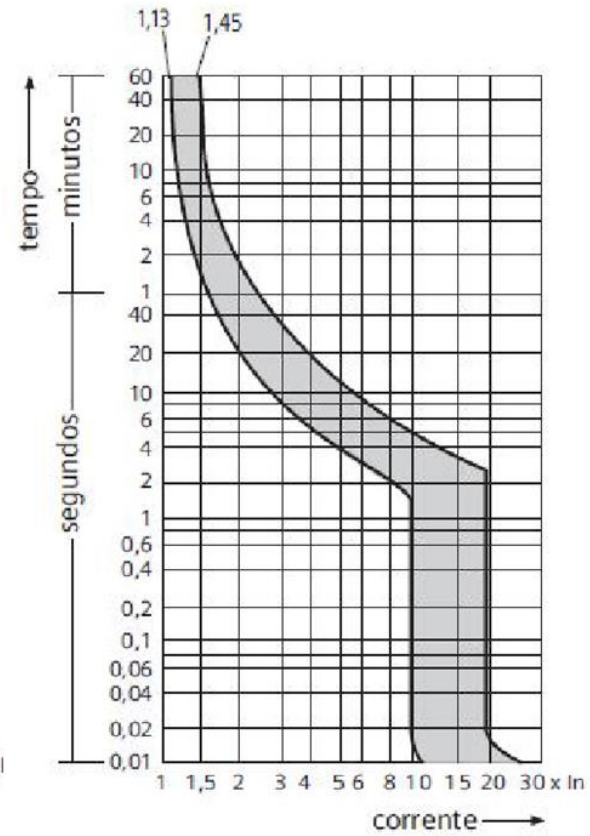
Curva Característica do Disjuntor



Curva B



Curva C



Curva D

Característica do Disjuntor

Corrente nominal (I_N) do disjuntor: valor comercial do disjuntor.

Correntes estipuladas: 6 – 10 – 16 – 20 – 25 – 32 – 40 – 50 – 63 – 80 – 100 – 125 A.

Corrente convencional de não funcionamento: valor para o qual o disjuntor não deve funcionar durante o tempo convencional.

Corrente convencional de funcionamento: valor para o qual o disjuntor deve funcionar antes de terminar o tempo convencional.

Poder de corte : corrente máxima de curto-circuito que o disjuntor é capaz de interromper sem se danificar. *Os valores normalizados são: 1,5 – 3 – 4,5 – 6 – 10 KA.*

Tempo convencional: 1hora para $I_N \leq 63A$ e 2horas para $I_N \geq 63A$.

Corrente Nominal (I_n)	Corrente convencional de não funcionamento (I_{nf})	Corrente convencional de funcionamento (I_2)	Poder de corte (P_{dc})	Tempo convencional
16 A	18 A ($1,13 \times I_n$)	23 A ($1,45 \times I_n$)	6 KA	1h
63A	71A ($1,13 \times I_n$)	91 A ($1,45 \times I_n$)	6 KA	2h

Característica do Disjuntor

Disjuntores Prediais e Comerciais (Catálogo Siemens):

Corrente Nominal (In)	Corrente nominal (A)	Tensão nominal máxima (V)	Sobrecarga (Térmico)	Curto Circuito (Magnético)	Corrente Nominal (A)	Corrente de Curto (A) Atuação	Corrente máxima de interrupção - Icu (KA)
3VF17	160	690	Fixo	Fixo	50	600	40 – 70
LXD	600	600	Fixo	Ajustável	500	3000 a 6000	40
NXD	1200	600	Fixo	Ajustável	1000	5000 a 10000	40

Disjuntores Industriais (Catálogo Siemens):

Corrente Nominal (In)	Corrente nominal (A)	Tensão nominal máxima (V)	Sobrecarga (Térmico)	Curto Circuito (Magnético)	Corrente Nominal (A)	Corrente de Curto (A) Atuação	Corrente máxima de interrupção - Icu (KA)
3VL17	160	690	Ajustável	Fixo	40 a 63	600	40 – 70
3VL37	250	690	Ajustável	Ajustável	160-200	1000 a 2000	40 – 70 - 100
3VL87	1600	690	Ajustável	Ajustável	0,4 a 1,0 x In	1,5 a 10 x In	40 – 70 - 100

Coordenação Condutor X Proteção

Coordenação entre condutores e dispositivos de proteção:

- A característica de funcionamento de um dispositivo de proteção de um circuito contra sobrecargas deve satisfazer às seguintes condições:
- a) $I_p \leq I_d \leq I_c$ b) $I_2 \leq 1,45 \times I_c$:

Onde: **I_p** é a corrente de projeto do circuito;

I_c é a corrente de condução nos condutores;

I_d é a corrente nominal do dispositivo de proteção (ou corrente de ajuste para dispositivos ajustáveis;

I_2 é a corrente convencional de atuação para disjuntores ou corrente convencional de fusão, para fusíveis.

- **OBS:** A condição b) é aplicável quando for possível assumir que a temperatura limite de sobrecarga dos condutores não seja mantida por um tempo superior a 100 h durante 12 meses consecutivos ou por 500 h ao longo da vida útil do condutor. Quando isso não ocorrer, a condição b) deve ser substituída por: $I_2 \leq I_c$

Fatores de Corrente convencional de atuação (fusão) de dispositivos

Tipo	Corrente Nominal (A)	Corrente Convencional de não Atuação (A)	Corrente Convencional de Atuação (I ₂) (A)
Fusível gl	$I_n \leq 4A$	$1,5 \times I_n$	$2,1 \times I_n$
	$4A < I_n \leq 10A$	$1,5 \times I_n$	$1,9 \times I_n$
	$10A < I_n \leq 25A$	$1,4 \times I_n$	$1,75 \times I_n$
	$25A < I_n \leq 100A$	$1,3 \times I_n$	$1,6 \times I_n$
	$100A < I_n \leq 1000A$	$1,5 \times I_n$	$1,6 \times I_n$
Fusível gG	Todos	$1,2 \times I_n$	$1,6 \times I_n$
Disjuntor em Geral	$I_n \leq 63A$	$1,05 \times I_n$	$1,35 \times I_n$
	$I_n > 63A$	$1,05 \times I_n$	$1,25 \times I_n$
Disjuntor em Caixa Moldada	Todos	$1,05 \times I_n$	$1,35 \times I_n$