

---

# MODELAGEM DA DESMAGNETIZAÇÃO DE ÍMÃS DE TACÔMETRO

---

Caio E. L. Neves\*

Júlio Carlos Teixeira\*\*

Renato Borenstein\*\*\*

Ricardo S. Hessel\*\*\*\*

João S. Lahorgue da Cunha\*\*\*\*\*

## Resumo

A informação da velocidade real de deslocamento de certos trens é baseada em sinais elétricos gerados por dispositivos tacogeradores. A desmontagem dos tacômetros e a retirada do rotor podem ocasionar a desmagnetização de seus ímãs, resultando na diminuição da amplitude dos sinais elétricos produzidos. Dessa forma, podem ocorrer interpretações erradas de velocidade pelos equipamentos de bordo, resultando em velocidades reais maiores que os limites de segurança para o tráfego na via. Este trabalho concentra-se em avaliar os efeitos das operações de desmontagem no comportamento de um tacômetro, apresentando, por meio de análise teórica e simulação, soluções que evitam a desmagnetização de seus ímãs.

**Palavras-chave:** Sinais elétricos, tacogeradores, desmagnetização de ímãs.

---

\* Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT). *E-mail:* caio@ipt.br

\*\* Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT). *E-mail:* teixeira@ipt.br

\*\*\* Empresa de Trens Urbanos de Porto Alegre (Trensurb). *E-mail:* rborenstein@trensurb.com.br

\*\*\*\* Empresa de Trens Urbanos de Porto Alegre (Trensurb). *E-mail:* rhessel@trensurb.com.br

\*\*\*\*\* Empresa de Trens Urbanos de Porto Alegre (Trensurb). *E-mail:* jcunha@trensurb.com.br

### **Abstract**

The real speed information movement of certain trains is related to tachogenerators devices electrical signals. The tachometer disassembly and the rotor removing may demagnetize the magnets, reducing the electrical signs amplitude. These behavior leads on board equipment speed measurement problems, with real speeds above the limits for safety way traffic. This work is related to the disassembly operation effect on the tachometer behavior, and presents solutions to avoid magnet demagnetization thought simulation techniques as well as theoretical analysis.

**Keywords:** Electrical signals, tachometer, magnet demagnetization.

## 1 INTRODUÇÃO

Certos modelos de trens elétricos utilizam dispositivos tacogeradores ou tacômetros para informação da velocidade real de deslocamento da composição.

Os tacômetros são dispositivos acoplados nos eixos do truque do trem, conforme pode ser visto na Figura 1. A partir da rotação do eixo, o tacômetro produz sinais elétricos (tensão e frequência, variáveis e proporcionais à rotação do eixo) que são enviados ao velocímetro situado na cabine e aos equipamentos de bordo responsáveis pela monitoração automática de velocidade e pelo controle das condições de segurança do trem na via.



**Figura 1** Tacômetro instalado no truque do trem.

Fonte: Acervo dos autores.

Manutenções corretivas efetuadas nos tacômetros, que implicam sua desmontagem e retirada do rotor, podem resultar na perda da indução remanente (desmagnetização) dos ímãs internos do equipamento. A desmagnetização dos ímãs resulta na diminuição da amplitude dos sinais elétricos produzidos pelo tacômetro, o que pode gerar interpretações erradas dos equipamentos de bordo e causar velocidades reais da composição maiores que os limites de segurança de tráfego especificados para os diferentes trechos da via.

---

## 2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho consistiu em avaliar os efeitos das operações de desmontagem no comportamento típico de um tacômetro e as possíveis causas que provocaram sua desmagnetização.

---

## 3 MATERIAIS

A Empresa de Trens Urbanos de Porto Alegre (Trensurb), operadora de transporte de massa da região metropolitana de Porto Alegre, cedeu para o Laboratório de Avaliação Elétrica do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) para efeitos de avaliação um tacômetro da marca Hitachi, modelo AG20B, utilizado em seus trens de tração elétrica. Nesse equipamento, havia sido constatado o efeito de desmagnetização dos ímãs devido à desmontagem e retirada do rotor.

---

## 4 MÉTODOS

Inicialmente, realizou-se uma inspeção visual ainda com os componentes fixos à carcaça do tacômetro, de forma a verificar os princípios de funcionamento (Figura 2).



**Figura 2** Tacômetro.

Fonte: Acervo dos autores.

Foi constatado que se tratava de um equipamento que funciona pelo princípio da variação de relutância.

O tacômetro foi desmontado para verificação dos detalhes construtivos e obtenção de dados de engenharia sobre as variáveis mais importantes.

Para a determinação dos efeitos de desmagnetização dos ímãs e elaboração das retas de carga destes, foram necessárias simulações das distribuições das linhas de campo magnético no interior do tacômetro.

As simulações dessas linhas foram feitas com auxílio do programa denominado Femm, disponível na internet (<http://femm.foster-miller.net/index.html>). Para isso, foi necessário desenhar em escala a seção transversal do tacômetro. As dimensões dos principais componentes foram obtidas através de medições do rotor, estator e ímãs, feitas com o auxílio de um paquímetro e uma régua calibrados. Também se efetuaram medidas de profundidade, largura e número de dentes do rotor e estator.

Como as formas das peças do tacômetro são complexas, optou-se pelo uso do programa AutoCAD® para desenhá-las e, em seguida, inseri-las no Femm para as simulações. Realizou-se um equacionamento básico das principais grandezas dos ímãs e de suas curvas de magnetização teóricas. Em seguida, foram realizadas simulações das linhas de campo com o propósito de avaliar os efeitos das operações de desmontagem no comportamento típico de tacômetros desse tipo.

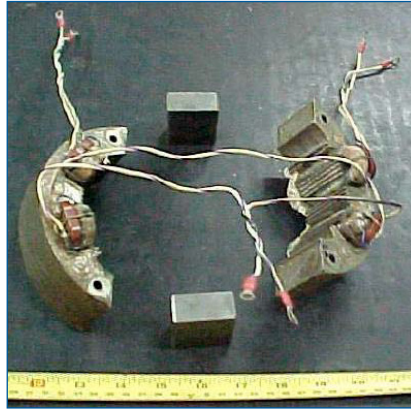
## 5 PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO

A Figura 3 mostra, da esquerda para a direita, o rotor, o estator e a carcaça do tacômetro. Os sensores de velocidade, vistos na Figura 4, são constituídos de quatro bobinas enroladas nas culatras, onde é induzida tensão com frequência proporcional à velocidade de rotação do rotor. Duas dessas bobinas estão conectadas em série. Dessa forma, três enrolamentos são disponíveis ao usuário.



**Figura 3** Rotor, estator e carcaça do tacômetro.

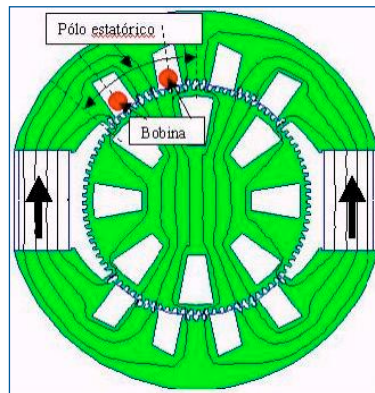
Fonte: Acervo dos autores.



**Figura 4** Estator, bobinas de campo e ímãs.

Fonte: Acervo dos autores.

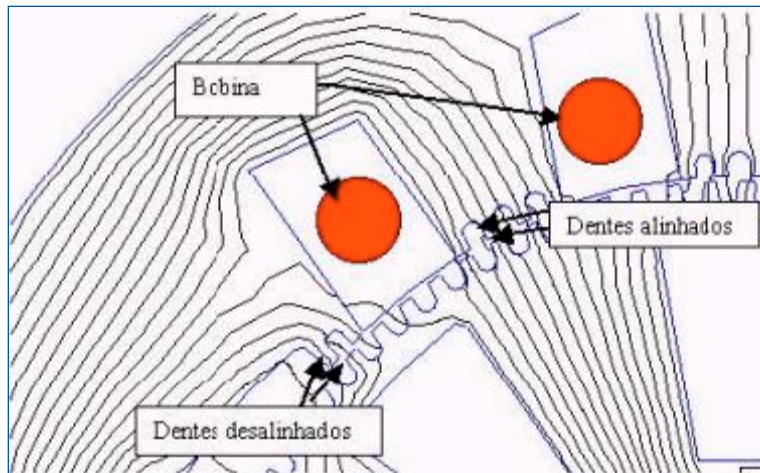
Os ímãs magnetizados, representados por setas na Figura 5, possuem a função de criar um campo magnético (ou um fluxo magnético total) que atravessa o entreferro da máquina. Parte desse fluxo é captada pela bobina e parte se fecha por outros caminhos. O fluxo concatenado com a bobina depende da posição do rotor.



**Figura 5** Distribuição das linhas de campo magnético no tacômetro.

A Figura 6 ilustra as linhas de campo em uma das bobinas e mostra o alinhamento entre os dentes do estator e do rotor na região delimitada pela bobina. Nessa condição de alinhamento, a maior parte do fluxo magnético gerado pelo ímã tende a ser dirigido para dentro da bobina, pois os dentes situados ao lado desta estão desalinhados, formando um caminho de maior relutância magnética.

Entretanto, se o rotor girar ligeiramente, ocorrerá o desalinhamento entre os dentes do estator e do rotor na região da bobina, o que resultará em um aumento da relutância, fazendo com que a maior parte do fluxo magnético se feche por outros caminhos, diminuindo o fluxo que passa pela bobina.



**Figura 6** Linhas de campo magnético passando pela bobina.

## 5.1 Equações fundamentais

Sabe-se que a variação de fluxo magnético passando por uma bobina ( $\Phi$ ) faz surgir nos terminais desta uma força eletromotriz induzida (FEM), dada por:

$$FEM = -d\Phi / dt \quad (1)$$

No caso de um tacômetro, a força eletromotriz induzida nas bobinas possui frequência proporcional ao número de dentes do rotor e à sua velocidade de rotação (SIEMON, 1980). Caso a bobina não esteja conectada a nenhuma carga e o rotor gire, a amplitude da FEM será proporcional à variação de fluxo que passa pela bobina.

## 5.2 Cálculo do fluxo induzido pelo ímã

Em uma primeira aproximação, pode-se afirmar que todo o fluxo induzido pelo ímã chega aos polos do estator e atravessa o entreferro (“e”), chegando ao rotor (KRAUSS; FLEISCH, 1999). Parte desse fluxo é envolvida pela bobina e parte se fecha por outros caminhos (“não bobina”).

Assim:

$$\Phi_{\text{ímã}} \cong \Phi_e = (\Phi_{\text{bobina}} + \Phi_{\text{não bobina}}) \quad (2)$$

Sabe-se que fluxo magnético pode ser expresso pelo produto da indução (B) pela unidade de área (S), ou seja:

$$\Phi_{\text{ímã}} = B_{\text{ímã}} \cdot S_{\text{ímã}} \quad (3)$$

Então,

$$B_{\text{ímã}} \cdot S_{\text{ímã}} = B_e \cdot S_e \quad (4)$$

Substituindo (3) e (4) na equação (2), tem-se que:

$$B_e \cdot S_e = (B_{\text{bobina}} \cdot S_{\text{bobina}} + B_{\text{não bobina}} \cdot S_{\text{não bobina}}) \quad (5)$$

Pela lei de circuitação de Ampère, temos:

$$H_{\text{ímã}} \cdot L_{\text{ímã}} + H_e \cdot L_e = 0 \quad (6)$$

E como a indução no entreferro pode ser expressa por:

$$B_e = \mu_0 \cdot H_e \quad (7)$$

onde:  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ .

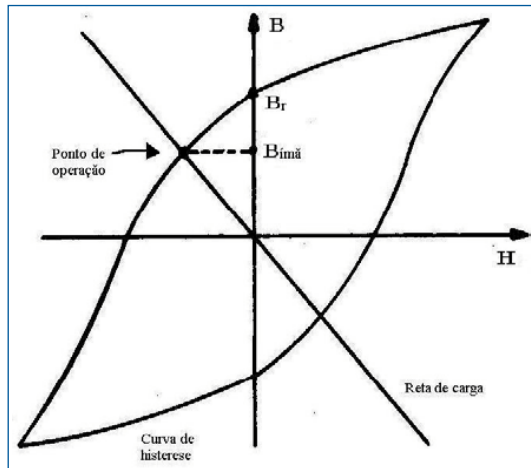
Assim, tem-se que:

$$B_{\text{ímã}} = -\mu_0 H_{\text{ímã}} \cdot (L_{\text{ímã}} / L_e) \cdot (S_e / S_{\text{ímã}}) \quad (8)$$

Essa equação é denominada “reta de carga do ímã” e possibilita determinar seu “ponto de operação”. Este é determinado pelo ponto de interseção obtido quando se coloca a reta de carga sobre a curva de desmagnetização. Sua projeção sobre a ordenada (Figura 7) permite obter a indução de trabalho ( $B_{\text{ímã}}$ ).

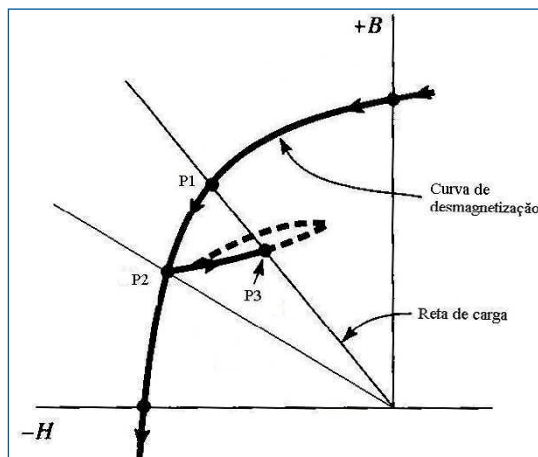
Assim, a partir ponto de operação de um ímã, é possível avaliar se houve desmagnetização, ou seja, diminuição da indução de trabalho.





**Figura 7** Reta de carga e ponto de operação do ímã.

A Figura 8 apresenta mudanças no ponto de operação de um ímã que caracterizam a desmagnetização decorrente de alterações do circuito magnético.



**Figura 8** Pontos de operação do um ímã.

Na Figura 8, P1 indica o ponto de operação de um ímã para um determinado circuito magnético. Caso o circuito magnético seja alterado devido à retirada do ímã ou do rotor de dentro do estator (aumento das dimensões do entreferro), resultará em mudança no ponto de operação.

O entreferro afeta o coeficiente angular da reta de carga através do parâmetro  $L_e$ . Quanto maior for o entreferro, menor será a inclinação da reta. Dessa forma, quando o entreferro aumenta, o ponto de operação se desloca para um ponto mais baixo na curva de desmagnetização, resultando em um fluxo remanente menor (ponto P2).

Se o circuito magnético retornar à condição inicial, ou seja, o ímã é novamente colocado no circuito magnético ou o rotor é recolocado no interior do estator, o ponto de operação não volta necessariamente para P1, mas move-se pelo laço menor da curva de magnetização até interceptar a reta de carga inicial (ponto P3).

O novo ponto de operação, P3, apesar de estar na mesma reta de carga de P1, apresenta indução menor, caracterizando a desmagnetização do ímã em razão da mudança de circuito magnético. Para retornar ao ponto P1 de operação, será necessário submeter o ímã a um processo de remagnetização.

Assim, a desmagnetização de um ímã depende principalmente de dois fatores: a variação do circuito magnético e a curva de histerese do material (segundo quadrante da curva  $B \times H$ ).

## 6 RESULTADOS

### 6.1 Características dos ímãs do tacômetro

Na Seção de Metalurgia do IPT, foi obtida, através de microscopia de varredura, a análise química dos ímãs do tacômetro. A Tabela 1 apresenta a composição química encontrada.

TABELA 1

Composição química da amostra do ímã

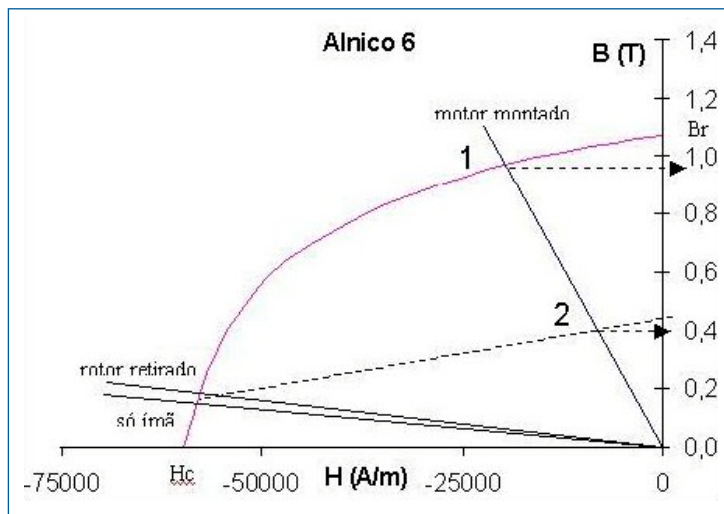
Elemento químico	Composição química (%)	Desvio padrão
Al	3,76	±0,05
Si	0,21	±0,04
Ti	0,37	±0,02
Fe	48,44	±0,27
Co	25,01	±0,16
Ni	18,35	±0,33
Cu	3,86	±0,44

Tal composição pertence a ímãs do tipo Alnico 6. Assim, por meio do programa Femm, foi analisado e simulado o comportamento dos ímãs nas diversas condições que ocorrem durante a manutenção do tacômetro.

Os resultados foram vistos de forma qualitativa, pois não se tinha como objetivo conhecer com precisão a curva característica do material do ímã usado no tacômetro. A Figura 9 apresenta simulações para três condições distintas de montagem dos ímãs (pontos de operação):

- Ímãs fora do motor (“só ímã”);
- Ímãs no estator, com rotor retirado (“rotor retirado”);
- Tacômetro montado corretamente (“motor montado”).

Por meio das simulações, percebe-se o efeito da desmagnetização nos ímãs. Na posição com o rotor retirado, o tacômetro pode perder mais da metade do fluxo magnético (ponto 1 para o 2).



**Figura 9** Estimativa das retas de carga do tacômetro.

Observa-se que a desmontagem completa do estator (“só ímã”), teoricamente, altera pouco o ponto de operação. Na prática, entretanto, o manuseio do ímã pode fazê-lo passar por pontos de valor de  $H$  ainda mais negativos e desmagnetizantes. O simples fato de, por exemplo, aproximar os dois ímãs que compõem o tacômetro pode alterar drasticamente os seus pontos de operação. Qualquer aproximação de um material magnético pode ter o mesmo efeito.

## 6.2 Formas de evitar a desmagnetização

O projeto do circuito magnético deve ser feito para evitar a desmagnetização em condições normais de operação. O Alnico 6 apresenta alta indução remanente como uma de suas melhores propriedades, entretanto é facilmente desmagnetizado. Uma alternativa é a escolha de ímãs menos suscetíveis à desmagnetização.

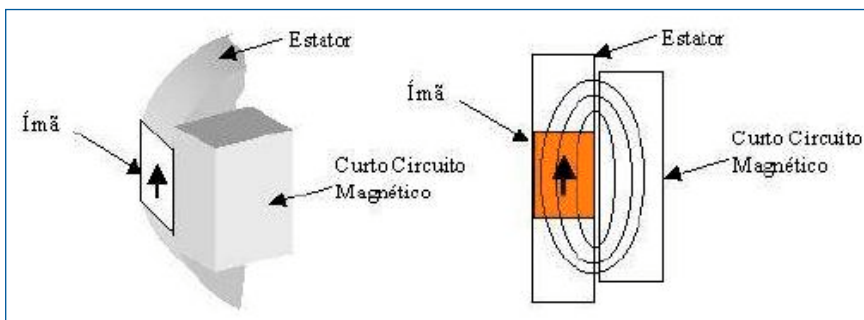
Assim, a desmagnetização de um ímã constituído desse material, quando retirado do circuito magnético, é praticamente inevitável. Portanto, a desmontagem do tacômetro é desaconselhável.

Entretanto, caso seja necessária a desmontagem do tacômetro para manutenção, a retirada do ímã do estator certamente provocará a desmagnetização. A única alternativa para o funcionamento correto do tacômetro será a remagnetização de seus ímãs.

Uma alternativa para a desmagnetização na desmontagem do tacômetro é evitar a retirada do rotor de dentro do estator.

Outra alternativa, a ser avaliada experimentalmente, é baseada no conceito de curto-circuito magnético. Nesse caso, o fluxo magnético que atravessa o entreferro e o rotor é desviado para um circuito alternativo durante a retirada do rotor. O desvio é provocado pela montagem de um pequeno bloco de material ferromagnético sobre cada um dos ímãs.

O cálculo aproximado das dimensões do material necessário para ocasionar o curto-circuito foi avaliado numericamente no programa Femm. Estima-se que um paralelepípedo de dimensões 40 x 80 x 20 mm<sup>3</sup> é suficiente para evitar a desmagnetização, conforme esquematizado na Figura 10.



**Figura 10** Curto-circuito magnético.

---

## 7 CONCLUSÃO

Identificou-se que a operação de desmontagem do tacômetro, como atualmente é realizada, causa a desmagnetização dos ímãs.

Mostrou-se também que os ímãs do tipo Alnico 6, apesar de apresentarem grande indução remanente, são suscetíveis ao problema de desmagnetização. Foram propostas alternativas para a solução do problema, tais como a desmontagem sem a retirada do rotor ou a utilização do conceito de curto-circuito magnético.

Para realizar esta análise, utilizou-se um *software* para efetuar o cálculo da distribuição das linhas de campo e fazer as simulações das dimensões do bloco de material ferromagnético a ser utilizado no curto-circuito magnético.

Cabe ressaltar que esse *software*, disponível gratuitamente na internet, mostrou-se bastante satisfatório apesar de a figura da seção transversal da máquina ser bastante complexa.

---

## REFERÊNCIAS

KRAUSS, J. D.; FLEISCH, D. A. *Electromagnetics: with applications*. 2. ed. Singapore: Mac-Graw-Hill Book, 1999.

SIEMON, G. R. *Electric machines*. Philippines: Addison-Wesley, 1980.