

Desempenho da Comutação de Máquinas Rotativas de Corrente Contínua

Igor H. M. Campos*. Thales A. C. Maia**. Marco T. C. de Faria***

*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais,
Belo Horizonte, MG Brasil, (e-mail: ihmcampos@ufmg.br)

** Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais,
Belo Horizonte, MG Brasil (e-mail: thalesmaia@cpdee.ufmg.br)

*** Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais,
Belo Horizonte, MG Brasil (e-mail: mtfaria.ufmg@gmail.com)

Resumo: Ainda hoje, máquinas de corrente contínua (cc) de grande porte são muito utilizadas, porém, a operação dessas apresenta como principal gargalo coleta de corrente; suas condições ditam a vida útil, a frequência e a gravidade das falhas, assim como o número e o custo das manutenções. Este trabalho pretende investigar o desempenho da comutação em função da alteração do material da escova, da pressão de molas implementada, da corrente de operação e de outras variáveis relevantes; em todos os casos, propõe-se conduzir o estudo sob a perspectiva da formação e conservação do filme de carbono, buscando reduzir o coeficiente de atrito e, conseqüentemente, o desgaste das escovas e do comutador. Ao final, visando a previsão do desempenho da comutação antes de testes operacionais, apresenta-se um procedimento experimental para a medição do atrito e da temperatura no contato seco de uma máquina cc do metrô de Belo Horizonte com histórico de desgaste anormal no coletor e elevado consumo de escovas.

Palavras-chaves: Comutador; filme; densidade de corrente; atrito; asperezas; pulsos de temperatura.

1. INTRODUÇÃO

Dada a obsolescência tecnológica imposta às máquinas cc de elevada potência, que a cada dia perdem mais espaço para motores assíncronos acionados por inversores de frequência, pode parecer pouco relevante uma investigação sobre os aspectos fundamentais da comutação, contudo, ainda hoje, estas máquinas possuem ampla aplicação. Segundo Alzamora (2018), especialmente no Brasil, a frota de locomotivas em operação é composta majoritariamente por motores cc, que representam o 3º componente de maior custo de manutenção na tração de carga ferroviária (Simões, 2019). Além disso, os motores cc são os maiores responsáveis pelo acionamento de máquinas pesadas da indústria metal-mecânica (Borges, 2007). A coleta de corrente é o cerne do funcionamento das máquinas cc, contudo, as aplicações dessa tecnologia, que tem fama de antiquada, não se limitam a esses equipamentos. Geradores síncronos, largamente utilizados em termoelétricas e hidroelétricas (Llerena, 2011), e geradores de indução duplamente alimentados, expoentes atuais da geração eólica (Tavares, 2017), são exemplos de aplicações de escovas em anéis coletores. A comutação tem sido objeto de estudos inovadores na eletrificação veicular; em janeiro de 2022 a BMW noticiou que utilizará uma máquina síncrona de tração de 5ª geração escovada no modelo iX M60 (Young, 2022).

Avaliando a comutação de máquinas cc ferroviárias, exibida no estudo de caso deste trabalho, sabe-se que o desgastamento natural do coletor levará, inevitavelmente, ao fim da vida útil desse componente e à imobilização do equipamento. A troca de comutadores é uma possibilidade, mas por se tratar de uma técnica em desuso acarreta em custos muito elevados. Outra possibilidade é a modernização, através de inversores, porém,

exigiria a compatibilização completa dos circuitos existentes, justificando até mesmo a compra de novos trens, como foi feito em outras operadoras no Brasil. Assim, a prioridade da manutenção é estender a vida útil dos coletores que estão operando desde 1986, com perspectiva de uso por pelo menos mais 30 anos. Para tal, almeja-se uma comutação linear: sem falhas, com perdas atenuadas, com pequeno consumo de escovas e com desgaste do comutador uniforme e reduzido.

Usualmente, ainda na fase de projeto da máquina cc, preconiza-se uma certa configuração (escovas e pressão de molas) que resultará numa comutação linear. No entanto, durante a operação, em virtude de alterações de condições ambientais e/ou do tipo de carregamento, o desempenho da configuração proposta pelo fabricante pode ser insatisfatório; nesse caso, baseado na literatura técnica, é necessário buscar outro arranjo de escovas e/ou pressão de molas que melhor se adequem ao dado regime. Contudo, mesmo escolhendo com cuidado a nova configuração, é possível que durante os testes operacionais ocorram falhas que justifiquem até mesmo a retirada da máquina para a manutenção corretiva.

Nesse contexto, este trabalho apresenta formas de estimar algumas das condições de operação do contato, definindo o desempenho da comutação e garantindo a segurança do teste.

2. A COMUTAÇÃO CC E SEUS DESAFIOS

De acordo com Fitzgerald et al. (1975), a comutação é um dos maiores obstáculos no funcionamento satisfatório de uma máquina cc., Vauquelin et al. (2008) alega que o desempenho dos contatos deslizantes de uma máquina escovada possui grande influência no rendimento, na potência de saída, no consumo das escovas e na vida útil do comutador. Também

chamado de coletor, esse componente tem a difícil função de transferir a corrente de armadura, quase sempre elevada e fortemente indutiva, da caixa terminal no estator às bobinas rotóricas em movimento; essa coleta de corrente geralmente ocorre em meio a uma série de agravantes mecânicos.

2.1 Formação e conservação do filme

Naturalmente, o comutador da máquina cc deve ser coberto por uma fina película de grafite, com cerca de 0,02 (μm) de espessura (Borges, 2007). O filme, também chamado de pátina, exibido na Fig. 1, é formado por óxido de cobre (75%), partículas de grafite livres e ancoradas (15-20%), contaminação (5%) e uma pequena, mas importante quantidade de vapor de água (Roberge e Heron, 2019). Em geral, considerando um coletor reconicionado ou novo, implementado o fluxo de corrente, constata-se que o tempo para a formação total do filme pode variar entre determinadas horas e alguns dias (Brançan, 1987).

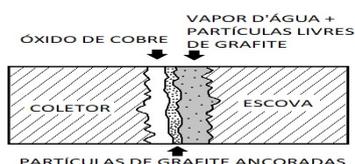


Fig. 1 Ampliação esquemática: conjunto coletor/filme/escova

A lubrificação sólida propiciada pelo filme reduz bastante o coeficiente de atrito e, portanto, o desgaste das escovas e do comutador. A pátina propicia ao coletor maior robustez na comutação, entretanto é extremamente vulnerável à escolha errada da granulagem da escova, ao excesso ou ausência de umidade e a contatos perigosos, que são substâncias danosas ao filme, muito comuns no ambiente industrial, tais como: vapores ácidos, óleos, graxas, poeiras, detergentes, álcoois, cetonas, fumaça de cigarro e amônias (Ariza, 1977).

Com o intuito de proteger o comutador e preservar a pátina, Roberge e Heron (2019) recomendam a escolha da escova em função do nível de contatos perigosos. A primeira opção, para meios pouco contaminados, é utilizar um carbono simples, que seja capaz de desenvolver um filme consistente. Se houver dificuldade na consolidação da pátina, em atmosferas com poluição leve ou moderada, uma segunda opção é alterar o material da escova, impregnando com resina a estrutura de carbono. Se, em último caso, a contaminação for excessiva, é necessário aplicar escovas abrasivas, que contém agentes de limpeza, impregnados ou adicionados no material base, que pule a pista, removendo a poluição pesada; contudo, deve-se ter cuidado no uso dessa classe, sua ação deve remover a contaminação superficial e não o cobre subjacente. É preciso avaliar também a umidade da atmosfera de comutação, já que a disponibilidade de vapor de água está intimamente ligada à capacidade de formação de filme (Borges, 2007).

2.2 Condições para a comutação linear

Roberge e Heron (2019) definem uma boa comutação como o resultado da interação complexa entre geometria mecânica, condições ambientais e aspectos químicos/físicos do conjunto eletromecânico. Ariza (1977) cita os aspectos mais relevantes relacionados à comutação linear, que são descritos a seguir:

2.2.1 Ausência de centelhamento

Em geral, o centelhamento pode ser provocado por condições mecânicas deficientes, tais como: vibrações (oriundas ou não da máquina), defeitos no comutador (desgaste irregular, rugosidade inadequada e excentricidade) e/ou pressão de molas incompatível com o regime de operação. Além disso, o faiscamento pode ser causado por condições elétricas (sobrecarga) e magnéticas (desalinhamento de linha neutra). Assim que o fenômeno se inicia, o valor da queda de tensão no contato escova-comutador cresce com a precarização da pista, gerando um processo de realimentação do surto que, se não combatido, pode gerar danos sérios ao comutador.

2.2.2 Uniformidade do filme

O maior obstáculo à análise quantitativa do filme baseia-se no seu comportamento resistivo não-linear, que é função da densidade e direção da corrente, do material da escova, da umidade, temperatura e pressão da atmosfera de comutação (Fitzgerald et al., 1975). Portanto, para definir a performance da coleta de corrente, resta apenas a avaliação qualitativa da pátina. A tonalidade da película formada, indo do castanho claro ao negro, é um assunto bastante polêmico na indústria, contudo, segundo Bruni (1984), tal variação pode ter origem no material das escovas ou na contaminação ambiental e não necessariamente define o diagnóstico da comutação. Dessa forma, a verificação da pátina deve ser restrita ao julgamento da uniformidade não cabendo outras interpretações.

2.2.3 Perdas mínimas (elétricas e mecânicas) na comutação

O desenvolvimento de novas tecnologias eleva a cada dia a demanda mundial por energia; assim, em geral, cresce a importância da melhoria de eficiência dos equipamentos. Também para a comutação, preliminarmente, espera-se as mínimas perdas elétricas (somatório de perdas no contato e por condução) e mecânicas (atrito no contato das escovas com o comutador). Porém, conforme será abordado adiante, nem sempre a coleta de corrente com perdas muito reduzidas é benéfica. Conhecendo a velocidade tangencial da pista V (m/s) e a área de contato nominal das escovas com o coletor S (cm^2), de modo empírico e aproximado, estima-se, conforme (1), a potência mecânica dissipada pelo atrito entre escovas eletrográficas e o comutador P_{mec} (W) (Brançan, 1987).

$$P_{mec} = 0.25 \times V \times S \quad (1)$$

2.2.4 Trabalho silencioso e desgaste das escovas e do coletor

Defeitos mecânicos na pista do comutador, excesso de filme, ângulo e pressão de molas imprópria são grandes causadores de barulho. Em síntese, o aumento do ruído representa a elevação do coeficiente de atrito, que leva ao acréscimo de desgaste nas escovas e causa danos ao coletor. O crescimento do atrito pode ser incitado por condições mecânicas, porém, existe também a contribuição de fatores elétricos. Conforme ilustrado pela Fig. 2, o início do centelhamento, causado, por exemplo, pela redução da pressão de molas, leva ao aumento tipicamente exponencial do consumo das escovas (desgaste elétrico); no entanto, a elevação da pressão leva a ampliação das forças de atrito e, como efeito, ao aumento, praticamente linear (desgaste mecânico), do consumo das escovas.

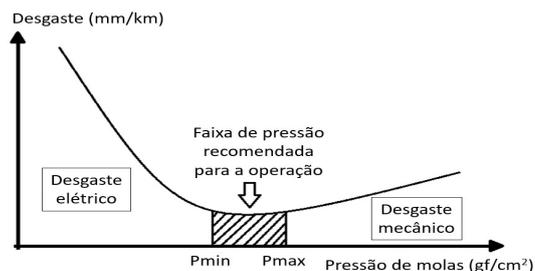


Fig. 2 Consumo de escovas em função da pressão

Mesmo admitindo uma comutação linear, o desgaste natural dos componentes é inerente à coleta de corrente; entretanto, desgastes anormais acarretam na redução da vida útil do coletor, acréscimo no consumo de escovas e aumento na probabilidade falhas em operação. Conforme Bruni (1984), o desgaste anormal pode ocorrer de várias formas: seletividade, decapagem, sulcamento, filamento, ranhuramento, queima de barras por ranhura, queimas de barras no passo polar, arrastamento de cobre e filmes não condutivos. Excetuando os distúrbios elétricos e magnéticos (sobrecarga, defeitos de conexão, problemas de linha neutra, desbalanços elétricos e magnéticos), pode-se entender que, de certa forma, todos os problemas mecânicos da comutação relacionam-se à elevação desmedida do coeficiente de atrito. Sendo assim, buscando investigar o desempenho da comutação na perspectiva da tribologia, evidencia-se as seguintes considerações.

3. O ATRITO NA COMUTAÇÃO

De maneira geral, o toque mecânico entre superfícies rugosas com movimento relativo, tal qual o contato das escovas com o coletor, pode ser observado sob o aspecto macro e micro. A investigação do atrito na comutação normalmente encontra na literatura técnica de manutenção de máquinas importantes análises descritivas dos fenômenos macro, que justificam algumas recomendações para o bom funcionamento dos equipamentos, tal qual é apresentado nos itens 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4. Em contrapartida, nos estudos da mecânica do contato, geralmente sob a ótica do micro, a fundamentação teórica dos mecanismos de desgaste não possui como foco a comutação: fricção entre cobre (coletor) e compostos carbono (escovas) permeada por corrente elétrica. Almejando a aproximação desses conhecimentos interdisciplinares, apresenta-se no item 3.5 um estudo da mecânica de contato aplicado à comutação.

3.1 Controle da rugosidade e escolha do material da escova

Um comutador irregular pode levar ao centelhamento; por outro lado, uma pista uniforme, mas de aspereza inadequada impede a formação do filme. Através do controle de rugosidade evita-se deixar o comutador com um acabamento excessivamente liso, o que dificulta a deposição de grafite e leva a uma formação de filme lenta e imperfeita; no entanto, com um acabamento demasiadamente áspero, observa-se um grande desgaste inicial das escovas, que deve ser evitado, embora seja admissível se comparada à situação anterior. Conforme Brançan (1987) a rugosidade ideal, distribuída de maneira uniforme, por torneamento ou polimento, em todo o perímetro do coletor, deve estar contida na faixa de 1,2 a 1,8 (μm) para a escala Ra (escala de rugosidade média de valores absolutos dentro do comprimento de amostragem).

Mesmo admitindo o controle rígido da rugosidade do coletor não se garante no ponto de vista mecânico a gestão do atrito, ele depende também da composição da escova e de como esse material irá responder ao tipo de operação da máquina. Comumente, os fabricantes apresentam parâmetros para cada qualidade comercializada, tais como: dureza, resistência à flexão, velocidade, densidade de corrente, massa específica, resistividade e coeficiente de atrito. Entretanto, é importante ressaltar que dados desse tipo são obtidos em condições laboratoriais controladas, sendo assim, não é correto assumir o coeficiente de atrito no contato, bem como outros parâmetros operacionais tabelados, serão desenvolvidos em um dado regime de trabalho de uma máquina; estes, servem apenas para uma comparação na escolha da qualidade a ser testada.

3.2 Densidade de corrente

Na comutação, segundo (2), a densidade de corrente D (A/cm^2) pode ser calculada considerando o quociente da corrente de armadura I_a (A) pela área de condução A (cm^2), dada pela metade do produto entre o número total de escovas N e a área de contato nominal de cada uma delas S (cm^2):

$$D = \frac{I_a}{A} = \frac{I_a}{(0,5 \times N \times S)} \quad (2)$$

Uma sobrecarga, por exemplo, relaciona-se diretamente ao excesso de densidade de corrente, que estimula o fenômeno do faiscamento. Em contrapartida, diferentemente de um circuito elétrico comum, em que a mínima densidade de corrente é desejada para atenuar as perdas joulicas, uma baixa carga de operação é também prejudicial à comutação. Não raramente, estima-se a densidade de corrente nominal partir dos dados de placa da máquina; contudo, integrando a curva de carregamento e dividindo pelo tempo de operação do equipamento, calcula-se a densidade de corrente média e, normalmente, obtém-se valor bastante inferior à estimativa nominal. Nos casos de baixa carga de comutação, geralmente as escovas acabam riscando o coletor, pois a formação e consolidação do filme fica comprometida (Ariza, 1977).

A relação da baixa carga de comutação com o ataque ao filme pode ser explicada pela presença de partículas de cobre provenientes do comutador encrustadas na face de contato das escovas. De acordo com Bruni (1984), é normal que ocorra uma pequena transferência de metal do coletor às escovas durante a comutação, contudo, garantidos os níveis aceitáveis de energia no contato, a maior parte dessas partículas são vaporizadas. Porém, nos casos em que a comutação ocorre em baixa carga, as partículas que se desprendem não podem ser evaporadas, alojando-se nos poros da escova. O ancoramento de cobre prejudica a criação e a consolidação do filme, o que, conseqüentemente, eleva o coeficiente de atrito e fomenta o desgaste anormal do coletor.

3.3 Temperatura no contato

A curva que representa a variação do coeficiente de atrito em função da temperatura é distinta para cada par de materiais que caracterizam o contato seco. Conforme Ariza (1977), de maneira geral, a variação do coeficiente de atrito em função da temperatura na face de contato das escovas segue o aspecto de uma curva convexa, que é exibida na Fig. 3.

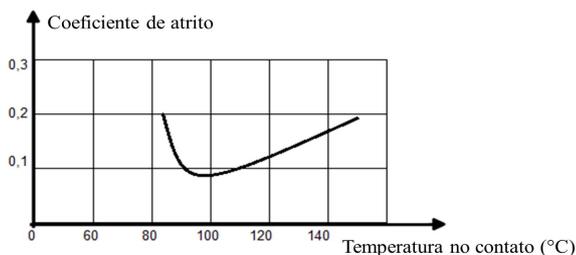


Fig. 3 Variação do coeficiente de atrito com a temperatura

A baixa carga de comutação, abordada no item 3.2 como fator preponderante para o desgaste irregular do comutador, está intimamente ligada ao aumento do coeficiente de atrito quando se considera a comutação com baixas temperaturas. Segundo Ariza (1977), quando a coleta de corrente ocorre com a máquina à vazia ou pouco carregada, a escova tende a trabalhar “fria”, acarretando em alto coeficiente de atrito, que por consequência gera danos ao filme e ao comutador. Portanto, de maneira pragmática, recomenda-se que a temperatura da face da escova trabalhe na faixa de 85 a 110 (°C). De acordo com Holinski (2001), no contato deslizante de motores elétricos (toque das escovas com o coletor), em geral, é comum observar temperaturas entre 100 e 200 (°C).

3.4 Pressão de molas

Do ponto de vista tribológico a variação da força de molas influi em duas situações: se for abaixo da recomendada poderá haver falha na condução, que pode danificar o coletor, elevando o atrito; por outro lado, se for demasiada haverá um aumento automático do coeficiente de atrito (Ariza, 1977). Observando novamente a Fig. 2, percebe-se a estreita relação entre o atrito e o consumo das escovas: o desgaste elétrico denota o aumento do coeficiente de atrito com a precarização da pátina, por outro lado, o desgaste mecânico expressa a evolução do atrito dada a elevação das interações superficiais. Fundamentado na prática, esboçando os níveis de vibração na operação dos equipamentos, e observando a variação natural da pressão com o comprimento das escovas, conforme Tabela 1, Brançan (1987) estabeleceu valores de pressão que servem de referência para diferentes tipos de máquinas escovadas.

Tabela 1. Pressões recomendadas – máquinas escovadas

TIPO DE MÁQUINA	PRESSÃO DE MOLAS
Estacionárias - sem vibração	150 a 200 gf/cm ²
Máquinas c/ anéis deslizantes	170 a 250 gf/cm ²
Motores de tração	250 a 570 gf/cm ²
Máquinas com alta vibração	até 350 gf/cm ²
Motores fracionários	até 450 gf/cm ²

3.5 A mecânica do contato com foco na comutação

O atrito seco entre superfícies, fenômeno representativo da parcela mecânica da comutação, caracterizada pela lubrificação limite, é denotado pela força de retardo que se opõe ao deslizamento de um objeto sobre outro. Conforme exibido na Fig. 4, o corpo apresenta uma força normal N , consequência do peso P no contato; a força F pretende colocar a massa m em movimento enquanto a força de atrito F_a ancora o corpo à superfície, tentando impedir que isso aconteça. Notando a ampliação, percebe-se que o problema

consiste no contato entre superfícies rugosas. De acordo com Dorinson e Ludema (1985), as superfícies reais sempre são geometricamente e molecularmente irregulares; além disso, a força de atrito pode ser caracterizada como a força necessária para quebrar as aderências entre as asperezas do contato.

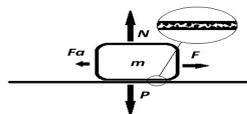


Fig. 4 Força de atrito (diagrama de forças genérico)

De maneira geral, o coeficiente de atrito μ (adimensional) pode ser calculado como o quociente da força de atrito F_a pela normal N . Tal relação possui como base a 1ª lei do atrito de Amontons (1699), que aponta a força de atrito como sendo diretamente proporcional à carga aplicada (normal). Além disso, no instante anterior à movimentação do corpo, tem-se a força de atrito estático F_{ae} maior que a força aplicada F , que permite, especificamente, o cálculo do atrito estático μ_e . Por fim, quando a força aplicada F supera a força de atrito F_{ae} o corpo acelera, movendo-se na superfície estacionária; agora uma reação de menor intensidade, chamada força de atrito cinético F_{ac} permite o cálculo do atrito cinético μ_c .

Existem ainda outras duas leis aplicáveis à mecânica do contato seco: a 2ª lei do atrito de Amontons (1699), que define o atrito como sendo independente da área aparente (nominal) do contato e a 3ª lei do atrito de Coulomb (1781), que estabelece o atrito dinâmico como quase independente da velocidade. Em geral, se observa que o μ_c diminui com a progressão da velocidade; contudo, esse fato não se contrapõe às clássicas leis do atrito, pois em altas velocidades ocorre uma espécie de polimento mútuo, alterando as irregularidades das superfícies (Faria, 2021). Nesse tipo de contato o mecanismo de lubrificação limite é regido não pelos atributos das faces originais, mas pelas propriedades físicas e químicas da pátina formada entre as superfícies após o contato.

Historicamente determinou-se que o atrito seco é função da rugosidade superficial, da força de adesão, da elasticidade dos corpos e/ou do tipo de camadas de transferência na interface. Durante o contato de superfícies sólidas com movimento relativo, o atrito pode ser definido como a vibração da rede de átomos destes corpos, que gera ondas sonoras e calor. De acordo com Holinski (2001), a estrutura cristalina vibra até que toda a energia de deformação elástica seja dissipada. A expansão do conceito proposto considera ainda o atrito interno de corpos sólidos que, por deformação elástica/plástica ou histerese, representam perdas no sistema mecânico. Em conclusão, de forma generalizada, interpreta-se o caso do atrito como um distanciamento da conservação da energia mecânica útil (Dorinson e Ludema, 1985).

Partindo de um contato entre faces muito lisas, onde surge forte atração das camadas de moléculas de superfícies vizinhas, sabe-se que a força de atrito diminui à medida que se aumenta a aspereza das superfícies até um ponto máximo de rugosidade, capaz de interromper, de maneira definitiva, o movimento relativo (Faria, 2021). Sendo assim, adotando uma faixa restrita de rugosidades intermediárias, tal qual é recomendado no item 3.1, é possível garantir uma comutação

com o mínimo atrito. Todavia, destaca-se que a rugosidade superficial e as irregularidades na pista acarretam no contato de pequenas áreas entre as duas superfícies. As pressões de contato reais são, portanto, muito superiores àquelas exibidas na Tabela 1, que considera a área aparente do contato (nominal). A Fig. 5(a) ilustra o toque inicial sem carga entre duas superfícies rugosas; com o aumento do carregamento, as superfícies se aproximam, produzindo áreas e pressões de contato reais cada vez maiores, conforme ilustrado, respectivamente, pelas Fig. 5(b) e 5(c) (Váradi et.al, 1996).

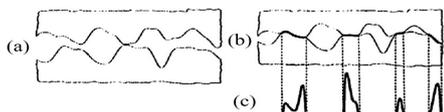


Fig. 5 Superfícies rugosas em contato – deformação elástica

Até o momento, considerou-se apenas a deformação elástica das asperezas, contudo, para a formação da pátina sabe-se ser necessário a troca de partículas entre os materiais envolvidos no contato. Conforme a Fig. 6, sob a ótica macro, existe uma mudança no comportamento do atrito e da temperatura à medida que o contato seco entre picos de asperezas gera deformações plásticas que, como efeito, contribuem na formação do filme. Na fase 1, onde é nula a transferência de material, percebe-se um aumento do atrito cinético e da temperatura no contato. A partir do ponto onde o atrito atinge seu pico, acompanhado pela curva de temperatura, inicia-se a fase 2 com a transferência de material; após começada a deposição de partículas, o atrito diminui até se estabilizar (Brendle e Colin, 1991). Sob a ótica micro, especificamente nos componentes de grafite, como é o caso das escovas, não há de fato a formação de uma pátina homogênea, conforme descrito no item 2.2.2, em vez disso, pequenas ilhas de grafite são depositadas a partir de um núcleo (Holinski, 2001).

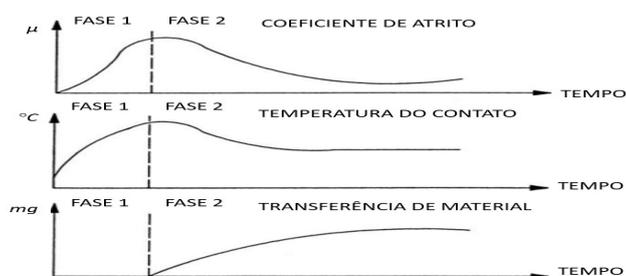


Fig. 6 Deformações plásticas no contato seco – ótica macro

Garantindo que a tensão tangencial implementada no contato entre superfícies rugosas seja menor que a resistência de cisalhamento do material, haverá, portanto, a deformação elástica das asperezas, produzindo o aumento do contato, conforme a Fig. 5(b). Por outro lado, se a tensão tangencial superar a resistência de cisalhamento crítica, o crescimento da junção será interrompido pela deformação plástica abrupta de picos de asperezas, dando origem ao filme, que é na verdade o deslizamento destas partículas na interface (Dorinson e Ludema, 1985). Superadas as forças internas de coesão molecular pelas forças de atração das camadas de moléculas de superfícies vizinhas, haverá a tendência de desprendimento de partículas de uma face e consequente adesão destes fragmentos na outra superfície (Faria, 2021).

Este fenômeno, chamado aderência, relaciona-se intimamente à grandes elevações da temperatura, que levam a fusão de picos de aspereza cisalhados abruptamente. Verificou-se experimentalmente, usando safira, alumínio e polietileno, que o deslizamento de asperezas, gera pulsos de temperatura nos chamados *hot spots*, que se aproximam do ponto de fusão das partes atritadas (Bogdanovich e Tkachuk, 2005). A aderência elucida a útil criação do filme; em contrapartida, o fenômeno também explica a passagem de cobre do coletor às escovas, bem como a vaporização, nos *hot spots*, dos fragmentos cisalhados. De maneira mais generalista que a exibida em (1), considerando as áreas de contato reais, e não nominais, a análise térmica do contato pode ser feita conforme (3), que expressa o calor gerado em função das coordenadas i e j relacionadas Q_{ij} ; contudo, é preciso conhecer a distribuição da pressão de contato P_{ij} , a velocidade de deslizamento V e o coeficiente de atrito μ (Váradi et al., 1996).

$$Q_{ij} = P_{ij} \times V \times \mu \quad (3)$$

4. ESTUDO DE CASO

Desde 1986, os conversores eletromecânicos rotativos (MCVR's) têm sido cruciais no funcionamento e operação comercial de mais de 70% da frota de trens do metrô de Belo Horizonte, recebendo a alta tensão contínua da catenária e convertendo, de maneira eletromecânica, a energia capaz de suprir toda a demanda de carga em baixa tensão alternada dos trens. Historicamente, os MCVR's operaram com elevado consumo de escovas e flagrante desgaste anormal. O ranhuramento, exibido na Fig. 7, ataca o cobre como uma ferramenta de usinagem em um torno, deixando o mesmo com a aparência de uma rosca. Tal anormalidade reduz a vida útil do coletor, contudo, não gera diretamente problemas à operação da máquina; talvez por este motivo, o ranhuramento se manteve por décadas de operação sem ser interpelado. Neste período, diversas escovas foram testadas nos MCVR's, contudo, devida à falta de critério na escolha do material, somada à carência na rastreabilidade destas máquinas, os diversos testes geraram pouco histórico e muitas falhas.



Fig. 7 Comutador ranhurado - conversor rotativo

Para garantir uma operação adequada, o fabricante do MCVR indica a faixa de 331 a 404 (gf/cm²). Porém, comparando a faixa de pressão proposta com a Tabela 1, percebe-se que o conversor estaria operando com o mesmo nível de vibração do motor de tração (acoplado ao truque), superando até mesmo as máquinas com alta vibração. Naturalmente, preso ao estrado do carro reboque, o conversor está sujeito às vibrações geradas pelas irregularidades da via e das rodas. Entretanto, há molas que procedem o amortecimento entre os eixos e o truque, bolsas de ar que executam a suspensão entre truque e caixa e os amortecedores prisioneiros (coxins) da própria máquina. Portanto, um provável excesso na pressão de molas poderia estar contribuindo para o aparecimento do desgaste anormal, sendo necessário avaliar o desempenho tribológico para a nova faixa proposta: 210 a 260 (gf/cm²).

Conforme abordado no item 3.2, outro ponto fundamental para uma comutação com atrito elevado é a baixa carga de operação. Como não é possível alterar as demandas de carga do trem, poderia se propor, tal qual Borges (2007), a retirada de escovas para majorar a densidade de corrente. Entretanto, o MCVR faz uso de apenas quatro escovas que trabalham em par, diminuindo as chances de falhas no caso de troca; por esse motivo, descarta-se a possibilidade de retirar escovas. Contudo, buscando eliminar o ranhuramento, pode-se adotar escovas impregnadas e tratadas, menos porosas, portanto, menos suscetíveis ao ancoramento de cobre (Bruni, 1984).

Propõe-se, portanto, a avaliação do desempenho de duas qualidades distintas: as escovas originais (comuns) e as escovas em teste (impregnadas e tratadas). Inicialmente, os ensaios seriam executados com dois grades eletrográficos em quatro regimes diferentes de condução: grade 01 (original) e grade 02 (em teste) combinados com as pressões de molas nominal (331 a 404 (gf/cm²)) e reduzida a valores seguros (210 a 260 (gf/cm²)). Porém, dada uma recomendação do fabricante das escovas originais, os ensaios com o grade 01 tendo a pressão de molas reduzida não foram realizados.

5. PROCEDIMENTOS UTILIZADOS

Para prever o desempenho da comutação das configurações propostas, garantindo a segurança da experiência antes de um teste em operação, utilizou-se o seguinte procedimento:

5.1 Energização da máquina em bancada

Nas manutenções dos MCVR's em 2º nível, realizam-se ensaios que necessitam da implementação da velocidade nominal à baixa tensão contínua, cerca de 500 (V). Isso só é possível se a alimentação da máquina for feita apenas por meio do campo série, suprimindo o campo shunt, tornado o nível de tensão acessível a fontes cc de bancada. Energizando a excitatriz, é possível implementar cargas trifásicas no alternador, fazendo a máquina comutar à corrente nominal. Ainda em baixa tensão, cerca de 600 (V), é praticável a injeção de corrente no campo shunt, que eleva bastante o fluxo polar, aumentando as tensões de velocidade, fazendo com que a máquina opere com correntes bem próximas do vazio. Essa adaptabilidade notável da máquina composta permite que quaisquer ensaios relacionados à variação da densidade de corrente de comutação sejam exequíveis em baixa tensão, proporcionando resultados bastante fidedignos.

5.2 Medição da temperatura

Dada a impossibilidade de medir o campo de temperatura no contato, formado pelos *hot spots*, almejando uma comparação de resultados, optou-se por realizar um procedimento de medição direta; tal qual Ariza (1977) que, usando um termopar no interior da escova, obteve a curva de coeficiente de atrito em função da temperatura, exibida na Fig. 3. O elevado volume dos termopares disponíveis na oficina impossibilitou a compatibilização com as dimensões das escovas. Utilizou-se então o circuito integrado LM35: sensor de temperatura de precisão em centígrados com a saída analógica de tensão (10mV/°C), faixa de medição de 2 (°C) a 150 (°C) para a alimentação em 5 (V), com precisão de mais ou menos 0,5 (°C). Para realizar a inserção do sensor,

garantindo que o desgaste natural das escovas não levaria ao toque do mesmo com o coletor, executou-se a furação controlada no corpo das escovas através de uma fresa CNC, mantendo uma distância de segurança de 5 (mm) da face.

5.3 Medição da força de atrito

No caso do MCVR o contato seco opera praticamente com a velocidade constante em 1800 (rpm) excetuando a partida, a parada e as pequenas oscilações de giro com as mudanças de carregamento. Em geral, por não haver aceleração relacionada, conclui-se que o conjugado motriz da máquina se iguala à somatória das forças de atrito do conjunto, sendo a força de atrito cinética relevante para este estudo. No caso da comutação, como se observa na Fig. 8, a normal N possui mesmo módulo, mas sentido inverso à força da mola, responsável pela pressão no contato; já a força de atrito F_a , perpendicular à normal, surge nas escovas assim que há movimentação da pista na forma de velocidade angular ω , no sentido tangencial ao coletor, tentando contrapor seu giro.

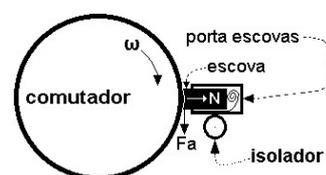


Fig. 8 Diagrama de forças no contato escova comutador

Admitindo que não há aceleração nos porta-escovas, conclui-se que o somatório de forças é nulo, sendo assim, as forças de atrito e de reação do porta-escovas são iguais em módulo, mas, com sentidos opostos. O dispositivo de medição proposto, exibido na Fig. 9(a), utiliza-se do momento gerado pelo atrito no sentido de rotacionar o porta-escovas, extraindo o torque para fora da máquina e medindo-o, por meio de um dinamômetro digital, acoplado firmemente à carcaça, através do dispositivo ilustrado na Fig. 9(b). O dinamômetro usado, tipo IP-90DI-50 da Impac, dispõe de quatro sensores de carga de alta precisão (tipo S) configurados em ponte de Wheatstone. O aparelho, que realiza medidas de 0,5 a 50 (N), com uma resolução de 0,01 (N) e precisão de mais ou menos 0,5%, é conectado a um braço de alavanca de comprimento igual a distância entre o centro de massa e a face das escovas.

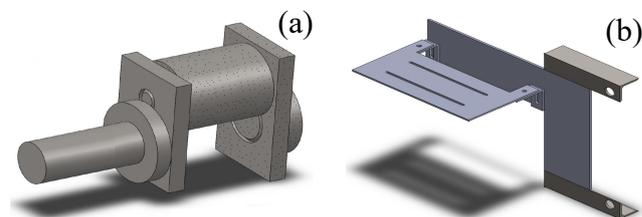


Fig. 9 Projeto dos dispositivos para medição do atrito

5.4 Aquisição de dados e procedimentos de energização

Para a interface com os medidores, utilizou-se do *hardware* de aquisição de dados da *National Instruments*, equipamento que recebe os sinais de tensão relacionados a força e a temperatura, convertendo-os em sinais digitais e enviando-os a um computador para posterior tratamento de dados. A Fig. 10 exhibe a montagem final dos dispositivos na máquina.

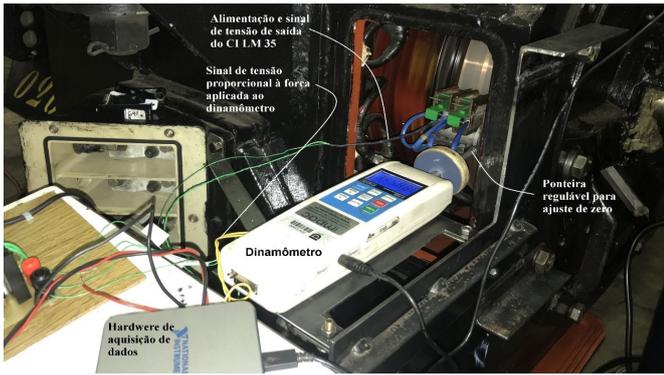


Fig. 10 Dispositivos de medição do atrito e da temperatura

Após realizar as calibrações necessárias, selecionou-se então um MCVR completamente revisado para os testes (N° 026). Em todas as curvas acelerou-se a máquina até a velocidade nominal, obtendo após a estabilização do giro a corrente de 8 (A), que faz comutar conforme densidade de corrente média, sendo o ponto mais relevante para escolha da configuração ideal de operação. Em seguida, inseriu-se carga no alternador e ajustou-se a fonte para 15 (A), que simula o carregamento total quando em operação no trem. Por fim, retirou-se as cargas e alimentou-se, quase instantaneamente, o campo shunt, fazendo com que a corrente reduzisse para 3(A), que simulam o carregamento da máquina operando em vazio.

6. RESULTADOS E ANÁLISES

Seguindo os procedimentos de energização e utilizando os dispositivos especialmente desenvolvidos para este estudo, obteve-se as curvas exibidas na Fig. 11, Fig. 12 e Fig. 13.

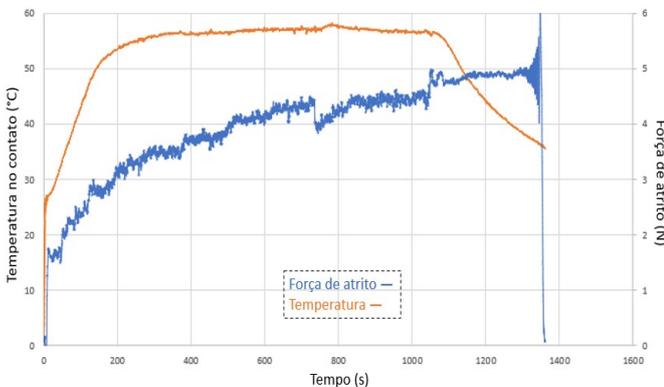


Fig. 11 Atrito e temperatura – grade (01) – pressão nominal

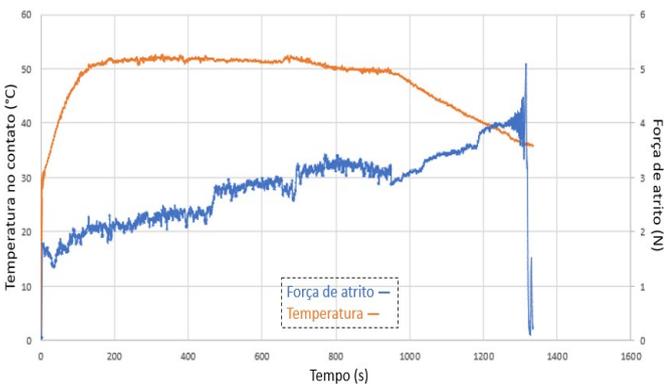


Fig. 12 Atrito e temperatura – grade (02) – pressão nominal

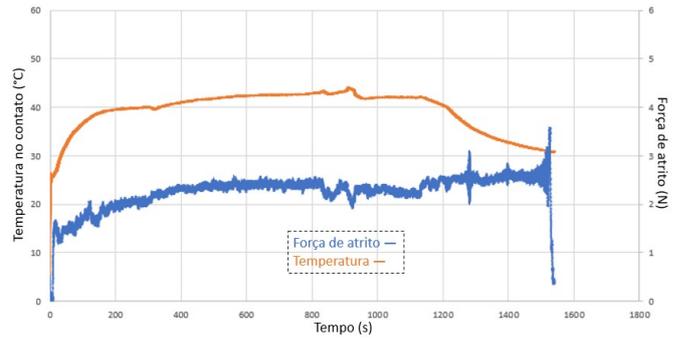


Fig. 13 Atrito e temperatura – grade (02) – pressão reduzida

Tal qual ocorre na operação do MCVR, determinou-se as curvas de temperatura e atrito com a velocidade constante em 1800 (rpm), procedendo as mudanças de carga da maneira mais coordenada possível, porém, nestes momentos, dado o ajuste manual das fontes, é possível que tenha havido certa variação na velocidade, sendo toleradas, portanto, alterações pontuais mínimas na temperatura. Nas três curvas, observou-se o crescimento característico da temperatura; além disso, com o desligamento, percebeu-se o declínio da mesma em função da anulação das perdas elétricas e da atenuação das perdas mecânicas no contato. Por outro lado, houve aumento da força de atrito dada a ausência de eletrodeposição, o que torna o coletor cada vez menos lubrificado. Os valores de atrito foram contaminados por surtos mecânicos nos instantes finais das medições; possivelmente em decorrência de algum fenômeno de ressonância do dispositivo utilizado, que, para não interferir nas medidas, despreza o uso de mecanismos de amortecimento e/ou retorno ao batente.

A partir da Fig. 11, Fig. 12 e Fig. 13, buscando facilitar a análise dos resultados e considerando a estabilização final das medições de atrito e temperatura, elaborou-se a Tabela 2.

Tabela 2. Compilado de medições – atrito e temperatura

TIPO DE CARGA	MÉDIA - 8A		MÁX - 15A		VAZIO - 3A	
	Temp. (°C)	Atrito (N)	Temp. (°C)	Atrito (N)	Temp. (°C)	Atrito (N)
Grade 01 331 a 404 (gf/cm ²)	56,6	3,50	56,9	4,35	56,4	4,50
	0 a 390 (s)		390 a 730 (s)		730 a 1045 (s)	
Grade 02 331 a 404 (gf/cm ²)	51,7	2,38	51,2	2,90	49,6	3,10
	0 a 440 (s)		440 a 650 (s)		650 a 950 (s)	
Grade 02 210 a 260 (gf/cm ²)	39,6	2,16	43,3	2,49	42,0	2,25
	0 a 320 (s)		320 a (s)		830 a 1020 (s)	

Fica clara a mudança no perfil das curvas de temperatura e principalmente de atrito quando se muda a força de molas; tanto a queda no contato quanto as deformações elásticas e plásticas das asperezas, geradas nas áreas reais de contato, relacionam-se intimamente com a variação da normal, alterando, respectivamente, as perdas elétricas e mecânicas do contato seco. Além disso, conforme a Fig. 11 e Fig. 12, percebeu-se que o grade 02, impregnado e tratado, é melhor adaptável as três condições operacionais da máquina, já que apresenta menor coeficiente de atrito que o grade original.

Era esperada a redução na força de atrito dada a diminuição da normal (força de molas) em 36%, porém, havia suspeita sobre a manutenção do coeficiente de atrito, dada a mudança das condições mecânicas do contato. Ao final, constatou-se que, neste estudo de caso, a redução da pressão de molas para valores seguros de fato atenua a força de atrito por meio da queda da normal, isso sem elevar de maneira descontrolada o coeficiente de atrito. A operação com menor pressão, também reduz as variações bruscas de atrito nas mudanças de carregamento, conforme exibido na Fig. 13, tornando mais segura a comutação à vazio e à plena carga; além disso, em todos os regimes de carga, a redução do atrito deve refletir num menor consumo de escovas na operação dos MCVR's.

7. CONCLUSÃO

Com base nas explanações teóricas relacionadas ao desgaste irregular, causado pela elevação desmedida atrito, entende-se que a baixa carga de comutação, apesar de constatada na operação dos MCVR's, não é a principal responsável pelo ranhuramento do coletor, posto que a variação da densidade de corrente tem pequena influência na temperatura de contato da face das escovas. O conversor é alimentado pela catenária em 3000 (V) cc, nível de tensão incomum para uma máquina com apenas 50 (kW), que leva a valores bastante pequenos de corrente de armadura. A curva genérica de atrito em função da temperatura, exibida na Fig. 3, portanto, não contempla as máquinas conversoras; provavelmente tal curva foi obtida por Ariza (1977) fazendo uso de máquinas com densidades de corrente maiores, mais comuns na indústria, de forma que seria possível obter temperaturas na faixa dos 85 a 110 (°C).

Conforme abordado no item 3.5, o fenômeno da aderência explica a formação da pátina que, depois de consolidada, passa a gerir as propriedades tribológicas do contato. Além disso, a interpenetração de partículas, elucidada como a aderência de asperezas, é capaz de explicar a transferência de cobre do coletor às escovas, bem como a vaporização, nos hot spots, dos fragmentos de metal cisalhados, conforme previsto por Bruni (1984) no item 3.2 deste estudo.

Apesar dos ínfimos custos para a fabricação dos dispositivos de medição da temperatura e da força atrito, entende-se que o mecanismo proposto para a avaliação do desempenho da configuração (escova e força de molas) apresentou resultados bastante satisfatórios. Posteriormente, seria interessante testar a nova configuração em operação, comparando a aparência da pátina, o consumo, a ovalização e a possível ocorrência de falhas com o arranjo original. Além disso, através de uma micrografia, por exemplo, é provável que se possa revelar o ancoramento de cobre na face de contato de escovas que por ventura tenham operado num coletor com desgaste anormal.

REFERÊNCIAS

Alzamora, A. M. (2008). Modelagem e implementação computacional de um motor elétrico de tração de corrente contínua aplicado a ferrovias. *Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica UFU*, pág.1–6.

Ariza, C. F. (1977). *Manutenção corretiva de máquinas elétricas rotativas*, pág.69–103. McGraw-Hill, São Paulo, Brasil.

Bogdanovich, P. N. and Tkachuk, D. V. (2005). Temperature distribution over contact area and “hot spots” in rubbing contact. *Tribology international*, 39(11), pp.1355–1360.

Borges, A. N. (2007). *Caracterização de escovas de grafite e avaliação do seu desempenho em função da microestrutura*. pág.1–67. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil.

Brançan, E. F. (1987). *Manual de escovas elétricas Carbomec*, pág.1–42. São Paulo, Brasil.

Brendle, M. and Colin, G. (1991). The frictional and transfer behaviour of compacted solid lubricants on smooth metallic surfaces. *Friction and Traction, Butterworth London*, pp.124.

Bruni, K. A. (1984). *Guia para o bom desempenho de escovas e comutadores*, pág.1-7. GE Carbon Products. Toronto, Canadá.

Dorinson, A. and Ludema, K. C. (1985). *Mechanics and chemistry in lubrication*. pp.134-177. Elsevier, New York, USA.

Faria, M. T. C. de. (2021). *Conceitos introdutórios da teoria da lubrificação*. PPGMEC UFMG. 27 out. 2021, 23 fev. 2022. 19 p. Notas de Aula.

Fitzgerald, A. E.; Kingsley, C.; Kusko, A. (1975). *Máquinas elétricas: conversão eletromecânica da energia, processos, dispositivos e sistemas*, pág.232–283. McGraw-Hill, São Paulo, Brasil.

Holinski, R. (2001). Fundamentals of dry friction and some practical examples. *Industrial lubrication and tribology*, 53(2), pp.61–65.

Llerena, M. T. M. (2011). *Identificação de parâmetros de geradores síncronos usando métodos de ajuste de curvas e ensaio em frequência*. pág.1-188. Tese doutorado Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, Brasil.

Roberge, R. and Heron, C. (2020). The secret to that old black magic: mastering the art of sparkless commutation. *IEEE industry applications magazine*, 26(1), pp.6–14.

Simões, F. H. (2019). *Análise de dados de vida aplicada em motores de tração ferroviários*. pág.1–117. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil.

Tavares, M. M. (2017). *Gerador de indução duplamente alimentado como gerador eólico*. Pág.1-60. Dissertação Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Brasil.

Váradi, K., Néder, Z. and Friedrich, K. (1996). Evaluation of the real contact areas, pressure distributions and contact temperatures during sliding contact between real metal surfaces. *Wear*, 200(1), pp.55–62.

Vauquelin, A. et al. (2008). A new modelling of dc machines taking into account commutation effects. *International Conference on Electrical Machines IEEE*, pp. 1-6.

Young, C. (2022). BMW's fifth-generation electric motor is a magnet-free masterpiece. *Interesting Engineering, Innovation*. <https://interestingengineering.com/bmws-fifth-generation-electric-motor-is-a-magnet-free-masterpi>