

## ANÁLISE DOS ESFORÇOS TÉRMICOS DO BARRAMENTO GERAL EM QUADROS DE MÉDIA TENSÃO.

### RESUMO

Este artigo apresenta uma análise dos esforços térmicos enfrentados pelos barramentos gerais em quadros de média tensão (MT) de subestações de distribuição primária – um tema crucial para a segurança e eficiência das redes elétricas atuais. Através do estudo de dois projetos de quadros de MT, o trabalho detalha o cálculo da corrente máxima admissível e a temperatura final atingida pelos barramentos, tanto em condições normais de operação quanto em cenários de curto-circuito. Os resultados comprovam que ambas as soluções avaliadas atendem aos requisitos de segurança, ao mesmo tempo em que oferecem alto desempenho operacional. O artigo apresenta recomendações práticas para o dimensionamento eficiente de barramentos. Ao fornecer diretrizes claras e aplicáveis, o estudo contribui para o desenvolvimento de sistemas de distribuição mais seguros, confiáveis e sustentáveis, consolidando-se como uma ferramenta valiosa para quem busca excelência técnica em projetos de energia elétrica.

**Palavras-chave:** Barramento Geral, Corrente Máxima Admissível, Esforços Térmicos, Quadro de MT.

### 1. Introdução

A análise dos esforços térmicos no barramento geral de quadros de média tensão (MT) é essencial para garantir a segurança das subestações de distribuição elétrica. Os barramentos ficam sujeitos a elevados valores de correntes elétricas, especialmente em situações de defeitos e curto-circuitos. Nestas situações, o aquecimento resultante do efeito de joule pode comprometer a integridade dos materiais condutores e do isolamento.

O correto dimensionamento dos barramentos deve considerar não apenas a corrente de serviço em regime

permanente, mas também a capacidade de suportar as correntes de defeito. A avaliação criteriosa dos esforços térmicos evita danos nos equipamentos e prolonga a vida útil dos quadros, ao mesmo tempo, assegurando a continuidade do fornecimento de energia elétrica pelos quadros de MT (QMT) das instalações.

Cada quadro é composto por inúmeras celas interligadas, capazes de isolar o circuito, reconfigurar a rede e controlar os dispositivos que lhe estão associados [1]. Esta interligação é efetuada através de um condutor metálico, normalmente feito de cobre, denominado por barramento geral (BG). Este condutor representa o ponto central na distribuição de energia do QMT, assegurando uma ligação eficiente e segura entre os diferentes circuitos, permitindo a distribuição uniforme de energia elétrica e facilitando a manutenção e a expansão do sistema [2]. O dimensionamento adequado deste componente é essencial para garantir a fiabilidade e segurança do sistema, especialmente em condições de sobrecarga ou de curto-circuito.

No dimensionamento do barramento geral, os esforços térmicos surgem como um fator crítico, uma vez que influenciam diretamente o desempenho e a segurança do sistema. O calor proveniente do efeito de joule deve ser dissipado de forma eficiente para evitar sobreaquecimentos que possam comprometer a integridade do barramento ou reduzir a sua vida útil [3]. O cálculo da dissipação térmica envolve a análise do equilíbrio entre o calor gerado internamente e aquele transferido para o ambiente, considerando fatores como o material do condutor, as condições de ventilação, o isolamento e o ambiente circundante [4].

Este artigo apresenta uma metodologia prática, simples e eficaz para uma análise completa aos esforços térmicos do BG em quadros de média tensão.

## 2. Cálculos dos Esforços Térmicos do Barramento Geral

### 2.1 Coeficiente das Condições (K)

Inicialmente, é necessário definir o coeficiente das condições do barramento geral, K. Para realizar este cálculo, é necessário determinar os coeficientes específicos:  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $K_4$ ,  $K_5$  e  $K_6$ .

Coeficiente  $K_1$  – Representa a função do número de barras pela relação  $\frac{e}{a}$ , onde “e” é a espessura da barra e “a” é a distância entre as mesmas.

A partir da Figura 1, extraem-se os dados “e” e “a”.

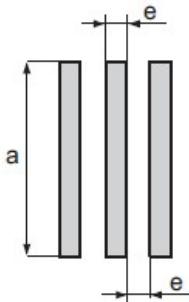


Figura 1. Espessura e Distância entre Barras do Barramento Geral, por fase [5]

De seguida, é possível determinar a seguinte relação (1):

$$\text{Relação entre a Espessura e a Distância Interbarra} = \frac{e}{a} \quad (1)$$

Com os valores obtidos e, através da Tabela 1 é possível determinar o valor de  $K_1$ .

Coeficiente  $K_2$  – Representa a função da condição de superfície das barras, conforme a Tabela 2.

Tabela 2. Definição de  $K_2$

| Condição de Superfície | Valor de $K_2$ |
|------------------------|----------------|
| Nu                     | 1              |
| Pintado                | 1,15           |

Coeficiente  $K_3$  – Representa a função da posição das barras, de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3. Definição de  $K_3$

| Posição das Barras               | Valor de $K_3$ |
|----------------------------------|----------------|
| Barras Montadas nas Extremidades | 1              |
| 1 Barra Montada na Base          | 1,15           |
| Várias Barras Montadas na Base   | 0,75           |

Coeficiente  $K_4$  – Representa a função do local de instalação das barras, conforme a Tabela 4.

Tabela 4. Definição de  $K_4$

| Local de Instalação das Barras    | Valor de $K_4$ |
|-----------------------------------|----------------|
| Atmosfera Interna Calma           | 1              |
| Atmosfera Externa Calma           | 1,15           |
| Barras em Condutas Não Ventiladas | 0,8            |

Coeficiente  $K_5$  – Representa a função da ventilação artificial, através da Tabela 5.

Tabela 5. Definição de  $K_5$

| Ventilação Artificial  | Valor de $K_5$ |
|------------------------|----------------|
| Sem Ventilação Forçada | 1              |

Tabela 1 – Definição de  $K_1$

| Nº Barras por Fase | $e/a$          |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--------------------|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                    | 0,05           | 0,06 | 0,08 | 0,10 | 0,12 | 0,14 | 0,16 | 0,18 | 0,20 |
| 1                  | K <sub>1</sub> |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 2                  | 1              |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 3                  | 1,63           | 1,73 | 1,76 | 1,80 | 1,83 | 1,85 | 1,87 | 1,89 | 1,91 |
|                    | 2,40           | 2,45 | 2,50 | 2,55 | 2,60 | 2,63 | 2,65 | 2,68 | 2,70 |

Coeficiente  $K_6$  – Representa a função do tipo de corrente.

Para uma  $f \leq 60$  Hz, o  $K_6$  é determinado a partir do número de “n” barras por fase e o espaçamento entre elas. Na Tabela 6 encontram-se os valores de  $K_6$  para um espaçamento igual à grossura das suas barras [5].

Tabela 6 – Definição de  $K_6$

| Número de Barras por Fase | Valor de $K_6$ |
|---------------------------|----------------|
| 1                         | 1              |
| 2                         | 1              |
| 3                         | 0,98           |

Por fim, com os coeficientes definidos, é possível calcular o coeficiente de condições (K), pela equação (2):

$$K = K_1 \times K_2 \times K_3 \times K_4 \times K_5 \times K_6 \quad (2)$$

## 2.2 Corrente Máxima Admissível

Após a definição do coeficiente de condições e o estabelecimento dos dados de entrada, procede-se ao cálculo da corrente máxima admissível pelo barramento através da equação de *Melsom & Booth* (3), adaptada de [5]. Para que o barramento fique bem dimensionado, este valor precisa de ser superior à corrente nominal do barramento, sendo que a secção da barra é representada por  $S$ , em  $\text{cm}^2$ ; o coeficiente de temperatura para uma resistividade de cobre é dado por  $\alpha$ , com um valor de 0.00393 e, a subida de temperatura máxima admissível, é representada por  $(\theta - \theta_n)$ , em Kelvin.

$$I = K \times \frac{24.9 \times (\theta - \theta_n)^{0.61} \times S^{0.5} \times p^{0.39}}{\sqrt{p_{20} \times [1 + \alpha \times (\theta - \theta_n)]}} [\text{A}] \quad (3)$$

## 2.3 Aumento Máximo de Temperatura durante um Curto-Circuito

De seguida, é necessário calcular o aumento de temperatura máximo durante um CC ( $\Delta\theta_{sc}$ ) através da equação (4).

Para isso, assume-se que, durante um tk, todo o calor gerado durante o curto-circuito, por um barramento com “n” barras por fase, é convertido no aumento de temperatura do barramento, desconsiderando-se os efeitos da radiação. Considera-se que o calor específico e densidade do cobre são 0.091 kcal/kg °C e 8.9 g/cm<sup>3</sup>, respetivamente.

$$\Delta\theta_{sc} = \frac{0.24 \times p_{20} \times 10^{-6} \times I_{th}^2 \times t_k}{(n \times S)^2 \times c \times \delta} [\text{°C}] \quad (4)$$

## 2.4 Temperatura Final do Barramento após um Curto-Circuito

Após a obtenção dos resultados relativos ao aumento máximo de temperatura durante o curto-circuito, é necessário determinar o  $\Delta\theta$ . Para tal, com  $I$  e  $I_N$  calculados e, a partir da equação de *Melsom & Booth* [5], é possível deduzir as seguintes equações (5) e (6):

$$I = \text{Constante} \times (\theta - \theta_n)^{0.61} [\text{A}] \quad (5)$$

$$I_N = \text{Constante} \times (\Delta\theta)^{0.61} [\text{A}] \quad (6)$$

Relacionando as duas expressões, obtém-se a equação (7):

$$\frac{I}{I_N} = \left( \frac{\theta - \theta_N}{\Delta\theta} \right)^{0.61} \Rightarrow \Delta\theta = \left( \frac{\theta - \theta_N}{\left( \frac{I}{I_N} \right)^{0.61}} \right) [\text{K}] \quad (7)$$

Finalmente, com o respetivo  $\Delta\theta$  calculado, resta apenas determinar a temperatura final ( $\theta_t$ ) do barramento após um curto-circuito. Neste cálculo, considera-se a corrente nominal ( $I_N$ ) do QMT. Assim, a temperatura final será obtida somando as variações de temperatura calculadas anteriormente, conforme a equação (8).

Para que o barramento geral esteja bem dimensionado, este valor precisa de ser inferior à temperatura máxima que as partes conectadas ao barramento podem suportar ( $\theta_{max}=100^\circ\text{C}$ ).

$$\theta_t = (\theta - \theta_n) + \Delta\theta_{sc} + \Delta\theta [\text{°C}] \quad (8)$$

### 3. Casos de Estudo

Nesta secção é apresentada a análise de dois casos de estudo baseados em QMTs da gama Normacel®, da *Efacec Power Solutions*. Os quadros desta gama foram selecionados devido à sua representatividade em aplicações reais e à relevância no setor de distribuição de energia elétrica em Portugal.

#### 3.1 Quadros de Média Tensão Normacel®

Os quadros desta gama são modulares, extensíveis, blindados, compartimentados com isolamento a ar (AIS) e equipados com disjuntores a vácuo. Esta gama permite suportar correntes de até 4000 A e correntes de CC de até 50 kA, dependendo da categoria escolhida [6].

Na Figura 2, podemos observar uma cela de média tensão deste tipo de QMT de 17,5 kV.



Figura 2 – Cela de Média Tensão de um QMT da Gama Normacel® 17,5 kV [7]

Os QMTs escolhidos são o Normacel® 12 kV / 50 kA e o Normacel® 17,5 kV / 25 kA, ambos de distribuição primária. Estas duas categorias permitem verificar o impacto que as características elétricas do equipamento podem exercer sobre os cálculos efetuados, bem como na solução final do BG.

#### 3.2 Características Elétricas e Mecânicas

Na gama Normacel® utilizam-se barramentos simples, de secção retangular, compostos por barras de cobre ( $\frac{1}{4}$  duro), dispostas na horizontal. Como soluções iniciais, opta-se por utilizar uma configuração de 3x100x10 mm no Normacel® 12 kV e de 2x80x10 mm no Normacel® 17,5 kV. É importante realçar que estas soluções iniciais foram atribuídas empiricamente, podendo sofrer alterações dependendo dos resultados dos cálculos efetuados.

Na Tabela 7, encontram-se as especificações técnicas de ambos os quadros estudados.

Tabela 7. Especificações Técnicas dos QMTs Normacel® 12kV e 17,5 kV

|   | 12 kV e 50 kA | 17,5 kV e 25 kA |
|---|---------------|-----------------|
| Tensão Nominal ( $U_n$ )  | 12 kV         | 17,5 kV         |
| Corrente Nominal ( $I_n$ )                                      | 4000 A        | 2500 A          |
| Corrente de Curta Duração Admissível ( $I_{th}$ )               | 50 kA         | 25 kA           |
| Duração da Corrente de Curta Duração Admissível ( $t_k$ )       |               | 3 s             |
| Subida de Temperatura Máxima Admissível ( $\theta - \theta_n$ ) | 57 K          | 75 K            |
| Temperatura Ambiente ( $\theta_n$ )                             |               | 20 °C           |
| Nº de Barras por fase   | 3             | 2               |
| Secção da Barra   | Retangular    |                 |
| Condição de Superfície das Barras                               | Barra Nua     |                 |
| Dimensões das Barras (mm)                                       | 3x100x10      | 2x80x10         |

Relativamente ao cálculo do coeficiente de condições (K), assumem-se os seguintes valores para os coeficientes K1, K2, K3, K4, K5 e K6, devidamente representativos das condições de instalação dos respetivos barramentos gerais, conforme se pode observar pela Tabela 8.

Tabela 8 – Coeficientes de Condição, K

|                | 12 kV e 50kA | 17,5 kV e 25 kA |
|----------------|--------------|-----------------|
| K <sub>1</sub> | 2,55         | 1,84            |
| K <sub>2</sub> | 1            | 1               |
| K <sub>3</sub> | 1            | 1               |
| K <sub>4</sub> | 0,8          | 0,8             |
| K <sub>5</sub> | 1            | 1               |
| K <sub>6</sub> | 0,98         | 1               |

#### 4. Resultados Obtidos

Nesta secção são apresentados os resultados obtidos com base nas equações (1) a (8) e nos dados de entrada previamente referidos. A análise térmica foi realizada para os dois QMTs da gama Normacel®, para os seus valores principais, que permitem retirar ilações sobre o comportamento térmico do BG, evidenciados na Tabela 9.

Tabela 9. Resultados do Dimensionamento dos Esforços Térmicos

|   | <b>12 kV e 50 kA</b> | <b>17,5 kV e 25 kA</b> |
|---|----------------------|------------------------|
| Corrente Máxima Admissível (A)                              | 4135,862             | 2887,324               |
| Aumento Máximo de Temperatura durante um Curto-Circuito (K) | 4,519                | 3,972                  |
| Temperatura Final (°C)                                      | 81,519               | 98,972                 |

Conforme observado na Tabela 9, a corrente máxima admissível para os quadros analisados (4135,862 A e 2887,324 A) é ligeiramente superior às respetivas correntes nominais especificadas (4000 A e 2500 A). Estes resultados indicam que os barramentos gerais são capazes de suportar, com segurança, as correntes nominais, proporcionando ainda uma margem adicional para situações de sobrecarga ou em caso de CC.

Relativamente à temperatura final, ambos os BGs cumprem as condições de segurança térmica, uma vez que as temperaturas finais obtidas (81,519 °C e 98,972 °C) permanecem inferiores ao valor máximo admissível ( $\theta_{max} = 100$  °C).

A Tabela 10, reúne a verificação final das condições de segurança aplicadas às configurações de BG utilizadas nos dois QMTs.

Tabela 10. Verificação das Condições de Segurança

|                                      | <b>12 kV e 50 kA</b> | <b>17,5 kV e 25 kA</b> |
|--------------------------------------|----------------------|------------------------|
| Configuração de Barramento Utilizada | 3x100x10 (mm)        | 2x80x10 (mm)           |
| $I_N < I$                            | Sim                  | Sim                    |
| $\theta_t < \theta_{max}$            | Sim                  | Sim                    |

Com base nos resultados apresentados na Tabela 10, verifica-se que as soluções 3x100x10 e 2x80x10 mm satisfazem os critérios de segurança estabelecidos. Nomeadamente, são respeitadas as condições " $I_N < I$ " e " $\theta_t < \theta_{max}$ " confirmando assim a adequação térmica das soluções apresentadas.

Por fim, ficou evidenciado o impacto das características elétricas e mecânicas no comportamento térmico dos barramentos. No caso do Normacel® 12 kV, devido à operação a correntes superiores ( $I_N = 4000$  A e  $I_{th} = 50$  kA), é necessária uma configuração de barramento mais robusta (3x100x10 mm) em comparação com a utilizada no de 17,5 kV (2x80x10 mm). Como resultado, a temperatura total do BG de 17,5 kV, embora dentro dos limites admissíveis, está mais próxima do valor máximo permitido ( $\theta_{max} = 100$  °C).

#### 5. Conclusões

O presente estudo propôs e validou uma metodologia quantitativa para análise dos esforços térmicos em barramentos gerais (BG) de quadros de média tensão (QMT), com aplicação prática em duas configurações distintas da gama Normacel®. Os resultados obtidos através dos cálculos fundamentados nas equações clássicas de dimensionamento térmico demonstraram que ambas as soluções analisadas - 3x100x10 mm para o QMT de 12 kV/50 kA e 2x80x10 mm para o QMT de 17,5 kV/25 kA - garantem margens de segurança adequadas face às correntes nominais de operação, bem como à elevação térmica durante eventos de curto-círcuito.

A análise evidenciou que as correntes máximas admissíveis dos BGs (4135,9 A e 2887,3 A) superam as respetivas correntes nominais (4000 A e 2500 A), assegurando robustez operacional mesmo em cenários de sobrecarga ou perturbações transitórias. Adicionalmente, as temperaturas finais dos barramentos, após simulação de curto-círcuito, mantêm-se inferiores ao limite máximo de 100 °C, validando a conformidade com os requisitos normativos de segurança térmica e operacional.

O correto dimensionamento dos barramentos é determinante para a fiabilidade e longevidade dos sistemas de distribuição, reduzindo a incidência de falhas térmicas, otimizando custos de manutenção e prolongando a vida útil dos equipamentos.

A metodologia de cálculo apresentada garante uma abordagem sistemática e replicável, facilitando a tomada de decisão técnica no processo de seleção e especificação de barramentos para diferentes topologias de QMT, adaptando-se às particularidades de cada projeto.

Do ponto de vista prático, a aplicação desta metodologia contribui para uma maior robustez e eficiência dos sistemas elétricos, promovendo a adoção de soluções sustentáveis e alinhadas com as melhores práticas de engenharia.

Embora existam ferramentas computacionais para automatização destes cálculos, o domínio dos fundamentos físicos e matemáticos por parte dos engenheiros é essencial para a validação crítica dos resultados e para a adaptação das soluções às condições reais de operação.

Recomenda-se, para trabalhos futuros, a realização de estudos complementares que integrem cenários operacionais dinâmicos e não estacionários, bem como a utilização de simulações numéricas avançadas e validação experimental em ambiente industrial. Estas iniciativas permitirão refinar a precisão dos modelos de previsão térmica e ampliar a aplicabilidade da metodologia a um espectro mais vasto de configurações e condições de serviço.

## Referências Bibliográficas

- [1] T. Paiva, "Aparelhagem de Média Tensão: Definição e Aplicação Prática," Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2020.
- [2] E. Figueiredo and S. Ramos, "Gestão Técnica de um Projeto de Quadro de Média Tensão," 2024.
- [3] J. Aupiais and F. Chartier, "Capillary Electrophoresis," in Sample Introduction Systems in ICPMS and ICPOES, 1st ed., D. Beauchemin, Ed., Elsevier, 2020, ch. 6.
- [4] J. Quirino, R. Sobral, and E. Correa, "Modelagem de Dissipação de Calor por Interação entre Aletas e Condutividade Térmica Variável," Rio de Janeiro, 2020.
- [5] Schneider Electric, "Guia Técnico de Média Tensão," Mar. 2022.
- [6] Efacec Power Solutions, "Normacel - Barramento Simples." Accessed: Dec. 01, 2024. [Online]. Available: <https://www.efacec.pt/produtos/normacel-barramento-simples/>
- [7] R. Leite, "Manual do Produto: Normacel 17.5kV," 2024.

