DOI: 10.48011/asba.v2i1.1507

Modelo térmico para barramento de cobre e conexões elétricas para o design interno de painel elétrico

Alesandre Alves * **Maurício de Campos** ** **João Manoel Lenz** ** **Paulo Sérgio Sausen** ** **Airam T. Z. Romcy Sausen** **

* *Mestrando em Modelagem Matemática, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, RS, (e-mail: alesandre.alves@sou.unijui.edu.br).*
** *Departamento de Ciências Exatas e Engenharias, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, RS, (e-mail: campos@unijui.edu.br, joao.dasilva@unijui.edu.br, sausen@unijui.edu.br, airam@unijui.edu.br)*

Abstract: The electricity distribution infrastructure follows rigid and complex arrangements to guarantee the safe availability of electricity supply to cities. Such arrangements are composed of a variety of equipment responsible for the distribution, protection and control of electrical loads at their different levels of electrical power and voltage class. One of the equipment responsible for the distribution, protection and control of the electrical circuits are the controlgears. In this context, the work will present the modeling of the heating generated internally in controlgear due to the environmental, electrical and physical conditions for the arrangements of copper busbars and electrical terminals.

Resumo: A infraestrutura de distribuição de eletricidade segue rígidos e complexos arranjos para garantir a disponibilidade segura no fornecimento de energia elétrica para as cidades. Tais arranjos são compostos por uma variedade de equipamentos responsáveis pela distribuição, proteção e controle das cargas elétricas em seus diversos níveis de potência elétrica e classe de tensão. Um dos equipamentos responsáveis pela distribuição, proteção e controle dos circuitos elétricos são os painéis elétricos. Neste contexto, é apresentado neste trabalho a modelagem do aquecimento gerado internamente nos painéis elétricos devido as condições ambientais, elétricas e físicas para os arranjos dos barramentos de cobre e conexões elétricas.

Keywords: Controlgear; temperature-rise ; copper busbars; electrical terminals;thermal modeling.

Palavras-chaves: Painel elétrico; elevação de temperatura; barramentos de cobre; conexões elétricas; modelagem térmica.

1. INTRODUÇÃO

A eletricidade desempenha um papel fundamental ao lado de outras infraestruturas básicas. A realização de pesquisas, emprego de novas tecnologias e o uso de normas técnicas objetivam aumentar a confiabilidade e estabilidade do sistema de distribuição de energia elétrica. Esses sistemas são naturalmente complexos e possuem um elevado numero de componentes concentrados em painéis elétricos, a concentração de dispositivos elétricos de alta potência geram calor interno aos painéis. Para fabricação dos painéis elétricos deve ser seguidos rígidos padrões no que se refere a temperatura de operação.

Nesse sentido, as normas técnicas para os painéis elétricos estabelecem limites de temperatura para garantir o funcionamento adequado e exigem comprovações com garantia que esses limites não sejam excedidos. As garantias são apresentadas por meio de relatórios de cálculos e ensaios realizados em laboratórios credenciados.

A elevação da temperatura nos painéis elétricos causada pela dissipação térmica nos condutores, contatos, circuitos magnéticos e componentes é um fator importante a ser considerado no desenvolvimento de novas técnicas de construção e operação de equipamentos elétricos. A montagem de painéis elétricos precisa considerar componentes que dissipam energia, em particular os barramentos de cobre e conexões elétricas dentro dos invólucros dos painéis, os quais são fontes internas de geração de calor. As altas temperaturas nos elementos básicos como barramentos e conexões elétricas resultam também em aumento nas resistências elétricas e assim provocam um aquecimento adicional e não benéfico aos equipamentos.

A falta de um modelo termoelétrico para prever e evitar conexões não eficientes, requer a realização de testes ou ensaios elétricos para a validação de arranjos de conexões junto a laboratórios especializados, onde se emprega recursos de tempo e recursos monetários para encontrar o projeto mais adequado. Desde que tenha outra forma de

garantir as conformidades estabelecidas, quando possível evitar a realização de ensaios elétricos físicos nos equipamentos, economiza recursos do projeto e disponibiliza produtos de menor custo em um prazo mais rápido.

A modelagem matemática e a realização de simulações são um caminho para tornar os produtos nacionais mais competitivos. A estrutura de laboratório tecnológicos de ensaios já é uma realidade em diversos países desenvolvidos. Países em desenvolvimento têm muito a ganhar com as simulações em equipamentos para atender os requisitos das normas técnicas e consequentemente garantir o funcionamento adequado.

Nesse trabalho é apresentada a modelagem matemática e computacional que permite a análise do aquecimento do barramento interno de um painel elétrico em relação as normas técnicas. Os resultados obtidos são comparados aos limites de elevação de temperatura indicados nas normas técnicas, para cada parte do painel elétrico avaliando o critério de elevação de temperatura (ΔT).

Os resultados obtidos nas simulações são obtidos utilizando a teoria da "Lei de Joule"juntamente com a teoria da Termodinâmica com a resposta fornecida no domínio do tempo. A principal contribuição desse trabalho é disponibilizar um modelo matemático/computacional, que possibilite avaliar na fase inicial da elaboração de um projeto de painel elétrico o comportamento térmico estimado do arranjo de barramento de cobre em condições de operação, antes da fabricação e ensaio do equipamento, possibilitando que se necessário sejam realizadas as correções de forma antecipada ao projeto.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. Na Seção 2 é apresentada a metodologia utilizada na análise do aquecimento do barramento interno de um painel elétrico. Na Seção 3 são discutidos os resultados obtidos e apresentadas propostas para trabalhos futuros.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A verificação do limite de elevação de temperatura estabelecido pelas normas IEC (2011a), ABNT (2007), IEC (2011b) e ABNT (2016) pode ser executada através de cálculo algébrico ou ensaio denominado de "Tipo"em laboratórios autorizados. Usando o método de cálculo somente é possível verificar o atendimento das fronteiras de elevação de temperatura do conjunto painel até um limite de corrente elétrica, acima dessa fronteira as normas técnicas solicitam uso de ensaios de "Tipo"ou verificação por regras de derivação de equipamentos já ensaiados, pois a influência térmica sobre barramentos de cobre e conexões elétricas dentro de um painel elétrico se torna significativo. Considerando a corrente elétrica do circuito principal é escolhido a forma mais adequada para realizar a avaliação do mesmo. Esses critérios são apresentados na Fig 1.

No método cálculo algébrico a verificação da elevação de temperatura através de cálculo, algoritmos matemáticos de termodinâmica são explorados. Sendo avaliada somente a elevação da temperatura do ar no interior do painel, sem a avaliação e indicação da temperatura nos barramentos de cobre e conexões elétricas conforme ABB (2006a), ABB (2006b) e IEC (1987).

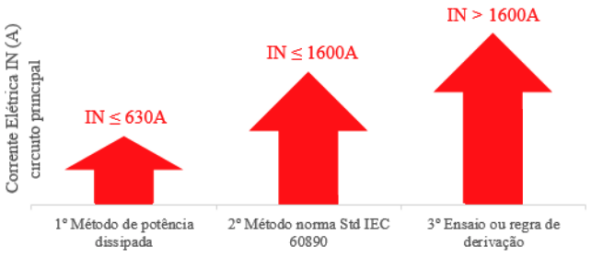

Fig. 1. Métodos de verificação térmica painel elétrico.

Já no ensaio de Tipo, o teste consiste na verificação com corrente elétrica em laboratório. São realizados testes de verificação, estabelecendo que a temperatura de elevação alcance e se mantenha dentro das condições de serviço definidas no projeto. Pontos de temperatura são monitorados dentro e fora de um painel protótipo, com correntes nominais circulando no arranjo de barramentos e conexões. Esses valores são comparados com os valores admissíveis estabelecidos pelas normas ABNT (2007) e ABNT (2016). Se os valores medidos forem menores ou igual aos admissíveis, o teste considera o painel apto para as condições de funcionamento.

As deduções de regras de design derivam de um projeto de painel com arranjo típico já testado, possibilitando variações de arranjo semelhantes a de um projeto com teste já realizado e aprovado. As fontes de calor significativas dentro de um painel elétrico são os caminhos de condução de corrente elétrica do circuito principal, onde estão presentes os equipamentos como disjuntores, fusíveis, barramentos de cobre e conexões elétricas.

Todo condutor elétrico ou conexão elétrica que trabalhe em condições severas, acima das estabelecidas por normas, passam a ser um ponto crítico para o sistema elétrico, com a possibilidade de gerar incêndios e explosões. Acima de um certo valor de elevação de temperatura, essa condição provoca o envelhecimento precoce dos equipamentos elétricos, condutores, isoladores e suportes.

A elevação de temperatura fora das condições indicadas por normas também gera desarmes involuntários de proteções, como disjuntores em painéis elétricos e subestações de distribuição. A corrente elétrica projetada deverá ser capaz de fluir através dos condutores e conexões, por um arranjo físico que favoreça as trocas térmicas, conforme ilustrado na Fig 2.

2.1 Características térmicas em painéis elétricos

Em 1841 o inglês James Prescott Joule publicou a "Lei de Joule", segundo a qual diz que a potência dissipada termicamente de um condutor elétrico é igual ao produto do quadrado da intensidade de corrente elétrica pela resistência elétrica do condutor. Então as temperaturas existentes em todo o conjunto de um painel elétrico de distribuição de potência é o resultado da potência elétrica dissipada em seus equipamentos elétricos com maior influência nos condutores principais conforme Kilindjian (1997), ou seja, em arranjos de barramentos de cobre e conexões, conforme ilustrado nas Fig 3 e 5.

A potência dissipada é dada por:

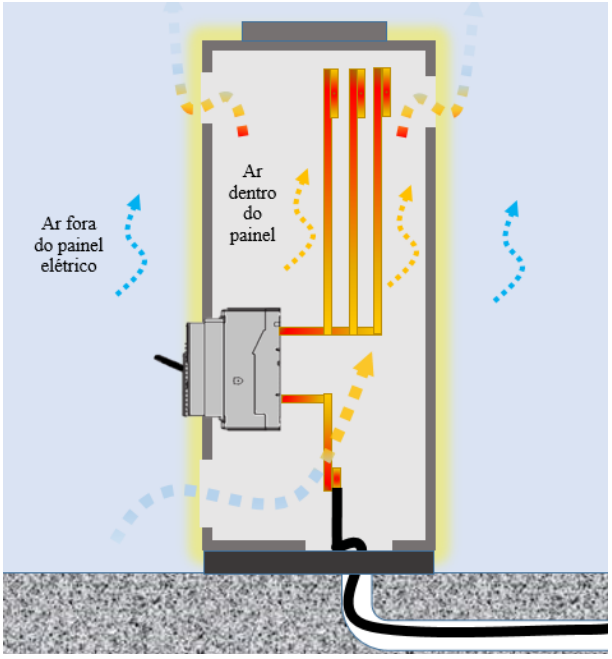

Fig. 2. Fluxo térmico circulante.

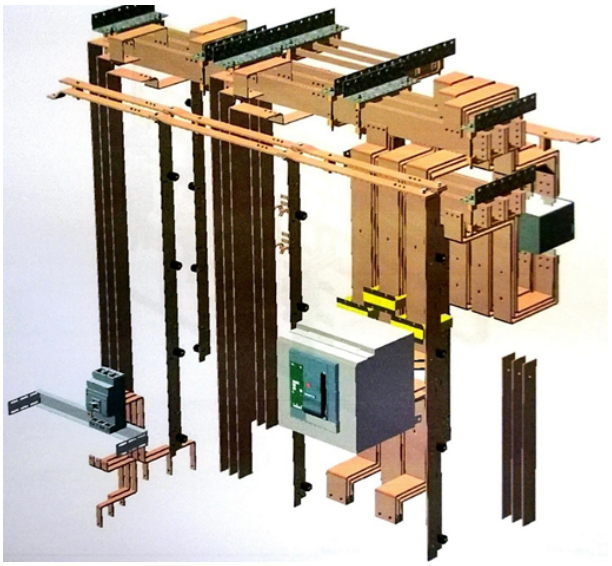

Fig. 3. Arranjo interno de barramento em painel.

$$P_{dissipada} = R \cdot I^2 \tag{1}$$

onde:
$P_{dissipada}$ é a potência elétrica dissipada de cada equipamento associado ao conjunto elétrico em watts (W);
I é a corrente elétrica em ampere (A);
R é a resistência elétrica de cada equipamento elétrico associado ao conjunto elétrico em em Ω.

As fontes de calor consideradas na modelagem são os barramentos de cobre, condutores de conexão e equipamentos elétricos, os equipamentos são considerados "caixas pretas"dissipando calor em vez de estar associado como modelo. A determinação da temperatura de operação é definida pelo cálculo da corrente elétrica máxima que circula no arranjo de montagem do painel elétrico sem que exceda os limites de elevação de temperatura de operação.

Os equipamentos elétricos são considerados como "caixa preta"pois os fabricantes já fornecem o calor dissipado dos mesmos em regime de carregamento nominal de carga. Já os barramentos de cobre e conexões precisam ser modelados usando o principio apresentado na equação 1. A determinação da resistência elétrica de um arranjo de barramento é composta pela resistência elétrica por unidade de comprimento de cada segmento e a resistência de conexão entre os segmentos conforme Chapman and Norris (2014) e ilustrado na Fig 4.

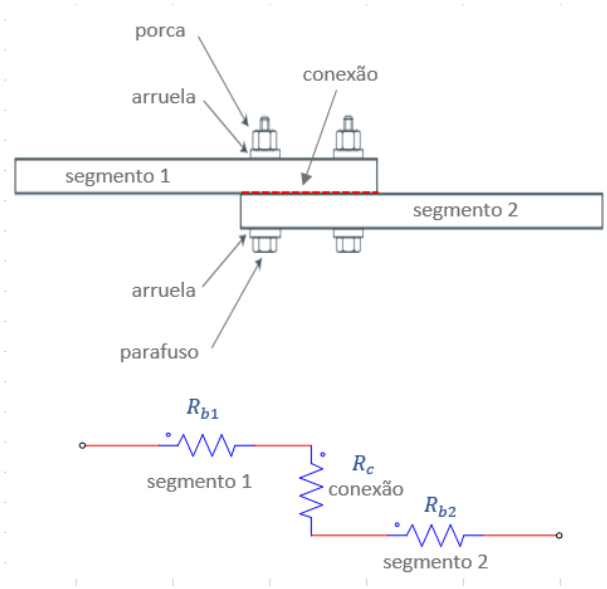

Fig. 4. Resistência arranjo de barramento.

A resistência elétrica do arranjo dos barramentos é definido conforme equação 2:

$$R_{barra} = R_{b1} + R_c + R_{b2} \tag{2}$$

onde:
$R_{b1,b2}$ são as resistências dos segmentos reto em $\mu\Omega$;
R_c é a resistência elétrica da conexão entre dois segmentos em $\mu\Omega$.

A grandeza que relaciona o modelo elétrico com o modelo térmico é a potência dissipada, que no modelo térmico é chamada de fluxo de calor. A potência elétrica gerada pela passagem da corrente elétrica na resistência elétrica associada é dissipada de forma térmica para o ambiente em forma de calor conforme apresentado na Fig 5 .

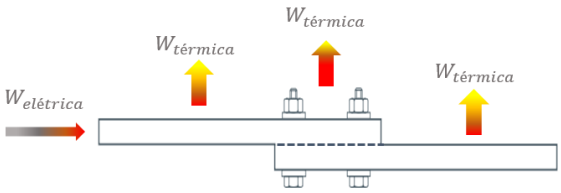

Fig. 5. Dissipação de calor em barramentos.

Os parâmetros físicos necessários para determinação de $R_{b1,b2}$ e R_c são ilustrados na Fig 6.

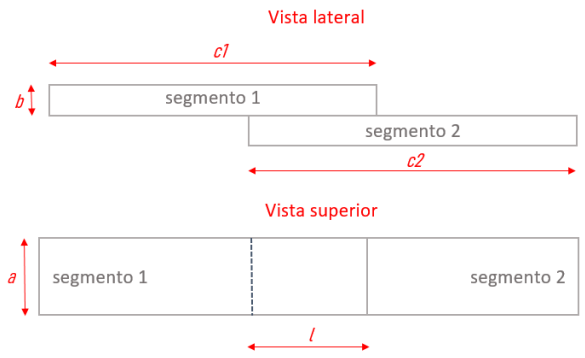

Fig. 6. Arranjo de conexão dos barramentos.

Na Fig 6 pode-se observar que a representa a largura do barramento e b a espessura do barramento. O comprimento dos segmentos do barramento são representados por C_n onde o n representa o número identificador do barramento. Finalmente o comprimento de sobreposição entre as barras para realizar a conexão e representado por l. Todas essas medidas são representadas em mm.

2.2 Determinação da resistência no segmento $R_{b1,b2}$

A determinação da resistência elétrica no segmento reto é dada por:

$$R_{b1,b2} = \rho \cdot \frac{c_n}{(a \cdot b)} \tag{3}$$

onde:
a é a largura do barramento em mm;
b é a espessura do barramento em mm;
c_n é o comprimento do segmento $_n$ do barramento em mm;
ρ é a resistividade elétrica do barramento cobre em $\mu\Omega mm$;

2.3 Determinação da resistência de conexão elétrica R_c

Uma conexão aparafusada é constituída pela união de duas superfícies planas sob pressão controlada, essa condição resulta em uma resistência que depende principalmente dos fatores de atenuação (R_s) e interface da conexão (R_i). A resistência total da conexão, R_c, é dada por:

$$R_c = R_s + R_i \tag{4}$$

onde:
R_s e R_i são resistências elétricas da conexão em $\mu\Omega$

Efeito Streamline ou resistência de atenuação R_s: Quando uma corrente flui através de uma junta formada por dois condutores sobrepostos, as linhas de fluxo de corrente são distorcidas e a resistência efetiva da junta é aumentada, uma vez que a corrente flui apenas através de uma parte do material. Desde que a largura de ambas as barras sejam as mesmas, o efeito de atenuação depende apenas da relação entre o comprimento da sobreposição e a espessura das barras e não da largura conforme Braunovic et al. (2006). Isso é mostrado na Fig 7.

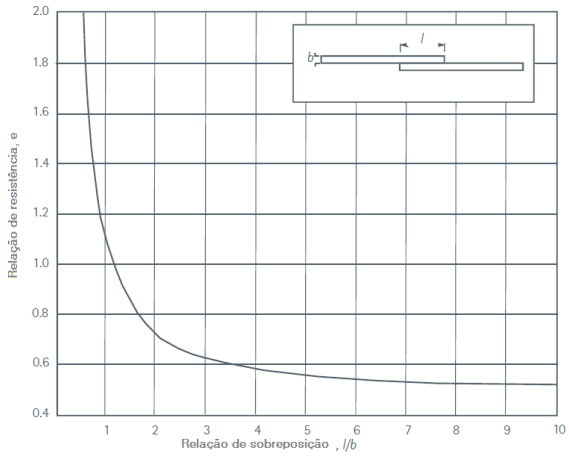

Fig. 7. Efeito de atenuação em conexões sobrepostas.

A densidade de corrente na direção perpendicular à barra é transferida de uma barra para a outra de forma não uniforme, concentrada ao redor das bordas. A Fig 7 mostra a razão entre a resistência de uma conexão devido ao efeito atenuação R_s e a resistência de segmento reto, igual ao condutor R_b, ou seja :

$$e = \frac{R_s}{R_b} = \frac{a \cdot b}{\rho \cdot l} \cdot R_s \tag{5}$$

onde:
a é a largura do barramento em milímetros (mm);
b é a espessura do barramento em milímetros (mm);
l é o comprimento da sobreposição da junção entre as barras em milímetros (mm);
ρ é a resistividade elétrica do barramento cobre em $\mu\Omega mm$;

Consequentemente:

$$R_s = \frac{e \cdot \rho \cdot l}{a \cdot b} \tag{6}$$

A partir do gráfico apresentado na Fig 7, se observa que o efeito de atenuação cai muito rapidamente para proporções l/b até duas vezes e em seguida, muito mais lentamente para valores até dez vezes a relação. Isso significa que na maioria dos casos o efeito de atenuação tem um efeito limitado, pois a sobreposição é geralmente muito maior do que cinco vezes a espessura para permitir espaço para fixação com os parafusos. Não há vantagem em permitir sobreposições muito longas, somente é necessário permitir espaço suficiente para acomodar parafusos suficientes para atingir a pressão de contato necessária. No caso de conexões aparafusadas, os furos dos parafusos também reduzem a eficiência devido ao efeito de atenuação. A taxa de resistência de uma seção de sobreposição aparafusada pode ser estimado por:

$$R_{sb} = \frac{e \cdot \rho \cdot l}{(a - n \cdot d) \cdot b} \tag{7}$$

onde:
d é o diâmetro dos furos em milímetros (mm);

n é o número de furos na largura das barras.

Resistência de interface da conexão, R_i : Existem dois fatores principais que afetam a resistência da interface das superfícies:

A condição das superfícies: na prática, um contato elétrico entre sólidos é formado apenas em áreas discretas dentro da interface de contato e nessas áreas (conhecidas como 'A-Spots') conforme IEC (1998), são os únicos caminhos de condução de corrente. Os 'A-Spots' tipicamente ocupam uma área da ordem de um porcento da área de sobreposição. Obviamente, quanto maior o número de pontos de contato ('A-Spots'), mais uniforme será a distribuição de corrente elétrica na área da junta. Isso pode ser garantido, assegurando que as superfícies dos condutores sejam planas e ásperas.

A pressão total aplicada P: a resistência de conexão normalmente diminui com um aumento no tamanho e número de parafusos usados. Os tamanhos dos parafusos geralmente variam de M6 a M20 com o uso típico de quatro ou seis parafusos. O torque apropriado para cada tamanho de parafuso depende do material do parafuso e da temperatura operacional máxima suportada. A resistência do contato diminui com o aumento da pressão, como mostrado na Fig 8, mas acima de uma pressão de cerca de $30N/mm^2$ há pouca melhora. Na maioria dos casos, não é aconselhável usar pressões de contato inferiores a $7N/mm^2$, sendo preferidas pressões acima de $10N/mm^2$. A resistência de contato para uma junta de uma determinada área de sobreposição é obtida na Fig 8 dividindo a resistência de contato por $1mm^2$ pela sobreposição área em mm^2.

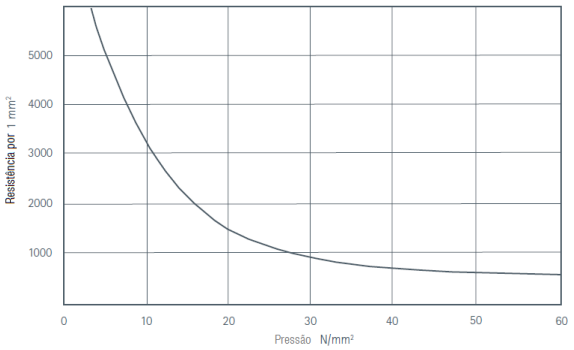

Fig. 8. Efeito da pressão na resistência de contato em uma articulação.

Para juntas aparafusadas, a pressão é aplicada em torno dos orifícios dos parafusos, o uso de mais parafusos resultará em uma distribuição de pressão mais uniforme. Arruelas grandes e grossas podem ser usadas para espalhar a carga. Na prática quando as conexões são montadas, medir a pressão de contato necessária se torna difícil através de uma medição convencional direta, então é necessário uma dedução a partir do torque aplicado aos parafusos, considerando parâmetros como quantidade de parafusos, diâmetro e "Fator Nut", conforme a equação 8.

$$F = \frac{n_p \cdot T}{K \cdot D} \tag{8}$$

onde:
F é a força aplicada na conexão (kN);
n_p é o número de parafusos na conexão;
T é o torque de aperto dos parafusos (Nm);
K é uma constante, muitas vezes referida como o "Fator Nut";
D é o diâmetro nominal do parafuso (mm).

Conforme Park and Cho (2014) o "Fator NUT"depende de vários fatores, incluindo o coeficiente de atrito, o acabamento da superfície e o estado de lubrificação dos fios das roscas e outras superfícies de apoio. É importante controlar a taxa de aplicação do torque, bem como o valor final, os parafusos devem ser apertados gradualmente em rotação. O torque de aperto correto deve ser cuidadosamente determinado para fornecer pressão de contato inicial suficiente à temperatura ambiente, não excedendo a tensão de rendimento do material do parafuso sobre a escala da temperatura de trabalho da conexão. Uma expansão diferencial entre o parafuso e os materiais da barra resultam em um aumento ou diminuição na tensão do parafuso e portanto na pressão de contato, conforme as mudanças de temperatura. A partir da área da junta de conexão em mm^2 e a força resultante é possível determinar a pressão, expressa por:

$$P = \frac{F}{a \cdot l} \tag{9}$$

onde:
P é a pressão aplicada na conexão ($\frac{kN}{mm^2}$);
F é a força aplicada na conexão (kN);
a é a largura do barramento em mm;
l é o comprimento da sobreposição da junção entre as barras em mm;

Na Fig 8, é obtido o valor Y em função da pressão aplicada na conexão, onde Y é a resistência de contato de uma área unitária.
A resistência de interface (R_i), será dada por:

$$R_i = \frac{Y}{a \cdot l} \tag{10}$$

onde:
Y é a resistência de contato de uma área unitária por $1(mm^2)$;
a é a largura do barramento em mm;
l é o comprimento da sobreposição da junção entre as barras em mm;

2.4 Dissipação de calor em barramentos

Existem três formas de dissipação de calor em barramentos de cobre as quais ocorrem em função da propagação de calor por convecção, por condução e por radiação. Os principais fenômenos envolvidos no comportamento do aquecimento de barramentos são os fenômenos de convecção. Através das características do arranjo físico

dos barramentos é possível determinar um modelo elétrico. Este modelo permite determinar a resistência elétrica dos segmentos dos barramentos e na sequencia aplicando-se a "Lei de Joule"é possível determinar a potência dissipada na superfície das barras de cobre. E também, a partir do arranjo físico dos barramentos é possível determinar o modelo térmico. A grandeza que relaciona os dois modelos é a potência dissipada, que no modelo térmico é chamada de fluxo de calor medida em watts.

Transferência de calor por convecção: De acordo com a origem do fluido em movimento, a convecção pode ser natural ou forçada. O calor dissipado por unidade de área por convecção depende da forma, do tamanho do condutor e sua elevação de temperatura em relação a temperatura ambiente. Esse valor geralmente é calculado para condições de ar parado, mas pode ser incrementado consideravelmente se houver um resfriamento forçado de ar. Nesse artigo será considerada a convecção natural nos barramentos e geometria para propagação de calor na forma retangular nos arranjos avaliados. As equações a seguir estimam a perda de calor por convecção de uma superfície em W/m^2 com ar parado, conforme Chapman and Norris (2014). Para superfícies verticais:

$$W_v = \frac{7.66 \cdot \Delta^{1.25}}{c^{0.25}} \tag{11}$$

Para superfícies horizontais:

$$W_v = \frac{5.92 \cdot \Delta^{1.25}}{c^{0.25}} \tag{12}$$

onde:
W_v é o fluxo de calor em um dos segmentos em watts (W);
Δ é a elevação da temperatura em °C;
c é o comprimento do segmento em mm;

Consequentemente a elevação de temperatura em função da potência dissipada ao longo dos segmentos de temperatura será dada por :

Para superfícies verticais:

$$\Delta_{Tv} = \sqrt[1.25]{\frac{W_v \cdot c^{0.25}}{7.66}} \tag{13}$$

Para superfícies horizontais:

$$\Delta_{Th} = \sqrt[1.25]{\frac{W_h \cdot c^{0.25}}{5.92}} \tag{14}$$

2.5 Função de transferência do sistema

A função de transferência é a representação matemática da relação entre a entrada e a saída de um sistema físico. O termo é frequentemente utilizado para se referir exclusivamente a sistemas lineares invariantes no tempo. A maior parte dos sistemas reais possuem características de entrada/saída não-lineares, mas diversos sistemas, quando operados dentro de parâmetros nominais, têm um comportamento próximo do comportamento linear. Nesse sentido, a teoria de sistemas lineares invariantes no tempo é uma representação aceitável do comportamento de sua entrada e saída.

Um sistema tem como função processar um conjunto de dados ou informação na entrada e o modificar gerando um novo conjunto de dados na saída. Nesse caso o conjunto de dados de entrada é a potência dissipada e o conjunto de dados de saída é a elevação de temperatura do ponto avaliado, somando com a temperatura do ar é possível determinar a temperatura do ponto em questão. A função de transferência está em função da frequência, o numerador do sistema depende da resistência térmica e o denominador depende da resistência térmica juntamente com a capacitância térmica, pode ser apresentado na equação 15.

$$G_{(s)} = \frac{R_{t(s)}}{R_{t(s)} \cdot C_{t(s)} \cdot s + 1} \tag{15}$$

onde:
$G_{(s)}$ é a função de transferência elevação de temperatura ΔT em °C;
$R_{t(s)}$ é a resistência térmica ;

$C_{t(s)}$ é a capacitância térmica .

Consequentemente a temperatura em função da potência dissipada ao longo dos segmentos pode ser apresentado na equação 16.

$$T_{x(s)} = P_{dissipada(s)} \cdot \frac{R_{t(s)}}{R_{t(s)} \cdot C_{t(s)} \cdot s + 1} + T_{a(s)} \tag{16}$$

onde:
$T_{x(s)}$ é a temperatura do ponto analisado no arranjo em °C;
$T_{a(s)}$ é a temperatura do ar ao redor do arranjo em °C.

2.6 Blocos do modelo

Para determinar o modelo térmico, o modelo foi divido em blocos elementares. A análise de aquecimento para o arranjo de barramentos inicia a partir da definição do número de segmentos e conexões existentes entre as barras. Para cada segmento de barra deve ser calculado a resistência elétrica com base na geometria dos barramentos, condições ambientais e coeficientes térmicos do cobre, conforme ilustrado na Fig 9.

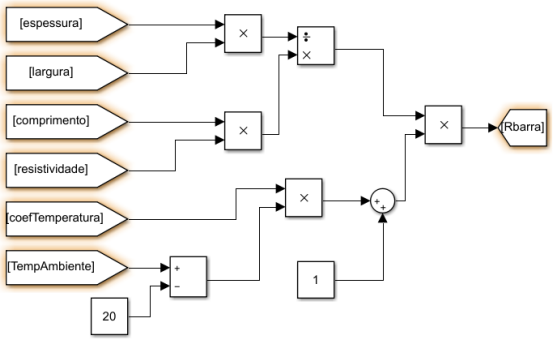

Fig. 9. Equação 3 resistência barra [Rb1,Rb2]

Na sequencia é realizada a análise da conexão entre as barras, que depende da avaliação das resistências elétricas de atenuação e interface, com base na geometria dos barramentos, coeficientes térmicos do cobre, comprimento de sobreposição entre barras, número, diâmetro e torque

de aperto dos parafusos para a junção entre as barras, conforme ilustrado na Fig 10.

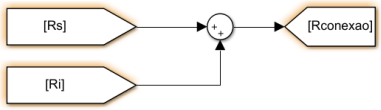

Fig. 10. Equação 4 resistência de conexão Rc

A resistência de atenuação é ilustrada na Fig 11.

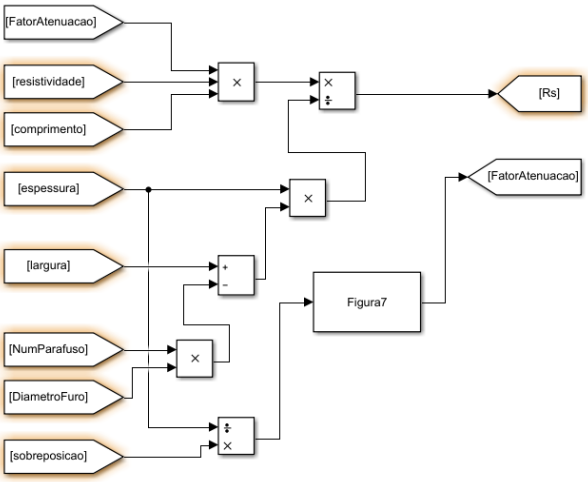

Fig. 11. Equação 7 resistência interface Rs.

A resistência de interface ilustrada na Fig 12

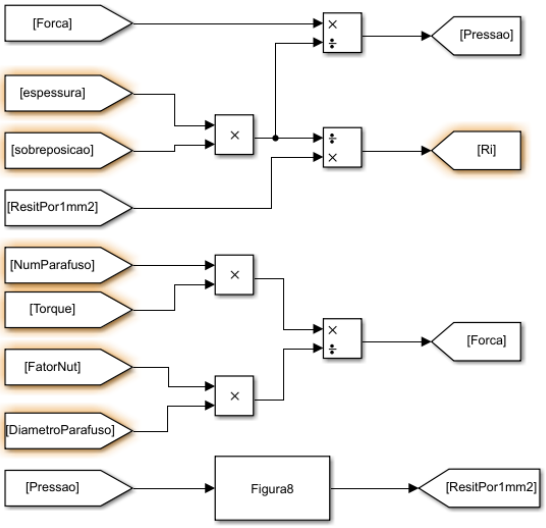

Fig. 12. Equação 10 resistência interface Ri.

A partir da geometria das barras, condições ambiente e de operação se determina os parâmetros de resistência térmica e capacitância térmica para a equação de transferência, então adicionando a temperatura ao redor dos barramentos, obtém a temperatura conforme é ilustrada na Fig 13.

A elevação de temperatura é ilustrada na Fig 14

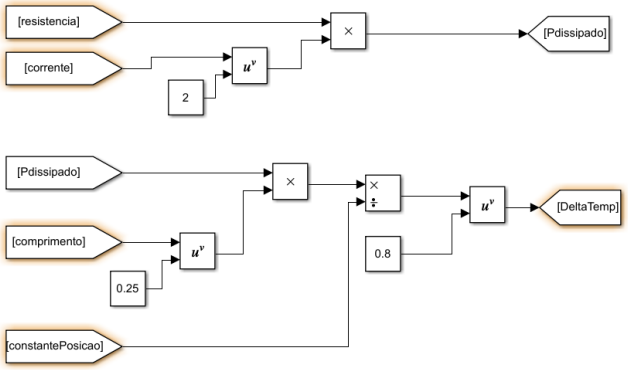

Fig. 13. Equações 11 e 15 elevação de temperatura ΔT.

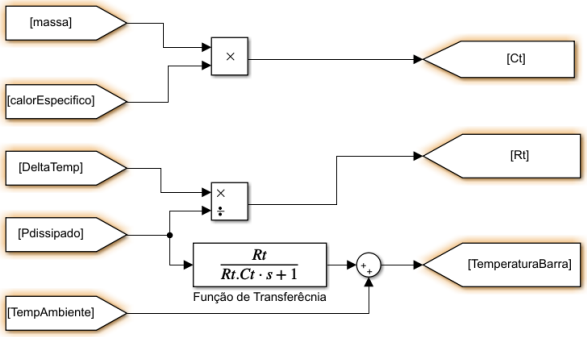

Fig. 14. Equação 16 temperatura nas barras e conexões

2.7 Resultados obtido com o modelo

Para modelo proposto nesse trabalho o valor de referência usado será o da Tabela 1, obtidos da ABNT (2016) tabela 6. A simulação irá apresentar o comportamento de um arranjo de barramento composto por dois segmentos e uma conexão aparafusada.

Tabela 1. Limite máximo temperatura e elevação.

Partes do conjunto	Temperatura °C	Elevação ΔT (k)
Barramentos de cobre	105	70
Conexões aparafusadas	105	70
Terminais de disjuntores	115	80

Serão apresentadas duas condições de simulação, onde o algoritmo para simulação foi implementado no Matlab e os seguintes resultados foram produzidos:

Tabela 2. 1ª Condição de simulação.

Referência de simulação :
Barramento de cobre 63x6.3x1000mm
Barramento de cobre 63x6.3x500mm
Comprimento de sobreposição entre barras 40mm
Temperatura ao ar ao redor das barras 75°C
Conexão com 02 parafusos 12x25mm
Diâmetro dos furos 14mm
Torque de aperto parafusos 45Nm
Barras posição vertical
Corrente elétrica transportada de 500A

A elevação da temperatura da 1ª condição de simulação é ilustrada na Fig 15

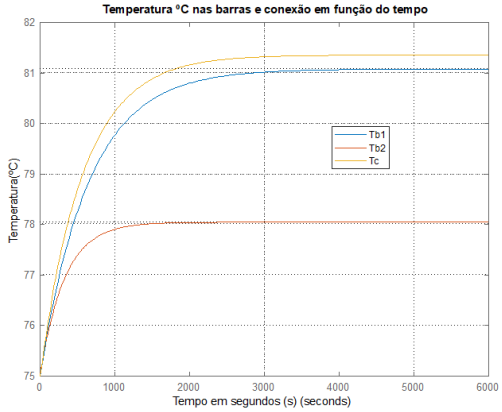

Fig. 15. Resposta arranjo barramento com 500A

Tabela 3. 2ª Condição de simulação.

Referência de simulação :
Barramento de cobre 63x6.3x1000mm
Barramento de cobre 63x6.3x500mm
Comprimento de sobreposição entre barras 40mm
Temperatura ao ar ao redor das barras 75°C
Conexão com 02 parafusos 12x25mm
Diâmetro dos furos 14mm
Torque de aperto parafusos 45Nm
Barras posição vertical
Corrente elétrica transportada de 1000A

A elevação da temperatura da 2ªcondição de simulação é ilustrada na Fig 16

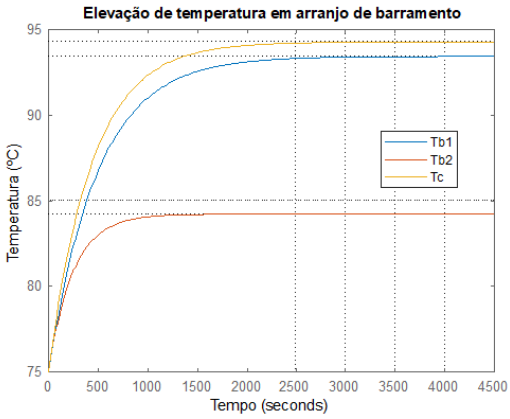

Fig. 16. Resposta arranjo barramento com 1000A

3. CONCLUSÃO

Painéis elétricos são essenciais em uma instalação, e o domínio sobre comportamento térmico desses é indispensável para o funcionamento adequado e com segurança para o equipamento. O projeto de um sistema de barramento para um determinado painel é uma questão complexa, requerendo uma abordagem iterativa para que forneça os níveis de eficiência de energia adequados ao fator de serviço da aplicação. Normas especificam os limites térmicos que não devem ser excedidos, exigindo muito dos profissionais na concepção de invólucros de painéis elétricos. O uso da experiência a partir de ensaios elétricos combinado a uma modelagem matemática do sistema, torna possível a construção de algoritmos que podem facilitar as tarefas dos projetistas, amparados por recursos computacionais. O modelo proposto utilizou o método algébrico junto com o conceito de programação em blocos do Simulink para validar o conceito apresentado, bem como para simular e comparar o comportamento em pontos específicos em um painel elétrico. Nessas simulações o objetivo foi ilustrar o comportamento nas barras de cobre e conexões, pontos criticos de um painel elétrico de distribuição. Apesar da simulações não substituem os resultados de laboratório, elas podem agilizar o desenvolvimento de um projeto. Essas simulações permitem que uma análise detalhada possa ser realizada estimando parâmetros e condições de operação antes que os equipamentos elétricos sejam submetidos a testes e ensaios. Desta forma é possível minimizar erros de projeto e concepção. Além disso o custo de simulação é irrelevante se comparado ao processo de ensaio em laboratório. A partir dos modelos elétrico e térmico, são possíveis então um conjunto de análises, como por exemplo a avaliação e testes do projetos antes da fabricação. Pode-se ainda realizar a simulação de performance de equipamentos em condições plenas de trabalho, bem como antecipar diagnósticos para manutenções. Por fim pode-se combinar o sistema físico com o digital para obter um monitoramento e previsões em tempo real de pontos críticos.

REFERÊNCIAS

ABB, S. (2006a). *ABB circuit-breakers inside LV switchboards*. 04 Technical Application Papers.

ABB, S. (2006b). *ABB Switchgear Manual*. 11 th revised edition - ABB.

ABNT (2007). Conjuntos de manobra e comando de alta-tensão em invólucro metálico para tensões acima de 1 kV até e inclusive 52 kV. *NBR-IEC-62271-200*, 1–76.

ABNT (2016). Conjuntos de manobra e comando de baixa-tensão - Parte 1: Regras Gerais. *NBR-IEC-61439-1*, 1–136.

Braunovic, M., Konchits, V., and Myshkin, N. (2006). *Electrical Contacts - Fundamentals, Applicatios and Technology*. Taylor Francis Group.

Chapman, D. and Norris, T. (2014). *Copper for Busbars Guidance for Design and Installation*. Copper Development Association.

IEC (1987). A method of temperature-rise verification of low-voltage switchgear and controlgear assemblies by calculation - $2^{nd}ed.IEC\text{-}60890, 1 - -54$.

IEC (1998). Guidance concerning the permissible temperature rise for parts of electrical equipment, in particular for terminals. $2^{nd}ed.IEC\text{-}60943, 1 - -128$.

IEC (2011a). High-voltage switchgear and controlgear – Part 1: common specifications. *IEC-62271-1*, 1–252.

IEC (2011b). IEC Low-Voltage Switchgear and Controlgear Assemblies - Part 2: Power Switchgear and Controlgear Assemblies, Part 2. *IEC 61439-2*, 1–51.

Kilindjian, C. (1997). *Thermal study of LV electric switchboards*. Cahier technique - Groupe Schneider.

Park, S.W. and Cho, H. (2014). A practical study on electrical contact resistance and temperature rise at at the connections of the copper busbars in switchgears. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A*.