

# Comportamento Térmico dos Motores de Tração em Corrente Contínua

José Luiz Borba \*

\* VALE S.A. - *Capacitação e Inovação*

*Av. Dante Michelini, 5500, CEP: 29090-900 - Vitória - Espírito Santo*

\* UFES – *Departamento de Engenharia Elétrica*

*Av. Fernando Ferrari, 514, CEP: 29075-910 - Vitória - Espírito Santo*

e-mail: jose.borba@vale.com

## Resumo

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um modelo térmico dos motores de tração em corrente contínua pertencentes às frotas de locomotivas da Vale, uma vez que o comportamento térmico do motor é que vai definir a solicitação crítica a que o motor será submetido.

O modelo desenvolvido baseia-se em equações bastante simples e as simplificações adotadas são perfeitamente aceitáveis para fins de dimensionamento dos trens tipos, conforme já verificado em casos reais onde o mesmo foi aplicado.

Este método também pode ser utilizado para análise do comportamento térmico dos motores de tração em corrente alternada.

**Palavras-Chave:** Locomotivas, Motor de Tração, Perfil Térmico, Modelo Térmico

## 1 Introdução

É de capital importância para uma ferrovia o ótimo desempenho de seus trens conforme as necessidades dos fluxos de carga.

Teoricamente, um motor elétrico terá uma probabilidade maior de não apresentar falhas em seu isolamento por degeneração devida ao acréscimo de calor, desde que a sobre elevação de temperatura a que for submetido durante seu funcionamento permaneça dentro dos limites previstos em norma para sua classe de isolamento.

É lícito então se pensar na seguinte tese geral:

*Qualquer das partes de um motor de tração, incluindo o isolamento, tem uma maior probabilidade de falhar devido à fadiga mecânica associada à elevação da temperatura acima dos limites previstos em norma.*

Portanto, a correta utilização da frota de locomotivas com otimização econômica e sem redução da sua vida útil, determina o estabelecimento de um quadro de tração nos

diversos trechos da ferrovia de modo que as seguintes condições sejam atendidas:

- Os motores de tração devem ser capazes de fornecer o conjugado exigido pela carga nas condições normais de operação.
- A temperatura do coletor e dos enrolamentos da armadura, dos polos de excitação, dos polos de comutação, dos motores de tração não deve ultrapassar o valor limite definido pela classe de isolamento.

O problema pode ser resumido da seguinte maneira:

*Como carregar um trem no perfil de um trecho da ferrovia, com um horário pré-estabelecido, de maneira que todos os motores de tração não ultrapassem a sobre elevação de temperatura admitida pela sua classe de isolamento.*

A solução desse problema não é fácil e mesmo as formas práticas de prever a temperatura não têm ainda resultados rigorosos.

Somente o completo conhecimento das condições térmicas dos motores de tração, é que dará a aceitação final do trem-tipo, como otimização do uso da unidade de tração no trecho considerado.

O conhecimento das curvas de carga dos motores de tração considerado para as mesmas condições de operação de marcha, admitida para o seu deslocamento no trecho da ferrovia onde realmente vai trafegar, permite calcular a sobrecarga térmica dos motores de tração em relação aos valores nominais do regime contínuo.

Atenção especial deve ser dada ao comportamento térmico da armadura, dos polos de excitação, dos polos de comutação e do coletor, pois, valores de temperatura acima dos admitidos pela classe de isolamento dos seus enrolamentos, alcançados ao longo de certo trecho da via permanente, significarão que o trem-tipo considerado é inaceitável.

Por outro lado, essas temperaturas não podem ficar muito abaixo das máximas admitidas pelas normas, pois isto significaria perda de tração na adoção do trem-tipo.

Existem vários métodos que podem ser usados para prever a temperatura, dentre os quais o chamado *Perfil Térmico*.

## 2 Modelo Térmico do Motor de Tração

Quando uma corrente elétrica circula por um condutor, parte dela é utilizada na produção de calor pelo chamado efeito joule.

O condutor absorve uma parte desse calor produzido, aquecendo-se, e o restante se dissipa para o exterior, direta ou indiretamente.

No entanto, a resistividade do condutor de um circuito sob um regime de tensão elétrica constante varia com a temperatura conforme a expressão:

$$R_{quente} = \frac{k + T_{quente}}{k + T_{frio}} \cdot R_{frio}$$

$R_{quente}$   $\Rightarrow$  Resistência do condutor a quente [ $\Omega$ ];

$T_{quente}$   $\Rightarrow$  temperatura do condutor a quente [ $^{\circ}\text{C}$ ];

$k$   $\Rightarrow$  Constante de temperatura do condutor [ $^{\circ}\text{C}$ ];

= 235 °C para o cobre;

= 255 °C para o alumínio;

$T_{frio}$  ⇒ temperatura do condutor a frio [°C].

$R_{frio}$  ⇒ Resistência do condutor a frio [Ω];

Na realidade, não só a resistividade varia com a temperatura, mas também outras características do condutor, como:

- Diâmetro;
- Massa específica;
- Calor específico;
- Coeficiente de transmissão de calor.

Uma vez conhecidas as leis que governam as variações citadas, é possível considerá-las todas.

Todavia, o complexo tratamento matemático a ser efetuado poderá não compensar os erros cometidos com as simplificações que podem ser adotadas.

O motor de tração é um corpo não homogêneo que tem em seu interior diferentes fontes de calor, de desiguais intensidades, produzidas por seus circuitos, compostos pelo comutador e pelos enrolamentos de armadura, de campo e de interpolo, que apresentam diferentes sobre elevações de temperatura.

A transmissão de calor de um condutor isolado, que é parte dos enrolamentos do motor de tração, se dá para o núcleo magnético sobre o qual está enrolado o condutor, depois para outras partes do motor, e então para o exterior.

Entram em jogo diversos valores do coeficiente de transmissão do calor, vários calores específicos e várias superfícies de transmissão do calor que estão em contato com gases ou líquidos

Isso, torna o caso mais complexo ainda.

Usualmente o maior interesse recai sobre a temperatura dos enrolamentos de campo e de interpolo, onde está o sistema isolante, contudo, em alguns casos tem-se interesse na determinação do ponto mais quente da armadura, do comutador ou da superfície da carcaça.

Para os objetivos dessa análise, vamos admitir que:

- O motor de tração será associado a um corpo homogêneo submetido a uma única fonte de calor em seu interior.
- Determinadas grandezas características do motor são invariáveis com o tempo e com a temperatura.
- Após um determinado tempo as sobre elevações de temperatura ficam proporcionais entre si.

Considerando que no instante inicial o motor está em equilíbrio térmico com o ambiente, isto é, a sobre elevação inicial é zero, num intervalo infinitesimal de tempo  $dt$ , a quantidade de calor produzido menos a quantidade de calor dissipado, resulta na quantidade de calor que elevará a temperatura do motor.

A equação do aquecimento do motor é:

$$Q \cdot dt - D \cdot \theta \cdot dt = m \cdot c \cdot d\theta$$

$Q$  ⇒ Quantidade de calor produzido no interior do motor na unidade de tempo  
[Joule/seg] = [W];

$D$  ⇒ Calor dissipado por unidade de tempo em cada unidade de temperatura [W/°C];

$\theta$   $\Rightarrow$  Sobre elevação da temperatura do motor em relação ao ambiente [ $^{\circ}C$ ];

$m$   $\Rightarrow$  Massa do motor [ $kg$ ];

$c$   $\Rightarrow$  Calor específico do motor admitido como sendo um corpo homogêneo [ $Joule/kg/^{\circ}C$ ].

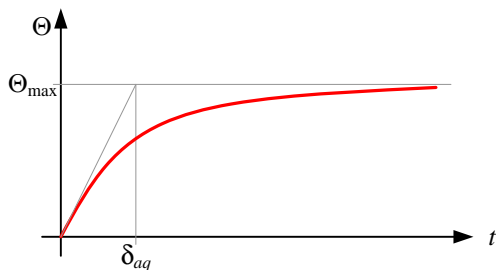
A partir dessa expressão, podemos exprimir a transformação térmica pela seguinte equação diferencial:

$$\frac{d\theta}{dt} + \frac{D}{m \cdot c} \cdot \theta = \frac{Q}{m \cdot c}$$

que admite como solução:

$$\theta = \theta_{m\acute{a}x} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\delta_{aq}}}\right)$$

A expressão indica uma lei exponencial para o crescimento da temperatura do motor.



**Figura 1 - Função de aquecimento do motor**

A constante de tempo de aquecimento do motor, que exprime a taxa de crescimento da temperatura, é dada por:

$$\delta_{aq} = \frac{m \cdot c}{D}$$

Seu valor independe da intensidade da corrente e é sempre o mesmo para um dado motor em idênticas condições, qualquer que seja o regime de carga.

A temperatura do motor quando aquecido tende de forma assintótica para a temperatura  $\theta_{m\acute{a}x}$ , que somente será atingida num tempo suficientemente grande, isto é,

quando ocorre o equilíbrio entre as quantidades de calor produzido e dissipado, cessando a elevação de temperatura do motor, que então fica estacionária em:

$$\theta_{m\acute{a}x} = \frac{Q}{D}$$

As constantes  $\theta_{m\acute{a}x}$  e  $\delta_{aq}$  devem ser determinadas experimentalmente através da realização do ensaio de elevação de temperatura, com o motor na configuração back-to-back, quando é obtida a curva de elevação da temperatura do motor de tração em regime permanente e a plena carga.

A equação:

$$\theta = \theta_{m\acute{a}x\ nom} \cdot \frac{(1 - \eta) \cdot P_{entrada}}{(1 - \eta_{nom}) \cdot P_{entrada\ nom}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\delta_{aq}}}\right)$$

descreve o comportamento da sobre elevação da temperatura de um motor com perdas constantes e dissipação constante durante o seu aquecimento.

Podemos observar que quanto maior for a perda de potência em percentagem da potência total de entrada, maior será a potência térmica e mais quente o motor funcionará, ou seja, maior será o aumento da sua temperatura.

A equação que descreve o comportamento da sobre elevação da temperatura na frenagem de um motor com perdas constantes e dissipação constante durante o seu aquecimento é:

$$\theta = \theta_{m\acute{a}x\ nom} \cdot \frac{\left(\frac{1}{\eta} - 1\right) \cdot P_{sa\acute{i}da}}{(1 - \eta_{nom}) \cdot P_{entrada\ nom}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\delta_{aq}}}\right)$$

Se o motor é desligado, a fonte de calor desaparece e num intervalo infinitesimal de tempo  $dt$ , a quantidade de calor dissipado resulta na quantidade de calor que reduzirá temperatura do motor:

No caso de resfriamento, a redução de temperatura será definida pela equação:

$$-D \cdot \theta \cdot dt = m \cdot c \cdot d\theta$$

de onde podemos obter a equação diferencial que descreve o comportamento do decremento da temperatura de um motor de tração com perdas constantes e dissipação constante durante o seu resfriamento:

$$\frac{d\theta}{dt} + \frac{D}{m \cdot c} \cdot \theta = 0$$

que admite como solução:

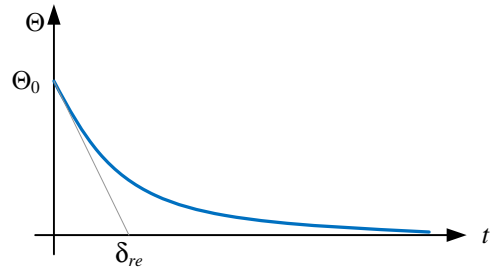
$$\theta = \theta_0 \cdot e^{-\frac{t}{\delta_{re}}}$$

onde  $\theta_0$  é a temperatura inicial do resfriamento e:

$$\delta_{re} = \frac{m \cdot c}{D}$$

é a constante de tempo de resfriamento do motor, que exprime a taxa de decremento da temperatura.

A expressão indica uma lei exponencial para o decremento da temperatura do motor, simétrica em relação à do aquecimento.



**Figura 2 - Função de resfriamento do motor**

As constantes de tempo  $\delta_{re}$  e  $\delta_{aq}$  têm sempre um único valor para um mesmo motor em idênticas condições.

No entanto, deve ficar bem claro que as constantes de tempo  $\delta_{re}$  e  $\delta_{aq}$  especificadas para cada um dos regimes, são relacionadas a certa vazão de ar de refrigeração.

Normalmente, durante a operação de resfriamento dos motores de tração, a ação dos sopradores de resfriamento é reduzida ou até mesmo totalmente paralisada, o que aumenta o tempo de resfriamento.

Para compensação dessa perda de refrigeração do motor, é razoável considerar que:

$$\delta_{re} = 1,5 \cdot \delta_{aq}$$

A determinação do perfil térmico do motor de tração pode ser feita admitindo-se as duas situações distintas, aquecimento e resfriamento.

A equação representativa o caso genérico de aquecimento e resfriamento é expressa por:

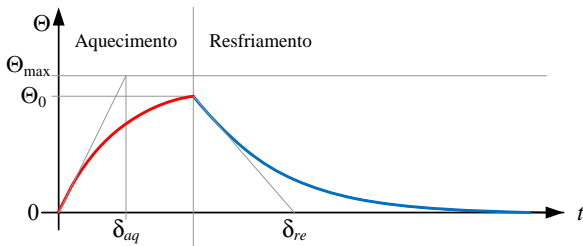
$$\theta = \theta_{m\acute{a}x\ nom} \cdot \frac{(1 - \eta) \cdot P_{entrada}}{(1 - \eta_{nom}) \cdot P_{entrada\ nom}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\delta_{aq}}}\right) + \theta_0 \cdot e^{-\frac{t}{\delta_{re}}}$$

e para o motor em frenagem dinâmica, por:

$$\theta = \theta_{m\acute{a}x\ nom} \cdot \frac{\left(\frac{1}{\eta} - 1\right) \cdot P_{sa\acute{i}da}}{(1 - \eta_{nom}) \cdot P_{entrada\ nom}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\delta_{aq}}}\right) + \theta_0 \cdot e^{-\frac{t}{\delta_{re}}}$$

e para o caso genérico, por:

$$\theta = \theta_{m\acute{a}x} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\delta_{aq}}}\right) + \theta_0 \cdot e^{-\frac{t}{\delta_{re}}}$$



**Figura 3 - Curva de aquecimento e resfriamento do motor**

Como a locomotiva não tem um regime fixo de trabalho, e conseqüentemente os motores também não, após cada intervalo de observação devemos verificar o valor da diferença:

$$\theta_{dif} = \theta - \theta_{m\acute{a}x\ nom}$$

$\theta_{dif} > 0$   $\Rightarrow$  Há uma sobrecarga térmica propriamente dita, cujo valor indicado pelo cálculo, revelará seu mau funcionamento em termos de risco térmico;

$\theta_{dif} = 0$   $\Rightarrow$  O regime operacional estabelecido para o trem-tipo, no trecho considerado da ferrovia, é equivalente ao regime contínuo do motor;

$\theta_{dif} < 0$   $\Rightarrow$  O regime operacional estabelecido está abaixo dos valores nominais, indicando que os motores de tração trabalham aliviado, o que, em

termos ferroviários, representa perda de tração na utilização de suas unidades.

É importante notar que, o que define uma sobrecarga térmica para um trem-tipo no trecho considerado da ferrovia, é o sinal da diferença e não a relação entre correntes entre dois intervalos consecutivos.

Em outras palavras a corrente pode diminuir de um intervalo para outro e os motores podem assim mesmo sofrer uma sobrecarga térmica.

Portanto, a sobrecarga térmica depende do passado das temperaturas alcançadas pelo motor de tração.

### 3 Conclusões

O perfil térmico dos trens-tipo que trafegam na ferrovia pode ser traçado pela aplicação dos dados de viagem obtidos de registradores de eventos instalados nas locomotivas às equações desenvolvidas.

Das aplicações realizadas verificamos que a sobrecarga térmica depende do passado das temperaturas alcançadas, pois ela é atingida mesmo que o maquinista respeite todos os limites de tempo/corrente estabelecidos, mas não observe um intervalo de tempo mínimo necessário para o resfriamento dos motores de tração.

A definição do quadro de tração e de como carregar um trem-tipo no perfil de um trecho da ferrovia sem que a sobrecarga térmica dos motores de tração seja atingida, pode passar pela aderência do perfil térmico aos softwares de simulação específicos utilizados.

#### 4 Referências Bibliográficas

- [1] Borba – J. L. -**Material de Tração** - Apostila do Curso de Pós-graduação em Engenharia Ferroviária - Instituto de Educação Continuada da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais - IEC-PUCMG
- [2] **Tratado de Estradas de Ferro - Material Rodante** - Vários Autores - Editores: José Eduardo Sabóia Castelo Branco e Ronaldo Ferreira
- [3] Dutra; Polloni; Waneck; Colombini - Siemens - **Tração Elétrica** - Volume 1- Livraria Nobel
- [4] Dutra; Polloni; Waneck; Colombini - Siemens - **Tração Elétrica** - Volume 2 - Livraria Nobel
- [5] Lobosco; Dias - Siemens - **Seleção e Aplicação de Motores Elétricos** – McGRAWHill
- [6] CAVAZZONI, Fernando A. - **Motor Elétrico de Tração de Corrente Contínua** - 1ª ed - Editora o Lutador - 2008.
- [7] **Manuais de Manutenção de Locomotivas** - General Motors Corporation - Electro Motive Division
- [8] **Ensaio em um Motor de Tração Modelo D31** - Relatório de Ensaio nº 30.660.1 - Instituto de Pesquisas tecnológicas - IPT
- [9] KOSOW, Irwin L. - **Máquinas Elétricas e Transformadores** - 15ª ed - Editora Globo - 1996.
- [10] Alfonso Martignoni - **Máquinas Elétricas de Corrente Contínua** - Editora Globo
- [11] João Mamede Filho - **Instalações Elétricas Industriais** - LTC Editora