

CATEGORIA 3

**RANHURAMENTO EM COMUTADORES DE MÁQUINAS DE
CORRENTE CONTÍNUA**

1 INTRODUÇÃO

Conforme Fitzgerald (1975, p.265) “as vantagens de motores de corrente contínua são tais que eles retêm uma posição competitiva forte em aplicações industriais”. Alguns processos podem exigir a variação contínua e controle apurado da velocidade, implementação de um grande conjugado de partida e/ou apresentar limitações de alimentação. Estes e outros parâmetros influenciaram por muitas décadas a escolha máquina CC para tais processos.

Entretanto, com advento dos inversores de frequência, o mercado percebeu vantagens significativas relacionadas ao custo de manutenção e incorporou as máquinas assíncronas de rotor em gaiola acionadas por esses equipamentos eletrônicos. Assim, as máquinas de corrente contínua perderam uma fração considerável das operações industriais.

Até o advento dos inversores, a conversão CC-CA era realizada de maneira eletromecânica. A engenhosa tecnologia empregada na época apresenta em geral menor rendimento e maior custo de manutenção que sua sucessora, mas sua robustez e confiabilidade são observadas ainda hoje na operação de 25 trens da frota série 900 do metrô de Belo Horizonte.

O conversor rotativo apresenta rendimento na casa dos 80% e tem mostrado êxito nesses 34 anos de operação comercial; porém, com o tempo, o desgastaste natural do coletor levará à parada dos conversores e, portanto, a imobilização dos trens que dependem deles.

A troca dos comutadores é uma possibilidade, mas por se tratar de uma técnica em desuso, a falta de mão de obra especializada e o desinteresse do mercado em máquinas CC elevam os custos.

A modernização por conversores CC-CA de estado sólido, é também onerosa. Tal modernização exigiria completa compatibilização dos circuitos auxiliares de controle e cargas justificando até mesmo a compra de trens mais modernos como foi feito em várias operadoras no Brasil.

Todavia, a maior prioridade da manutenção é estender ao máximo a vida útil dos comutadores que estão operando desde 1986 (34 anos). Dessa forma, adia-se o gasto e confere à engenharia um tempo maior para promover estudos e testes para a tomada de decisão.

O ranhuramento, aliado a outros problemas de comutação, danifica o coletor e acaba por definir a quantidade de cobre retirado das lâminas a cada usinagem para o condicionamento. A eliminação do ranhuramento, deve refletir tanto no prolongamento da vida útil da máquina quanto na diminuição do número de falhas reduzindo as ocorrências para a operação.

1.1 Características do conversor eletromecânico rotativo (MCVR)

Os conversores rotativos são cruciais no funcionamento e operação comercial dos 25 TUE's série 900; responsáveis por suprir toda a demanda de carga em corrente alternada do trem, incluindo recarga das baterias, ar condicionado das cabines, os sistemas de iluminação, exaustão, refrigeração, compressores principais (que alimentam o sistema pneumático) e o freio reostático. Por TUE são utilizadas um par de máquinas conversoras embarcadas sob o estrado no centro dos carros reboques como é possível observar na Figura 1.

Por estar acoplado à caixa do trem, o conversor está sujeito a vibrações mecânicas geradas pelas deformidades dos trilhos e das rodas, contudo, existem muitas formas de amortecimento para atenuar as oscilações e reduzir falhas causadas por surtos mecânicos.

Figura 1 - Conversor Eletromecânico Rotativo – MCVR em operação no trem



Fonte: Autoria própria

O conversor conta com o acoplamento mecânico solidário entre um motor CC composto e uma máquina síncrona de 4 polos (alternador polarizado por uma excitatriz). Conforme o manual de manutenção do conversor “as partes rotativas são montadas num mesmo eixo e as partes estáticas estão montadas de maneira a conferir à máquina completa um conjunto monobloco”. As características elétricas de cada parte da máquina estão descritas a seguir:

Tabela 1 – Características elétricas Conversor Eletromecânico Rotativo

CARACTERÍSTICAS	MOTOR CC	ALTERNADOR 3Φ	EXCITATRIZ:
Marca	TCO (Traction Cem-Oerlikon)		
Data de fabricação	1982	1982	1983
Tipo de excitação	Composta aditiva	Exitatriz	*
Potência	50 kW	60 kVA	1960 W
Tensão nominal	3000 Vcc	127/220 Vca	35 Vcc
Corrente nominal	$I_a = 19 \text{ A} / I_f = 0,6 \text{ A}$	154 A	65 A
Número de pólos	2	4	8
Velocidade nominal	1800 rpm		
Classe de isolamento	F (155°C)		
Fator de Potência	*	0,75	
Ligação	*	Y (estrela)	Δ (delta)

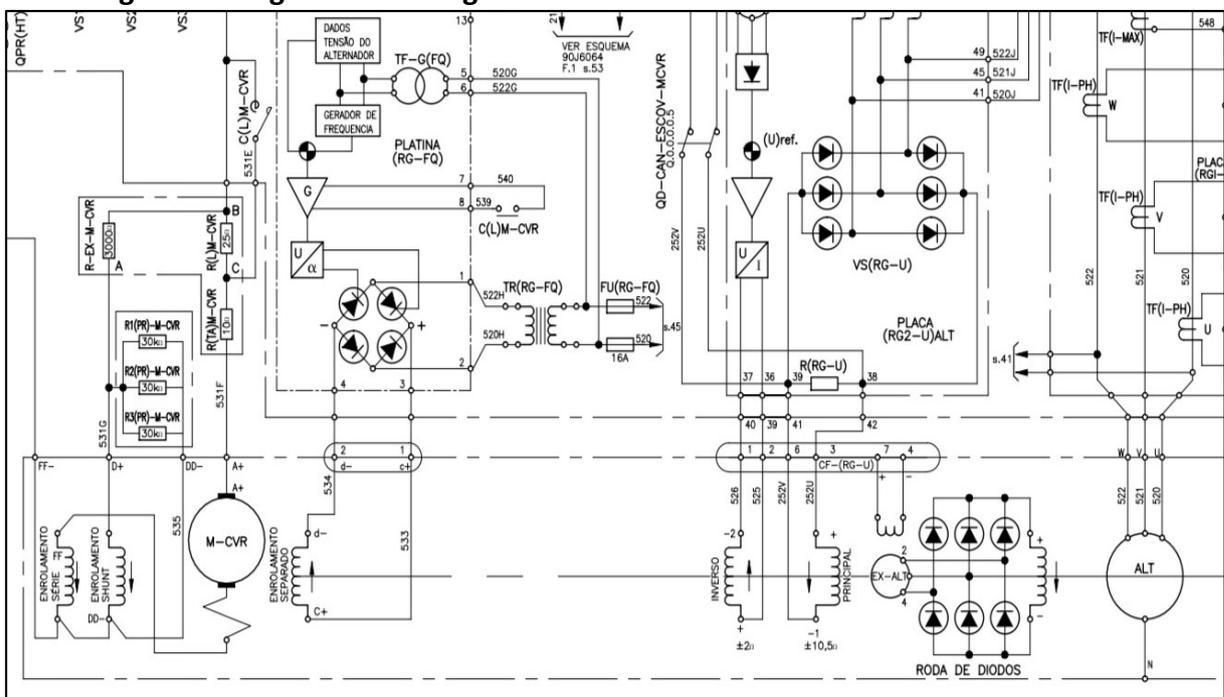
Fonte: Adaptado do Manual de manutenção do conversor DEMETRÔ

26ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

7º PRÊMIO TECNOLOGIA & DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

O funcionamento da máquina, expresso pela Figura 2, pode ser sintetizado como a conversão da energia elétrica na forma de corrente contínua, sob alta tensão da catenária, em energia mecânica na forma de conjugado e velocidade angular pelo motor CC. Essa energia é transferida por acoplamento mecânico sólido ao rotor de polos salientes da máquina síncrona, que excitado pela corrente de campo da excitatriz, induz tensão alternada na armadura do alternador que por sua vez alimenta as cargas em baixa tensão ligadas ao barramento trifásico.

Figura 2 - Fragmento do diagrama elétrico do trem 62 CIRCUITOS AUXILIARES



Fonte: Adaptado pelo autor do desenho demetrô D5-SM-MR64-001N

As máquinas com campo shunt possuem boa capacidade de estabilização de velocidade, o que facilita a regulação de tensão e frequência (feita por circuitos eletrônicos simples no caso do conversor). Segundo Fitzgerald (1975, p.266), “No motor derivação a corrente de campo constante funciona a uma velocidade levemente em queda, mas quase constante, conforme a carga é aumentada, sendo o conjugado quase proporcional à corrente de armadura”.

Alimenta-se à tensão plena o campo shunt por meio dos terminais **D+** e **DD-**, em seguida, a armadura e o campo série partem de maneira controlada, com alívio de tensão até que se

26ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

7º PRÊMIO TECNOLOGIA & DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

atinga o valor máximo através dos terminais **A+** e **FF-**, a máquina estabiliza em uma velocidade ligeiramente inferior à nominal; o circuito eletroeletrônico PLATINA (RG-FQ) lê a frequência abaixo do padrão e injeta corrente nos terminais **c+** e **d-**, chamado campo separado, que por possuir polaridade subtrativa em relação ao shunt, enfraquece o fluxo polar e acelera o conjunto até que a velocidade atinja 1800 rpm, fazendo a máquina síncrona gerar em 60 Hz.

Inserções e retiradas de carga no barramento trifásico são frequentes e intermitentes, isso leva a variação das correntes solicitadas à armadura da máquina síncrona que por sua vez influi no fluxo de reação de armadura e desestabiliza a velocidade do conversor. O circuito eletroeletrônico que comanda o enrolamento separado, percebe as variações de frequência e se encarrega de incrementar ou subtrair corrente para reestabelecer a condição de geração.

Na partida, ocorre a injeção de corrente no enrolamento principal da excitatriz pelos terminais **3** e **6**, essa corrente provém da retificação de amostras de tensão do barramento trifásico. Graças ao ímã permanente da excitatriz, a máquina estando em rotação e regulada, apresenta tensão residual no alternador que propicia o chamado escorvamento: esse processo de realimentação acontece até que a tensão se estabilize ligeiramente acima da nominal.

O ajuste da tensão do barramento é feito pelo circuito eletroeletrônico na PLACA (RG2-U) ALT ligado aos terminais **1** e **2** da excitatriz, através do enrolamento inverso, que apresenta polaridade subtrativa em relação ao principal. Injeções de corrente fazem com que o fluxo do campo da excitatriz seja reduzido, minimizando a corrente de campo e as tensões induzidas.

As variações de carga já citadas, também influem na regulação da tensão do barramento; o aumento das correntes de armadura do alternador provoca elevação de queda de tensão nos enrolamentos, em contrapartida, o circuito eletroeletrônico percebe a subtensão trifásica e diminui a corrente do campo inverso, elevando o potencial do barramento.

Naturalmente, ambos os controles (tensão e frequência) devem ser realizados de forma simultânea, pois o sistema é complexo e a variação de qualquer parâmetro influi nos outros.

1.2 Comutação e o filme

De acordo com Cavazzoni (2008, p.73):

“O comutador nada mais é que os terminais dos elementos integrantes do enrolamento rotórico, agrupados radialmente ao redor do eixo e presos de forma mecânica, isolados um do outro, formando uma superfície lisa onde pode patinar uma outra peça sólida, pensada como grafite e cobre, a qual coleta a corrente comutada para dar caminho ao circuito externo e chamada comumente de escova”

O comutador tem a difícil função de transferir a corrente da caixa terminal às bobinas rotóricas em movimento. O desafio elétrico está não só na amplitude elevada da corrente de armadura, mas na característica do circuito fortemente indutivo que dificulta a interrupção e inversão do fluxo de elétrons. Além disso, existem agravantes mecânicos como vibrações externas à máquina e deformidades da pista do comutador (ovalização), que causam uma série de surtos.

A máquina de corrente contínua apresenta como principal gargalo a comutação, suas condições ditam a vida útil e a frequência das falhas. De acordo com Vauquelin (2008, p.1):

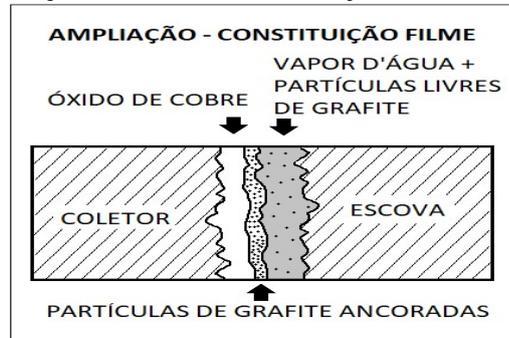
“De fato, o comportamento particular dos contatos deslizantes entre as escovas e o comutador pode influenciar fortemente as características do motor CC, como a potência mecânica de saída, a vida útil das escovas, a temperatura do comutador e a durabilidade das máquinas...”

Naturalmente, o comutador da máquina CC deve ser coberto por uma fina película de grafite denominada filme, segundo Ariza (1977), essa película tem a espessura de aproximadamente 0,02 micron, sendo 1000 vezes mais fino que o fio de cabelo. É composta de óxido de cobre, partículas de grafite ancorado, vapor d'água e partículas livres de grafite, conforme Figura 3.

A lubrificação sólida propiciada pelo filme já consolidado reduz substancialmente o coeficiente de atrito e, portanto, o desgaste das escovas e do comutador. Outra função

importante é o filme ser eletricamente mais resistente do que o cobre, propiciando a mitigação das nocivas cargas circulantes no contato escova-comutador.

Figura 3 - Ilustração aumentada do conjunto coletor/filme/escova



Fonte: Adaptado de Manutenção Corretiva de Máquinas Elétricas Rotativas (Ariza,1977, p.92)

Tal película propicia ao coletor maior robustez na comutação, entretanto, é extremamente vulnerável a escolha errada da granulação da escova, desequilíbrio e/ou equívoco nas pressões de molas utilizadas, excesso ou ausência de umidade e contatos perigosos.

No ambiente industrial existem diversos contatos perigosos, substâncias danosas ao filme como por exemplo: vapores ácidos, óleos, poeiras, detergentes, álcoois, cetonas, fumaça de cigarro e amônias. “No caso de contatos perigosos, o que devemos fazer é tentar eliminá-los ou, na sua impossibilidade, pelo menos, tentar atenuar seus efeitos” (ARIZA, 1977, p.93).

1.3 Condições para a comutação linear

Assumindo que a comutação é o foco de falhas e defeitos do equipamento, Ariza (1977) afirma que para o bom funcionamento da máquina CC é possível citar aspectos mais relevantes relacionados a uma boa comutação, chamada linear, que são descritos a seguir:

1.3.1 Ausência de centelhamento

O surto eletromecânico mais comum na comutação é certamente o centelhamento, visto na Figura 4, segundo Fitzgerald (1975, p.236) “o faiscamento pode ser provocado por condições

mecânicas defeituosas, tais como trepidação das escovas ou um comutador áspero, ou gasto irregularmente, ou, como em qualquer problema de comutação, por condições elétricas”.

Figura 4 - Comutação de conversor com centelhamento intenso



Fonte: Autoria própria

Segundo Ariza (1977, p.94), “três são as causas mais frequentes e danosas: grandes sobrecargas, vibração e condições atmosféricas adversas”. A primeira, bastante intuitiva, deixa claro que o valor da queda de tensão escova-comutador cresce em sobrecargas e de maneira descontrolada, assim que o faiscamento começa, visto que a queima da pista aumenta a queda no contato e realimenta o surto. A segunda pode ser causada por deformidades na pista (ovalização), folga nos mancais, desbalanceamento do rotor, podendo ser agravada por pressão de molas incorreta. Esses fatores levam a falha momentânea de condução que dá início ao surto. A terceira, diz respeito à contaminação da atmosfera de comutação que causam degradação do filme piorando o contato escova-comutador.

1.3.2 Uniformidade do filme na superfície do coletor

De acordo com Fitzgerald (1975, p.237):

“A obtenção de uma boa comutação é mais uma arte empírica do que uma ciência quantitativa. O principal obstáculo à análise quantitativa baseia-se no comportamento elétrico do filme de contato grafite-cobre. Sua resistência é não-linear, e é uma função da densidade de corrente, da direção da corrente, da temperatura, do material da escova, e da umidade e pressão atmosférica. Seu comportamento em alguns aspectos é semelhante ao de um gás ionizado”

No ambiente industrial, onde os recursos teóricos são escassos, a observação quantitativa da formação e consolidação do filme é ainda mais inacessível. A inspeção qualitativa da aparência do filme surge, portanto, como ferramenta principal para análise da comutação.

De acordo com Bruni (1984, p.1), “a cor do filme é um assunto que frequentemente causa polêmica. A tonalidade de um filme, mais escura ou mais clara, pode ter origem no material das escovas bem como na contaminação ambiental”. Portanto, a verificação visual da patina pode fornecer um poderoso diagnóstico da comutação, contudo sua validade está restrita ao julgamento da uniformidade não cabendo outras interpretações.

A formação de um filme uniforme e consistente está atrelada à densidade de corrente, não demasiadamente alta para gerar faiscamento nem baixa impedindo a eletrodeposição, ao controle de rugosidade do comutador, ideal de 0,9 a 1,8 μm Ra conforme Brançan (1987), e na manutenção de um único tipo de escova, prevenindo a condução desigual de corrente.

1.3.3 Trabalho silencioso

O contato das escovas com o coletor deve se dar de maneira constante e ininterrupta. Segundo Ariza (1977, p.94), “Um trabalho silencioso é um bom indício de contato correto”.

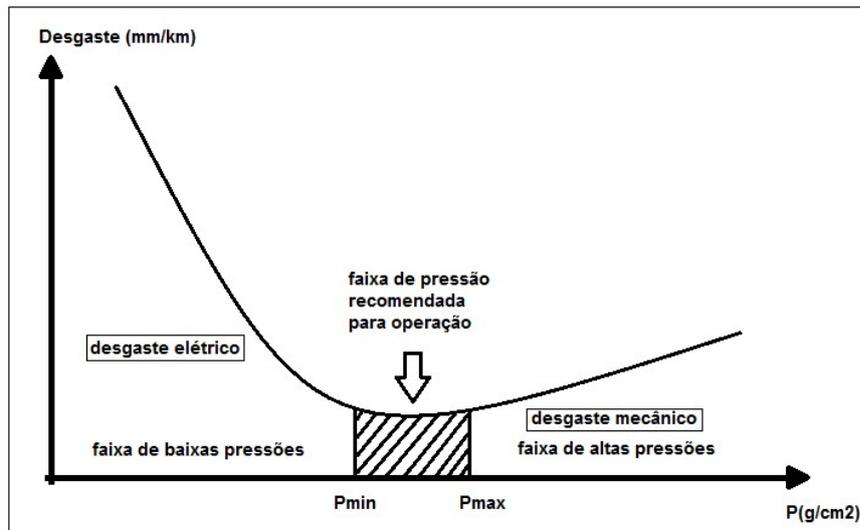
Defeitos mecânicos na pista do coletor como excentricidade, elevação de lâminas e mica saliente causam barulho. A trepidação das escovas pode ser gerada também pelo excesso de filme, ângulo e pressão de molas inadequada. O aumento do ruído representa a elevação do coeficiente de atrito, que leva ao acréscimo de desgaste nas escovas e danos ao comutador.

1.3.4 Vida longa da escova

Conforme abordado anteriormente, o aumento do consumo das escovas pode estar atrelado a problemas mecânicos, porém, existem contribuições de fatores elétricos para tal análise. A

Figura 5 mostra as duas formas possíveis de desgaste dada a variação da pressão de molas: à direita o consumo mecânico, causado pela elevação da força de atrito, expressa o crescimento linear com o aumento da força de molas; à esquerda o consumo elétrico, causado pela piora da superfície da pista, cresce exponencialmente dado o agravamento do centelhamento.

Figura 5 - Variação da pressão de molas e o desgaste das escovas



Fonte: Adaptado de Manutenção Corretiva de Máquinas Elétricas Rotativas (Ariza,1977, p.89)

A vida longa das escovas é significativa para determinar um bom desempenho na coleta de corrente, porém, é o fator menos importante dentre os demais. Os prejuízos que podem ser causados à máquina para a redução inconsequente no consumo não se justificam em hipótese alguma. A redução deve acontecer como consequência de ações que beneficiem a comutação.

1.3.5 Perdas mínimas – elétricas e mecânicas na comutação

Calcula-se o rendimento de uma máquina CC através da Equação 1: temos no numerador a potência mecânica de saída (P_{mec}), utilizada para realizar trabalho, que é na verdade o produto da velocidade angular (ω) pelo conjugado desenvolvido (C). No denominador, incorporadas à potência de saída, são adicionadas as perdas elétricas (P_e) e mecânicas (P_m).

$$\eta = \frac{P_{mec}}{P_{mec} + (P_e + P_m)} = \frac{\omega \times C}{P_{mec} + (P_c + P_v + P_{ee}) + (P_a + P_m + P_{me})} \quad (1)$$

As elétricas dizem respeito às perdas em carga (P_c), joulicas e adicionais, as perdas a vazio (P_v), histerese e Foucault, e as perdas nas escovas (P_{ee}), condução e queda no contato. As mecânicas são a somatória das perdas por arrasto (P_a), movimento do rotor e ventilação, e perdas por atrito, nos mancais (P_m) e contato das escovas com o coletor (P_{me}).

Via de regra, nas máquinas CC espera-se mínimas perdas elétricas (P_{ee}) e mecânicas (P_{me}) no processo de comutação. Contudo, nem sempre a coleta de corrente com perdas reduzidas é benéfica ao comutador, sendo essa uma das pautas que serão abordadas posteriormente.

1.3.6 Mínimo desgaste do coletor

O contato das escovas com o comutador gera estresse mecânico, elétrico e térmico para ambas as peças, levando ao desgaste natural com o tempo de operação, entretanto, qualquer anormalidade no desgaste traz redução de vida útil ao coletor, acréscimo no consumo de escovas e aumento na probabilidade de a máquina falhar em operação.

Conforme Bruni (1984) o desgaste anormal do coletor pode acontecer de diversas maneiras: queima de barras por ranhura, queimas de barras no passo polar, arrastamento de cobre, filmes não condutivos, seletividade, decapagem e sulcamento, filetagem e ranhuramento. Esse último, observado na Figura 6 é o objeto de estudo desse trabalho.

Figura 6 - Comutador de um conversor eletromecânico bastante ranhurado



Fonte: Autoria própria

2 DIAGNÓSTICO

Um comutador ranhurado apresenta sulcos numerosos e aleatórios dispostos radialmente em todo o perímetro da pista, o ranhuramento ataca o cobre como uma ferramenta de usinagem em um torno, deixando o mesmo com a aparência de uma rosca fina.

2.1 Histórico do desgaste anormal

Apesar de reduzir a vida útil do comutador, o ranhuramento não causa de forma direta problemas na operação da máquina, portanto, o desgaste se manteve sem ser interpelado.

Com o intuito de eliminar o problema, investigou-se nos desenhos técnicos e no manual de manutenção quaisquer pistas de anormalidades que pudessem estar causando o desgaste. A princípio não se encontrou nenhuma recomendação referente ao problema, constatou-se, porém, que a escova em operação (grade 02) não era a proposta pelo fabricante do conversor; apresentando características físicas distintas da original (grade 01) conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Características físicas escovas: original (01) x em operação (02) x em teste (03)

PARÂMETRO FÍSICO	UNIDADE	GRADE 01	GRADE 02	GRADE 03
DUREZA	Shore C2	(Médio) 40	(Duro) 50	(Médio) 31
DENSIDADE APARENTE	g/cm ³	1,72	1,7	1,61
RESISTÊNCIA À FLEXÃO	kgf/cm ²	346,7	320	160
COEFICIENTE DE ATRITO	-	M (0,225 a 0,3)	M (0,225 a 0,3)	M (0,225 a 0,3)
RESISTIVIDADE	μΩ.cm	1150	1350	2200
QUEDA NO CONTATO	V	M (1,3 - 1,9)	B (0,8 a 1,3)	M (1,3 - 1,9)
VELOCIDADE PERIFÉRICA	m/s	45	30	40
DENSIDADE DE CORRENTE	A/cm ²	12	10	12

Fonte: Adaptado de Technical Guide Carbone Lorraine (p. 6) e Manual Carbomec (p. 36)

A Tabela 2 também contempla o grade 03, qualidade que será testada adiante no item 3.3 desse trabalho. Todas as características foram obtidas pelos respectivos fabricantes através de ensaios em laboratório, podendo haver variações consideráveis na prática; todavia, os datasheets servem de base teórica para a escolha do tipo ideal para cada aplicação.

O ranhuramento esteve presente na operação da máquina independente do grade aplicado, entretanto, para reestabelecer as condições de fábrica do conversor, foram adquiridas escovas originais, servindo de base para qualquer alteração que pudesse ser proposta adiante.

2.2 Causas do ranhuramento

Após buscar, sem êxito, explicações para o desgaste anormal do comutador no manual do fabricante da máquina, investigou-se na literatura clássica de manutenção de máquinas de corrente contínua. Algumas considerações relevantes dessa pesquisa podem ser abordadas:

2.2.1 Densidade de corrente

A densidade de corrente, em Ampere por centímetro quadrado, expressa o nível de corrente que é possível conduzir numa determinada área de seção transversal de uma escova sem problemas para a comutação (ARIZA, 1977). A Equação 2 apresenta o cálculo da densidade de corrente nominal e, portanto, máxima observável no comutador no caso do conversor (D_{cn})

$$D_{cn} = \frac{(\text{Corrente nominal da máquina})}{0,5 \times (\text{N}^\circ \text{ de escovas}) \times (\text{Área de seção transversal})} = \frac{19}{0,5 \times (4) \times (2,44)} = 3,89 \text{ A/cm}^2 \quad (2)$$

Mudanças de potência absorvida da máquina síncrona estão ligadas à variação das correntes de fase do enrolamento de armadura (estator do alternador), essas oscilações fazem variar o conjugado mecânico absorvido pelo eixo da máquina de corrente contínua. No motor CC a variação de conjugado reflete diretamente na corrente de armadura, conforme Equação 3:

$$T = N \times \Phi_p \times I_a \quad (3) \quad \text{onde:}$$

T = Torque ou conjugado mecânico (Nm)

N = Constante construtiva da máquina

Φ_p = Fluxo polar estático resultante dos enrolamentos série, shunt e separado (Wb)

I_a = Corrente de armadura (A)

Determinar o carregamento de uma máquina através da corrente média de operação para então calcular sua densidade média de corrente não é uma tarefa fácil se, como no caso dos conversores, houver variações esporádicas de carga. Segundo Ariza (1977), é necessário integrar a curva de corrente e dividir pelo tempo em que ela foi traçada.

Logicamente, o excesso de densidade de corrente, caracterizado pelo centelhamento, é prejudicial para a comutação, podendo ser causado por um defeito mecânico que diminui a área de contato escova-comutador ou por uma sobrecarga na máquina. Em contrapartida, uma baixa carga de comutação é também prejudicial para a máquina, diferentemente de um circuito elétrico comum em que a mínima densidade de corrente é desejada para minimizar as perdas joulicas. Conforme Ariza (1977, p.81), o recomendável é que se observe a densidade média mínima de corrente para uma operação segura.

“Na maioria das vezes em que se calcula uma escova para uma determinada máquina, o cálculo da densidade de corrente é feito somente para os valores nominais de corrente e, não raro, o desempenho da qualidade de carvão escolhido não é satisfatório, riscando o coletor e não formando uma boa película lubrificante”.

A relação da baixa carga de comutação com o fato pode ser explicada pela presença de partículas de cobre provenientes do comutador encrustadas na face das escovas, tal qual Bruni (1984, p.4):

“Uma leve transferência de metal é considerada normal durante o processo de coletar corrente. Entretanto, a maior parte desse material é vaporizado, se os níveis de energia no contato escova – comutador forem suficientes, o que de fato ocorre se as escovas operam próximas de sua plena capacidade de carga.”

As máquinas conversoras, foco desse trabalho, não apresentam centelhamento a não ser que haja alguma falha mecânica, portanto, o excesso de densidade de corrente pode ser descartado do diagnóstico. Por outro lado, historicamente, o ranhuramento tem atacado todas as máquinas, sugerindo que estas estejam operando sob baixa carga de comutação.

2.2.2 Atmosfera de comutação contaminada

Conforme descrito no item 1.2 deste trabalho, os contatos perigosos comprometem a formação e a consolidação do filme. A poluição do meio acentua a probabilidade de ancoramento de cobre na face de contato das escovas; a vaporização do metal desprendido da pista fica comprometida com a contaminação, além disso, há o aumento do desprendimento de graças a elevação do coeficiente de atrito (BRUNI 1984).

A eletrodeposição, transferência de carbono das escovas para as lâminas de cobre, propiciada pela passagem natural da corrente, é seguramente o fenômeno fundamental para a boa comutação, sendo a única transferência admissível no processo de coletar corrente.

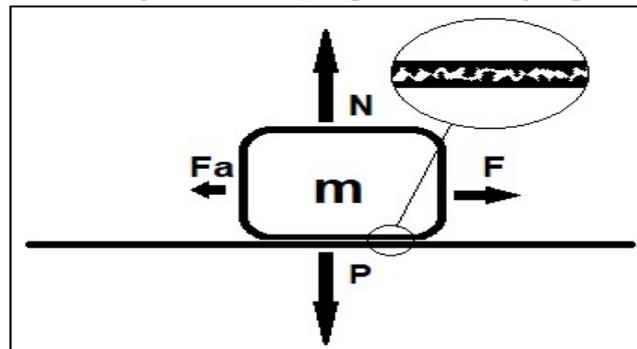
Infelizmente, dado o tempo de uso da máquina e a falta de peças no mercado para a reposição, alguns problemas mecânicos passaram a ser observados na forma de vazamento de graxa e aquecimento demasiado nos mancais. Observava-se nas manutenções o desgaste excessivo ou a falta dos anéis de vedação, que deveriam estar inseridos junto aos flanges.

Sendo assim, a contaminação da atmosfera de comutação é uma pauta importante a ser relacionada no estudo do desgaste anormal dos comutadores das máquinas conversoras.

2.2.3 Coeficiente de atrito entre superfícies

O atrito entre superfícies é a força que se opõe ao deslizamento de um objeto sobre outro. Observando a Figura 7, 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. A força de atrito surge porque todo contato entre superfícies é irregular, por mais polidas que estas sejam, sempre haverá rugosidades mínimas que se relacionam reagindo a força de deslizamento.

Figura 7 - Força de atrito (diagrama de forças genérico)



Fonte: Autoria própria

O coeficiente de atrito ou de fricção (μ), expresso pela Equação 4 de maneira geral, é adimensional, sendo a relação dada entre o quociente da força de atrito (F_a) pela normal (N). No instante anterior a movimentação do corpo, tem-se a força de atrito (F_{ae}) maior que a força aplicada (F), permitindo o cálculo do atrito estático (μ_e) conforme a Equação 5. Quando a força aplicada (F) supera a força de atrito estático (F_{ae}) o corpo acelera; agora uma reação de menor intensidade, chamada força de atrito cinético (F_{ac}) permite o cálculo do atrito cinético (μ_c) conforme a Equação 6.

$$\mu = \frac{F_a}{N} \quad (4)$$

$$\mu_e = \frac{F_{ae}}{N} \quad (5)$$

$$\mu_c = \frac{F_{ac}}{N} \quad (6)$$

No caso do conversor eletromecânico o contato escova-comutador opera regularmente em velocidade constante. Por não haver aceleração relacionada nesses intervalos, conclui-se que, a força de aceleração da máquina se iguala à somatória das forças de atrito do conjunto, sendo a força de atrito cinético no contato escova-comutador relevante para esse estudo.

O coeficiente de atrito cinético afeta a máquina no que diz respeito as perdas, a temperatura de operação do coletor e ao trabalho silencioso. A meta é, portanto, obter o mínimo coeficiente de atrito entre escova e comutador. (ARIZA, 1977).

Muitos fatores influem no coeficiente de fricção escova-comutador: a superfície do coletor, o material da escova, a temperatura no contato e a pressão de molas são os principais.

2.2.3.1 Superfície do comutador e material da escova

Nos comutadores o chamado reperfilamento conta com usinagem utilizando ferramenta de diamante, rebarbamento de quinas das arestas das lâminas, retífica dos vértices e análise da rugosidade final. Esses procedimentos, mesmo que rigorosamente controlados não garantem no ponto de vista mecânico a gestão do coeficiente de atrito, ele depende também da composição da escova e como esse material irá responder ao tipo de operação da máquina.

As escovas utilizadas nesse estudo são eletrográficas, sua matéria prima varia em proporção e tratamento térmico dependendo do tipo e do fabricante; essa classe tem grande aplicação em máquinas com altas velocidades periféricas em que se deseja uma boa lubrificação.

Nos datasheets dos fabricantes de escovas encontram-se valores tabelados de coeficiente de atrito para cada qualidade de material, contudo, é importante ressaltar que tais dados foram levantados para condições controladas em laboratório. Sendo assim, não é correto assumir que estes valores de atrito serão desenvolvidos em um dado regime de operação de uma máquina, servem apenas para uma comparação teórica na escolha do grade a ser testado.

2.2.3.2 Temperatura no contato

Do ponto de vista mecânico o coeficiente de atrito cinético definitivamente varia com a temperatura; por exemplo, um caminhão pode ter sua frenagem comprometida se houver um superaquecimento do conjunto, podendo gerar acidentes com a perda repentina dos freios.

Esse comportamento físico, descrito de forma empírica devida sua complexidade, pode ser justificado como a elevação da ductilidade das irregularidades na superfície dos corpos, que reduz o ancoramento e, conseqüentemente, o coeficiente de fricção (BILFINGER 2018).

Contudo, não há um consenso para suas causas.

26ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

7º PRÊMIO TECNOLOGIA & DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

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. De maneira geral, é crescente para uma faixa de temperaturas baixas, supostamente devido ao aumento de tamanho das irregularidades gerando acirramento entre o contato dos corpos, chegando num valor máximo e caindo abruptamente, conforme o fenômeno descrito, atingindo um valor mínimo no seu intervalo convexo e tornando a crescer se houver incrementos na temperatura.

No caso do contato escova comutador a questão da temperatura é ainda mais complexa: existem as perdas relacionadas ao atrito mecânico, que se alteram de maneira concomitante ao coeficiente de atrito, há também as perdas elétricas relacionadas a densidade de corrente expressas como o somatório das perdas na condução pelo corpo da escova e no contato.

De acordo com Braçan (1987), é possível calcular de maneira empírica as perdas mecânicas por atrito nas escovas eletrográficas (P_a) como o produto da constante 0,25 pela velocidade periférica do comutador (V) e a área de contato das escovas (A), conforme a Equação 7:

$$P_a = 0.25 \times V \times A \quad (7)$$

O valor de potência dissipada na condução pelo corpo de uma escova do conversor (P_c) é função do quadrado da metade da corrente de armadura da máquina (I_a), da resistividade do material que a compõe (ρ), da sua área de seção transversal (A) e do comprimento respectivo (l), sendo descrito pela Equação 8.

A potência dissipada pela queda no contato de uma escova do conversor (P_q), é dada pelo produto entre a metade da corrente de armadura (I_a), pela queda no contato da escova respectiva (U), sendo descrito pela Equação 9.

$$P_c = \frac{\left(\frac{I_a}{2}\right)^2 \times \rho \times l}{A} \quad (8)$$

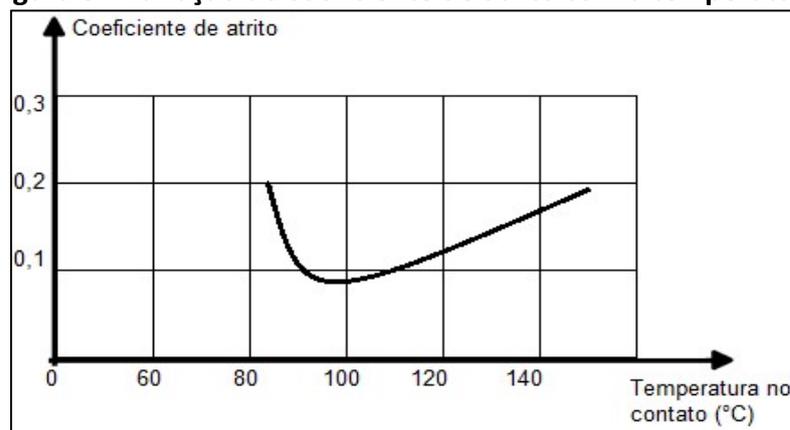
$$P_q = \left(\frac{I_a}{2}\right) \times U \quad (9)$$

Utilizando respectivamente as Equações 7, 8 e 9; considerando os valores de operação nominais da máquina e admitindo os parâmetros físicos obtidos no datasheet da escova original obtém-se os valores para cada uma das 4 escovas: $P_a = 21,84W$ (58,5%); $P_c = 0,25W$ (0,7%); $P_q = 15,2W$ (40,8%); totalizando 149,2 W para o conjunto das 4 escovas.

A análise quantitativa realizada diz respeito as perdas, sendo dispensadas quaisquer relações de transferência de calor para executar a análise sob o aspecto da temperatura no contato. Os cálculos não contemplam variações de densidade de corrente, diminuição de comprimento gerada pelo desgaste, alterações da resistividade com a temperatura, mudanças de queda no contato com a pressão, dentre outros. Portanto, os valores apresentados servem apenas para demonstrar a parcela de contribuição de cada perda para o aquecimento do contato e reforçar a complexidade gerada pelo grau de dependência de tantas variáveis correlacionadas.

Conforme Ariza (1977), por meio de medições bastante difíceis (utilizando um par termoelétrico), é possível observar a variação do coeficiente de atrito com a temperatura na face de contato, seguindo o aspecto de uma curva convexa descrita pela Figura 8.

Figura 8 - Variação do coeficiente de atrito com a temperatura



Fonte: Adaptado de Manutenção Corretiva de Máquinas Elétricas Rotativas (Ariza,1977, p.85)

Percebe-se uma faixa de temperatura ótima (85°C a 110°C) para a qual o coeficiente de atrito é mínimo, sendo recomendada de maneira genérica a operação nessa faixa (ARIZA, 1977).

26ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

7º PRÊMIO TECNOLOGIA & DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

A baixa densidade de corrente, abordada no item 2.2.1 como a principal responsável pela não vaporização do cobre encrustado e, portanto, pelo ranhuramento, também influi significativamente no aumento do coeficiente de atrito; segundo Ariza (1977, p. 86):

“Acontece que, muitas vezes, a máquina trabalha com valores de carga abaixo da nominal, ou mesmo sem carga, fazendo com que a escova trabalhe “fria”. Nesse caso, vamos ter valores do coeficiente de fricção altíssimos e, em decorrência, a escova riscará o coletor, retirando sua película lubrificante”.

Sendo assim, a suspeita da baixa carga de comutação das máquinas em operação encontra no aumento do coeficiente de atrito mais uma das causas prováveis para o ranhuramento.

2.2.3.3 Pressão de molas dos porta escovas

A força das molas é fundamental no processo de coleta de corrente, o desequilíbrio de pressões de contato num mesmo porta escovas leva a condução desigual de corrente nas pistas, podendo gerar sobrecarga em uma escova e baixa densidade de corrente na outra. A variação do comprimento das escovas (ΔX), ocasionada pelo desgaste natural de operação faz variar a pressão de molas (P_m) conforme a Equação 10:

$$\Delta P_m = \frac{\text{Constante da mola} \times \Delta X}{\text{Área de seção da escova}} \quad (10)$$

Observando a variação natural de pressão com o comprimento das escovas, o fabricante do conversor recomenda a faixa de 331 gf/cm² a 404 gf/cm² para os quais a operação é adequada. Do ponto de vista de coeficiente de atrito a variação da força de molas influi em dois âmbitos: se for abaixo da recomendada poderá haver falha na condução, que danifica a pista e a face de contato, elevando a fricção; por outro lado, se for demasiada haverá um aumento do coeficiente de atrito dada a elevação das interações entre as superfícies (ARIZA, 1977).

Observando novamente a Figura 5 (item 1.3.4 desse trabalho) percebe-se uma relação extremamente próxima entre a curva de desgaste e a descrição da variação do atrito, ambos

26ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

7º PRÊMIO TECNOLOGIA & DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

em função da mudança da pressão de molas. À esquerda o desgaste elétrico, causado pela queima do filme, denota o aumento do atrito com a precarização da pista, à direita o desgaste mecânico, denota a elevação do atrito devido ao aumento das interações entre superfícies.

Fundamentados na prática e esboçando os níveis de vibração na operação das máquinas, alguns autores estabelecem faixas de valores de pressão para cada tipo. Observando a Tabela 3, conforme Braçan (1987), encontram-se os valores de pressão recomendados.

Tabela 3 – Referência de pressões recomendadas para os tipos de máquinas

TIPO DE MÁQUINA	PRESSÃO NA ESCOVA
Máquina estacionárias livres de vibração e ruído	150 a 200 gf/cm ²
Máquinas com 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

Fonte: Adaptado de Manual Carbonec (p. 21)

Comparando a pressão recomendada pelo fabricante com a Tabela 3, encontra-se uma discrepância quanto ao tipo de operação do conversor; ele estaria operando com o mesmo nível de vibração dos motores de tração, superando até as máquinas com alta vibração.

O conversor, conforme descrito no item 1.1 desse trabalho, está sujeito às vibrações geradas pelas deformidades 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 coxins, que também absorvem vibração. Sendo assim, um provável excesso nas pressões de molas poderia estar contribuindo para o aparecimento do ranhuramento.

3 ANÁLISE DE RESULTADOS

A abordagem teórica dos manuais, livros e catálogos, geralmente é feita de maneira qualitativa, busca contemplar muitas formas de operação e apresenta como recomendação final o teste das escovas na máquina. Sendo assim, executou-se os seguintes procedimentos:

3.1 Levantamento da densidade de corrente média na operação

A densidade de corrente, função do carregamento do conversor, varia com inserções e retiradas das seguintes cargas: faróis, refrigeração, iluminação dos salões, recarga das baterias, compressor, ventilação, exaustão e o freio reostático, que polariza as máquinas de tração na configuração de gerador para que executem a dissipação de potência nos reostatos.

Para calcular o carregamento médio na operação, conforme recomendado no item 2.2.1 desse estudo, mediu-se a influência de cada carga na amplitude da corrente de armadura da máquina CC; esses valores são apresentados na Tabela 04.

Tabela 4 - Corrente de armadura da máquina CC em função do carregamento

Carga	Farol	Ar Condicionado	Iluminação	Baterias	Exaustão e ventilação	Compressor	Freio reostático	
Correntes (A)	1,6	2,1	2,2	2,2	3,9	3,6	6,1	
Corrente dos conjuntos (A)	7,20							
	10,0							
	12,1							
	15,3							

Fonte: medições executadas pelo autor (TUE 18 em 24 de outubro de 2019)

Considerando informações de operação, de rastreabilidade e de controles realizados por horímetros nos trens, sabe-se que todas as cargas, exceto o compressor e o freio, são energizadas continuamente. Os compressores ficam ligados em média 135 horas num período observado de 1 mês. Nesse período, os trens rodam aproximadamente 5000km, mantendo os conversores energizados por cerca de 650 horas. A via comercial da CBTU BH conta com 19 estações, dispostas em 28,1km de linha, percorridas com uma média de 45 minutos.

Desse modo, observa-se que o compressor contribui para o aumento da corrente de armadura em apenas 20,8% do tempo das viagens no mês. Já a frenagem reostática, aplicada em todas as 19 estações por um tempo médio de 23 segundos, representa num total de 178 viagens mensais, 21,6 horas de frenagem, que retratam apenas 3,3% do tempo de funcionamento da

26ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

7º PRÊMIO TECNOLOGIA & DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

máquina nesse período. Sendo assim, calcula-se através da Equação 11 a densidade de corrente média observada no conversor quando em operação comercial (D_{cm}):

$$D_{cm} = \frac{(\text{Corrente média de operação da máquina})}{0,5 \times (\text{N}^\circ \text{ de escovas}) \times (\text{Área de seção transversal})} =$$

$$\frac{(75,9\% \times 7,2A) + (20,8\% \times 10,0A) + (3,3\% \times 12,1A)}{0,5 \times (4) \times (2,44)} = 1,63 \text{ A/cm}^2 \quad (11)$$

O valor encontrado representa 41,9% da densidade de corrente nominal, esse resultado demonstra que conforme as suspeitas os conversores operam em baixa carga de comutação.

3.2 Levantamento da força de atrito e da temperatura no contato

O conversor é alimentado em 3000Vcc, nível de tensão incomum para uma máquina com apenas 50kW, que leva a valores reduzidos de corrente de armadura. Dada a baixa carga de comutação, persiste a dúvida quanto aos níveis de temperatura de operação da máquina.

Na Oficina, realizando a alimentação da máquina apenas por meio do campo série, à baixa tensão CC, suprimindo o campo shunt, é possível realizar ensaios que demandam velocidade nominal. Energizando a excitatriz, também é possível implementar pequenas cargas trifásicas no alternador, levando a máquina a comutar em corrente nominal. Ainda em baixa tensão, cerca de 600 Vcc, é praticável a injeção de pequenas correntes no campo shunt, que elevam consideravelmente o fluxo polar, aumentando as tensões de velocidade, fazendo com que a máquina opere com tensões mais elevadas e correntes bem próximas do vazio.

Por meio de um pirômetro digital devidamente ajustado, foram executadas uma série de medições no corpo de escovas em máquinas com as mais diversas configurações de pressão, grades e densidades de corrente. Com a máquina comutando à corrente nominal, utilizando as escovas com grade 01 e as pressões recomendadas pelo fabricante, obteve-se o valor

26ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

7º PRÊMIO TECNOLOGIA & DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

máximo de 60°C; retirando um par de escovas, observou-se a duplicação da densidade de corrente e a pequena, porém inesperada, queda na temperatura para os 57°C.

Ambos os valores de temperatura medidos estão longe da faixa prevista por Ariza (1977), conforme a Figura 8 desse estudo, que considera normais os valores maiores que 80°C. Isso posto, suspeita-se da forma de medição; talvez a temperatura superficial do corpo da escova não representasse a temperatura do contato com o comutador. Conforme descrito no item 2.2.3.2 desse trabalho, Ariza (1977) recomenda a medição da temperatura inserindo um termopar no interior da escova, advertindo da dificuldade de se realizar tal procedimento.

Para garantir que o desgaste natural não levaria ao toque do sensor no coletor, executou-se a furação no corpo das escovas através de uma fresa CNC, mantendo 5mm da face de contato. Apesar do carbono ser um ótimo condutor térmico, desconfia-se ainda de qual a real temperatura no toque da escova com o comutador, sendo impraticável medi-la e de extrema complexidade calculá-la com precisão. Contudo, admite-se estar seguindo os critérios recomendados por Ariza (1977), pretendendo, portanto, uma comparação de resultados.

Não foi possível a compatibilização entre os termopares disponíveis e o espaço nas 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 5V, com precisão de 0,5 graus para mais ou para menos.

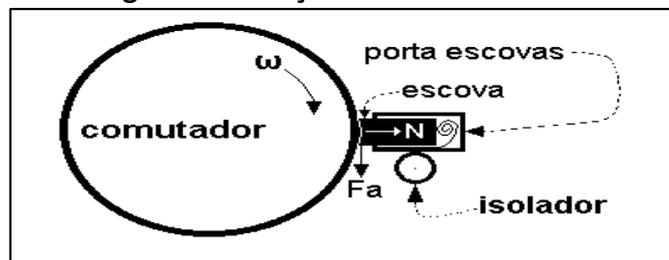
Para a medição do coeficiente de atrito cinético, conforme descrito no item 2.2.3 desse trabalho, é necessário conhecer a força normal e a variação da força de atrito em função da temperatura.

No caso da comutação, como é possível observar na Figura 9, a força normal (N) tem mesma amplitude, porém com sentido inverso à força da mola; já a força de atrito (Fa), perpendicular

à normal, surge nas escovas assim que há movimentação da pista na forma de velocidade angular (ω), no sentido tangencial ao coletor, tentando contrariar seu giro.

A amplitude da fricção pode ser medida através da força de reação do porta escovas à força de atrito, que impede que o mesmo entre em movimento junto com o comutador. Admitindo que não há aceleração no 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.

Figura 9 - Diagrama de forças no contato escova comutador



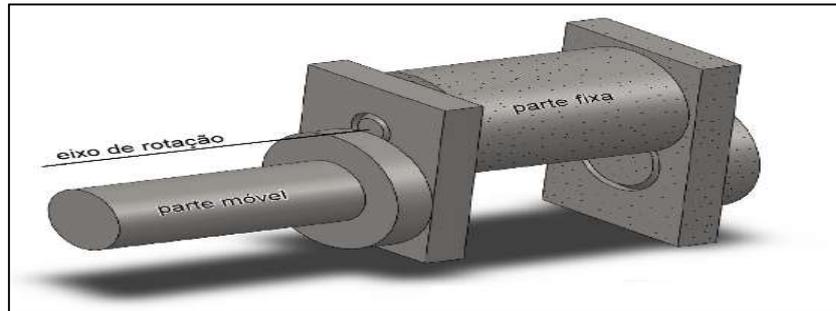
Fonte: Autoria própria

O dispositivo que pretende medir a fricção, utiliza-se do momento gerado pela força de atrito no sentido de rotacionar o porta escovas; medindo-o através de um dinamômetro com o braço de alavanca adequado, obtém-se a função da força de atrito no tempo.

Por meio de adaptações, se fez o porta escovas rotacionar em torno do isolador, porém, as medições se mostraram inconsistentes, já que a própria força de molas imprimia ao sistema um torque, resultando em medições subtrativas e que não retornavam a zero após a parada.

Para anular a influência da normal, projetou-se e construiu-se um dispositivo com o eixo de rotação deslocado para o baricentro das escovas, visto na Figura10, fazendo com que qualquer momento fosse originado unicamente pela força de atrito. A medição foi executada por meio de um dinamômetro digital, posicionado através de um braço de alavanca de comprimento igual a distância entre o centro de massa e a face das escovas, de forma a permitir a coleta da medida de atrito quando em movimento e de anular seu valor numa situação de parada.

Figura 10 - Projeto do dispositivo para medição da força de atrito



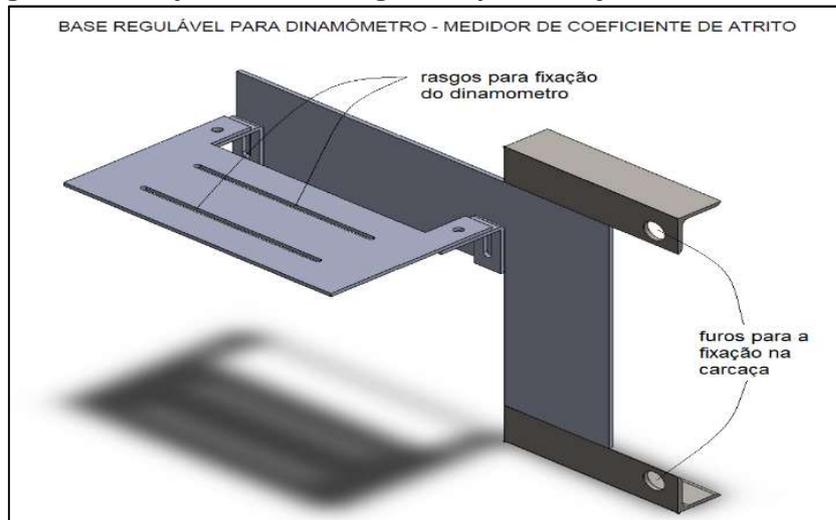
Fonte: Autoria própria

O dinamômetro empregado, tipo IP-90DI-50 da Impac, utiliza quatro sensores de carga de alta precisão (tipo S) configurados em ponte de Wheatstone. O equipamento realiza medidas de 0,5 a 50 N, com uma resolução de 0,01N e precisão de mais ou menos 0,5%.

Foi necessário fixar solidamente o dinamômetro ao estator da máquina para que houvesse a possibilidade de realizar o ajuste de zero e, além disso, propiciar estabilidade nas medições.

Sendo assim, projetou-se e construiu-se um dispositivo regulável, conforme a Figura 11.

Figura 11 - Projeto de base regulável para fixação do dinamômetro



Fonte: Autoria própria

Diversas melhorias foram feitas para alcançar a estabilidade do sistema, porém, mesmo depois destas, as medições continuavam oscilando, impedindo qualquer conclusão assertiva.

Uma forma pensada para resolver o problema seria aumentar a taxa da amostragem,

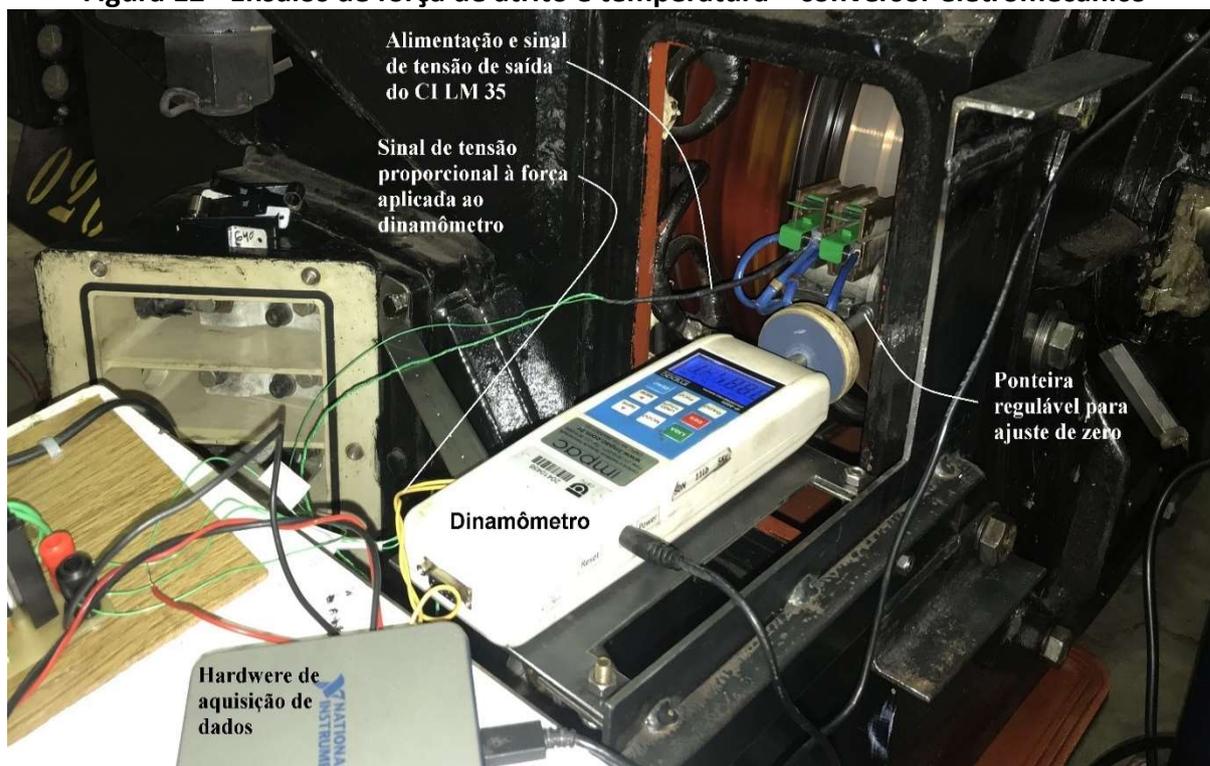
registrando centenas de medições e posteriormente tratando os dados num computador, porém, o dinamômetro citado não possui uma saída analógica que possibilite tal aquisição.

Como solução, se interpretou o circuito do equipamento a partir da célula de carga até a última saída dos amplificadores operacionais antes da conversão AD (analógico digital); por meio de 2 cabos, sem interferir no circuito do equipamento, se extraiu o dado sinal de tensão.

Para a interface, utilizou-se de um hardware de aquisição de dados da National Instruments (DAC), esse equipamento recebe os sinais de tensão relacionados a força e a temperatura convertendo-os em sinais digitais e enviando-os por meio de um cabo USB para o computador.

O arranjo de todos esses equipamentos instalados na máquina pode ser visto na Figura 12:

Figura 12 - Ensaios de força de atrito e temperatura – conversor eletromecânico



Fonte: Autoria própria

A calibração da temperatura foi feita com base no ganho do CI LM 35 (10mV/°C), para o atrito foi necessário levantar a curva de tensão em função da força coletada pelo dispositivo, encontrando uma reta crescente com regressão linear praticamente unitária.

26ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

7º PRÊMIO TECNOLOGIA & DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Após êxito na calibração, selecionou-se então um conversor completamente revisado (N°026), levantou-se as curvas buscando manter a velocidade constante em 1800 rpm e os mesmos padrões de aceleração, porém, dado o ajuste manual da fonte, nas trocas de carga é possível que tenha havido alguma variação na velocidade, sendo toleráveis alterações na temperatura.

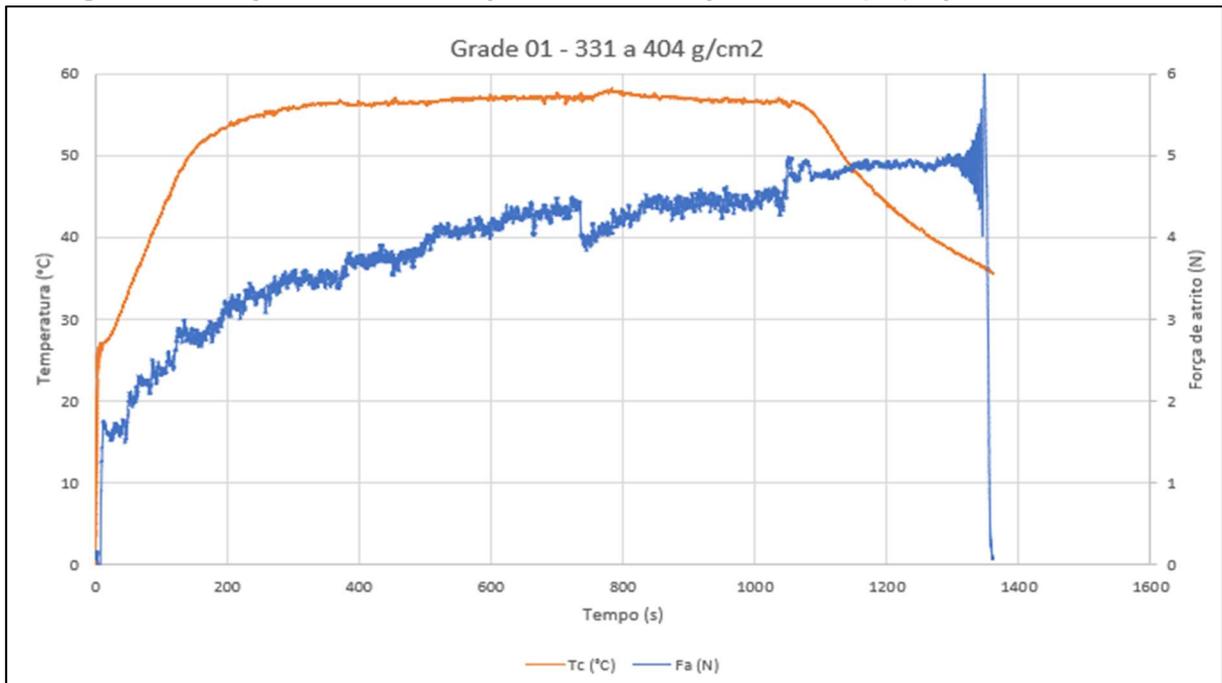
Os ensaios seriam executados em quatro regimes de condução; utilizando os grades 01 (original) e 03 (em teste), descritos pela Tabela 2 no item 2.1 desse trabalho, combinados com as pressões de molas nominal (331 a 404 gf/cm²) e reduzida (210 a 260 gf/cm²). Porém, dada uma recomendação do fabricante das escovas originais, relacionada a segurança da comutação, os testes do grade 01 com pressões de mola reduzidas não foram realizados.

Em todas as curvas acelerou-se a máquina até a velocidade nominal, obtendo após a estabilização do giro a corrente na faixa dos 8A, que faz comutar conforme densidade de corrente média, sendo o ponto mais relevante para escolha da configuração ideal. Em seguida, inseriu-se carga no alternador e procedeu-se o ajuste na fonte para a faixa dos 15A, que simula o carregamento total da máquina quando em operação no trem. Por fim, retirou-se as cargas e se alimentou quase instantaneamente o campo shunt, fazendo com que a corrente reduzisse para faixa dos 3A, que simulam o carregamento da máquina operando a vazio no trem.

Com o desligamento percebeu-se em todas as curvas o declínio da temperatura dada a anulação das perdas elétricas e a redução das perdas mecânicas com a queda de velocidade. Por outro lado, houve crescimento da força de atrito dada a ausência de eletrodeposição. Na parada da máquina as medições de fricção foram contaminadas por surtos mecânicos; possivelmente, a queda na velocidade causou ressonância no dispositivo utilizado, que não possui mecanismos de amortecimento e retorno ao batente para não interferir nas medições.

A Figura 13 mostra a operação original: escovas de grade 01 comutando à pressão nominal.

Figura 13 - Força de atrito e temperatura no tempo – Grade (01) – pressão nominal



Fonte: Autoria própria

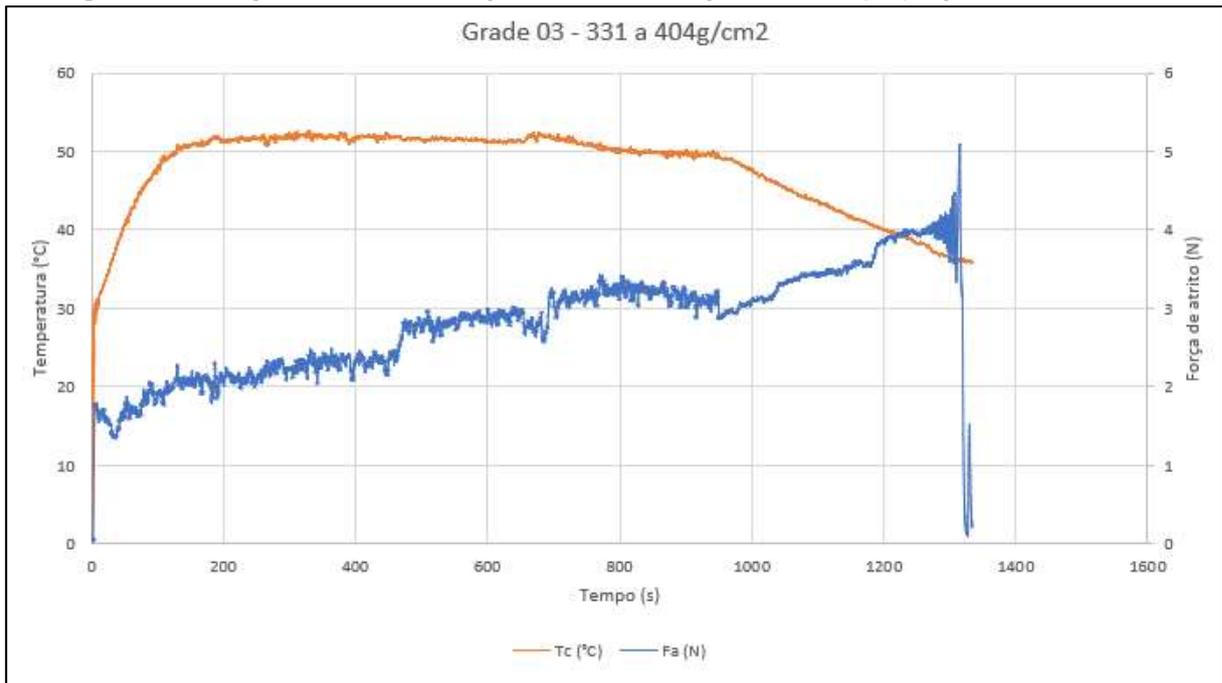
Observando a curva de temperatura, se percebeu uma subida característica, estabilizando-se em 56,6°C após 390 segundos de energização com 8A, junto com a temperatura, a fricção demonstra a mesma forma de crescimento, se estabilizando em 3,5 N de força de atrito.

Ao inserir carga, no intervalo de 390 a 730 segundos, ocorre um acréscimo na temperatura, porém, esse acréscimo é muito menor que o esperado, levando as escovas a 56,9°C e fazendo a máquina comutar com uma força de atrito de 4,35N.

Retirando a carga se observou, no intervalo de 730 a 1045 segundos, um pequeno crescimento da temperatura devido a aceleração do conversor, assim que houve a estabilização mediou-se 56,4°C, uma temperatura mais baixa que as duas primeiras, dada ao afundamento da densidade de corrente, e uma força de fricção de 4,5N, maior até mesmo que a verificada quando em maior carregamento.

A Figura 14 mostra a operação com as pressões originais, porém, utilizando o grade 03.

Figura 14 - Força de atrito e temperatura no tempo – Grade (03) – pressão nominal



Fonte: Autoria própria

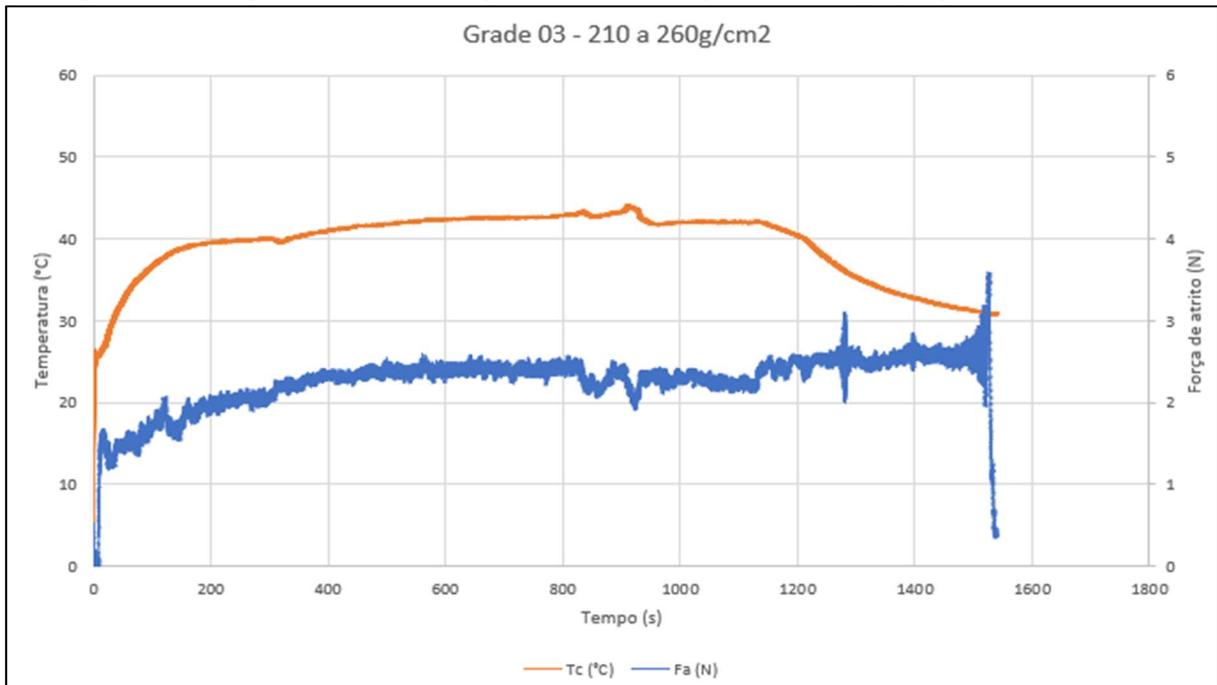
A curva de temperatura apresentou o mesmo crescimento percebido na Figura 13, porém a estabilização aconteceu em 51,7° C após 440 segundos de operação a meia carga, valor 8,7% menor que com o grade 01. A fricção atingiu um patamar também inferior, 2,38N que retratam a queda de 32% na força para as mesmas condições de carregamento e pressão.

Com carregamento máximo, a temperatura se estabilizou nos 51,2°C, no intervalo de 440 a 650 segundos, que demonstram um decréscimo pequeno, causado provavelmente pela baixa na velocidade. Entretanto, como percebido nas medições, a fricção se sensibiliza mais com a variação da corrente que com pequenas mudanças de temperatura causadas por ela, sendo assim, o patamar de 2,9N é franco, e representa uma queda de 33% em relação ao grade 01.

Comutando a vazio, no intervalo de 650 a 950 segundos, houve pequena queda na temperatura para 49,6°C. Como na primeira medição, houve um incremento na fricção que atingiu depois do equilíbrio 3,1N de força, entretanto, esse patamar caracterizou uma redução de 31% no atrito quando comparado ao grade 01 operando da mesma forma.

A Figura 15 mostra a operação com o grade 03, porém, utilizando pressões reduzidas.

Figura 15 - Força de atrito e temperatura no tempo – Grade (03) – pressão reduzida



Fonte: Autoria própria

Partiu-se a máquina a meia carga encontrando o crescimento característico e estabilidade na temperatura igual a 39,6°C aos 320 segundos. A força de atrito seguiu a crescente da temperatura estabilizando-se nos 2,16N, valor 38% menor comparado as condições originais.

À plena carga, no intervalo de 320 a 830 segundos, encontrou-se um crescimento bastante suavizado da força de atrito. A estabilidade foi observada nos 2,49N, valor 43% menor que em condições originais, após o crescimento concatenado com a temperatura que atingiu 43,3°C.

Para o carregamento mínimo, no intervalo de 830 a 1020 segundos, houve uma pequena disparada, causando aumento da temperatura e redução da fricção. Na sequência percebeu-se a o decréscimo e a estabilização da temperatura em 42,0°C, desenvolvendo 2,25N de força de atrito, metade da fricção observada em condições originais; contudo, o valor a vazio foi menor que à plena carga, o que difere das duas curvas anteriormente apresentadas.

Fica clara a mudança no desenho das curvas quando se altera a força de molas, possivelmente graças a mudança de queda no contato que influi nas perdas elétricas.

3.3 Desgaste das escovas em operação e progressão da ovalização

Conforme abordado no item 1.3.4 desse trabalho, o mínimo desgaste das escovas em teste (em mm/km) é apreciável, porém, conforme feito nesse estudo, é importante ter como premissa todas as condições para comutação linear (item 1.3), e assim, dar validade ao teste.

Algumas medidas devem ser tomadas para a realização de testes de escovas: a superfície do coletor deve estar livre de imperfeições, o comutador deve ser limpo caso haja filme de escovas anteriores, o porta escovas deve apresentar bom funcionamento, as escovas devem ter sua face de contato lixada de maneira que o chanfro confira um contato elétrico adequado, favorecendo o assentamento e a formação do filme. (ARIZA, 1977).

Para que houvesse igualdade nas comparações procedeu-se a manutenção completa das 6 máquinas consideradas nesse teste (008, 009, 019, 020, 039 e 046). Os conversores passaram por ensaios elétricos e mecânicos, desmontagem, lavagem, secagem, impregnação, repintura, reperfilamento de comutadores, substituição dos rolamentos nos casos necessários e a montagem dos mancais feita com anéis novos para a vedação da graxa.

A troca de escovas, dado o desgaste natural com o tempo, aumenta as chances de falha em operação, por esse motivo o conversor faz uso de quatro escovas que trabalham em par, conduzindo em paralelo, diminuindo as chances de centelhamento. Diante disso, apesar da baixa carga de comutação, descarta-se a possibilidade de retirar algumas escovas.

Além da questão da segurança proporcionada pela condução paralela das escovas, conforme demonstrado no item 3.2 desse trabalho, a densidade de corrente tem ínfima influência na

temperatura das escovas e, portanto, nas forças de atrito que intensificam o desgaste anormal do comutador, tornando injustificável o risco da condução em pista única.

Tendo como base os ensaios realizados no item 3.2 desse trabalho, concluiu-se que os três regimes de condução abordados seriam seguros para o teste em operação, portanto, ele foi executado conforme a Tabela 5 nas respectivas máquinas:

Tabela 5 - Conversores em teste na operação

Nº Conversor	008	009	019	020	039	046
TUE-Carro	16-RB	06-RB	06-RA	03-RA	16-RA	01-RA
Pressão (gf/cm ²)	210 a 260	331 a 404	331 a 404	331 a 404	210 a 260	331 a 404
Grade	03	01	03	03	03	01

Fonte: Elaborado pelo autor

Nas medições de ovalização, feitas com periodicidade através do aparelho eletromecânico miligraphe, não foram observados aumentos consideráveis em nenhuma das máquinas em teste, sendo necessário um tempo maior de observação para que se chegue a uma conclusão.

Nenhuma falha foi registrada nos conversores desde o início do teste, as pátinas se mostraram consistentes e não houve quebras ou centelhamento, como é possível perceber na Figura 16; entretanto, a máquina 020 tem apresentado um ruído agudo, provavelmente folga nos rolamentos, tal problema deve ser sanado assim que for executada sua manutenção corretiva.

Figura 16 - Aparência da face de contato das escovas em teste sem surto



Fonte: Autoria própria

Apesar do observável raiamento, aparência inicial do ranhuramento, não se pode afirmar que o problema progredirá dado o tempo reduzido de um ano de observação, contudo, percebeu-se uma maior uniformidade no filme e a ausência de espelhamento da face das escovas que operavam com pressão de molas reduzidas.

Durante a compilação dos dados observou-se de maneira geral um desgaste pronunciado nos primeiros dias de operação da máquina, esse fenômeno pode ser explicado como o consumo maior do corpo da escova até que houvesse a formação e consolidação do filme. Sendo assim, para o cálculo do desgaste médio, utilizou-se de todas as medidas executadas desde o início do teste desconsiderando-se o desgaste inicial exacerbado. Os valores de consumo mostrados na Figura 17, foram obtidos após realizar a média de três formas diferentes de cálculo de desgaste médio, sendo tal procedimento rigorosamente seguido para as 6 máquinas.

Figura 17 - Desgaste médio de escovas das máquinas em teste



Fonte: Autoria própria

Os valores de desgaste observados nas máquinas 008 e 039 apresentaram apenas 5,5% de variação, sendo esse um patamar de consumo bastante confiável; já as máquinas 009 e 046 apresentaram 11,4% de variação, sendo essa faixa também considerável para o consumo.

As máquinas 019 e 020 apresentaram uma discrepância de 37,7% nos valores de consumo; provavelmente em decorrência do problema nos rolamentos mancais, que elevam a vibração e pioram a comutação, o conversor 020 tenha mostrado resultado diferente da outra máquina que operava nas mesmas condições, portanto, nesse caso, desconsiderou-se os seus valores.

A troca do grade 01 pelo grade 03, mantendo as pressões de mola originais, representa uma redução média de no consumo das escovas em 54,5%. Se houver ainda a redução da pressão de molas para valores seguros, a redução é de 72,4%.

A redução do desgaste está intimamente ligada à redução das forças de atrito e do próprio coeficiente de fricção, sendo benéfica à formação e consolidação do filme. A diminuição do consumo das escovas gera economia não só na compra desse consumível, mas também na mão de obra para a realização das trocas, além disso, a diminuição das trocas reduz as chances de falha da máquina por centelhamento, melhorando os índices de disponibilidade de trens.

3.4 Revelação do ancoramento de cobre na face de contato das escovas

Conforme se observa na Figura 16, a avaliação visual qualitativa da face de contato das escovas é bastante complicada, podendo levar a interpretações precipitadas. Tomando como referência um guia de manutenções da General Eletric, descobriu-se ser possível revelar as partículas de cobre encrustadas na face de contato de uma escova; a olho nu, a face se mostra extremamente polida, com um caráter vítreo e escuro, isso impossibilita a visualização.

Conforme Bruni (1984), “A presença do cobre poderá ser reconhecida se aquecermos a escova suspeita ao rubro, com o auxílio de um maçarico, mergulhando-a em seguida num recipiente metálico contendo álcool, o que reduz o cobre, eliminando a oxidação, e revelando o cobre em cores claras.”

O procedimento descrito, ilustrado na Figura 18, foi executado por meio de um conjunto oxiacetileno (maçarico), elevando a temperatura das escovas para valores próximos a 1000°C.

Figura 18 - Aquecimento e resfriamento das escovas no álcool



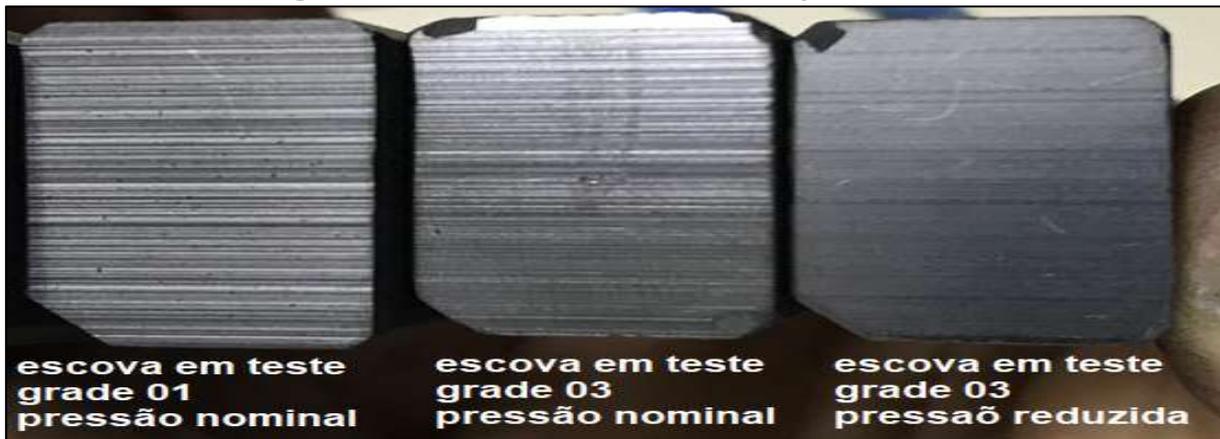
Fonte: Autoria própria

Antes da comprovação da eficácia do experimento, houve uma falha em sua execução; utilizou-se um recipiente metálico a fim de evitar um incêndio ou derretimento, porém, este estava coberto por tinta esmalte protetora, quimicamente isolado à oxidação.

A revelação não ocorreu em nenhuma das peças como esperado, provavelmente a redução do cobre só acontece se houver a oxidação de outro metal, no caso o recipiente de aço. Sendo assim, procedeu-se a limpeza da camada protetora e repetiu-se os procedimentos descritos com outros exemplares de escovas retiradas das mesmas máquinas.

O aquecimento foi executado com uma escova de cada configuração em teste na operação, mostradas na Figura 19. Nesse ângulo, mesmo antes da revelação, é possível perceber a diferença entre as configurações: o grade 01 comutando com pressão de molas nominal apresenta ranhuramento inicial do coletor, observa-se também pontos escuros sobre a face espelhada, possivelmente partículas de cobre ancorado; o grade 03 apresenta aparente raiamento do coletor e o indesejado espelhamento da face de contato; por fim, o grade 03, submetido a pressão de molas reduzida, apresenta a face opaca, sinal de uma boa comutação.

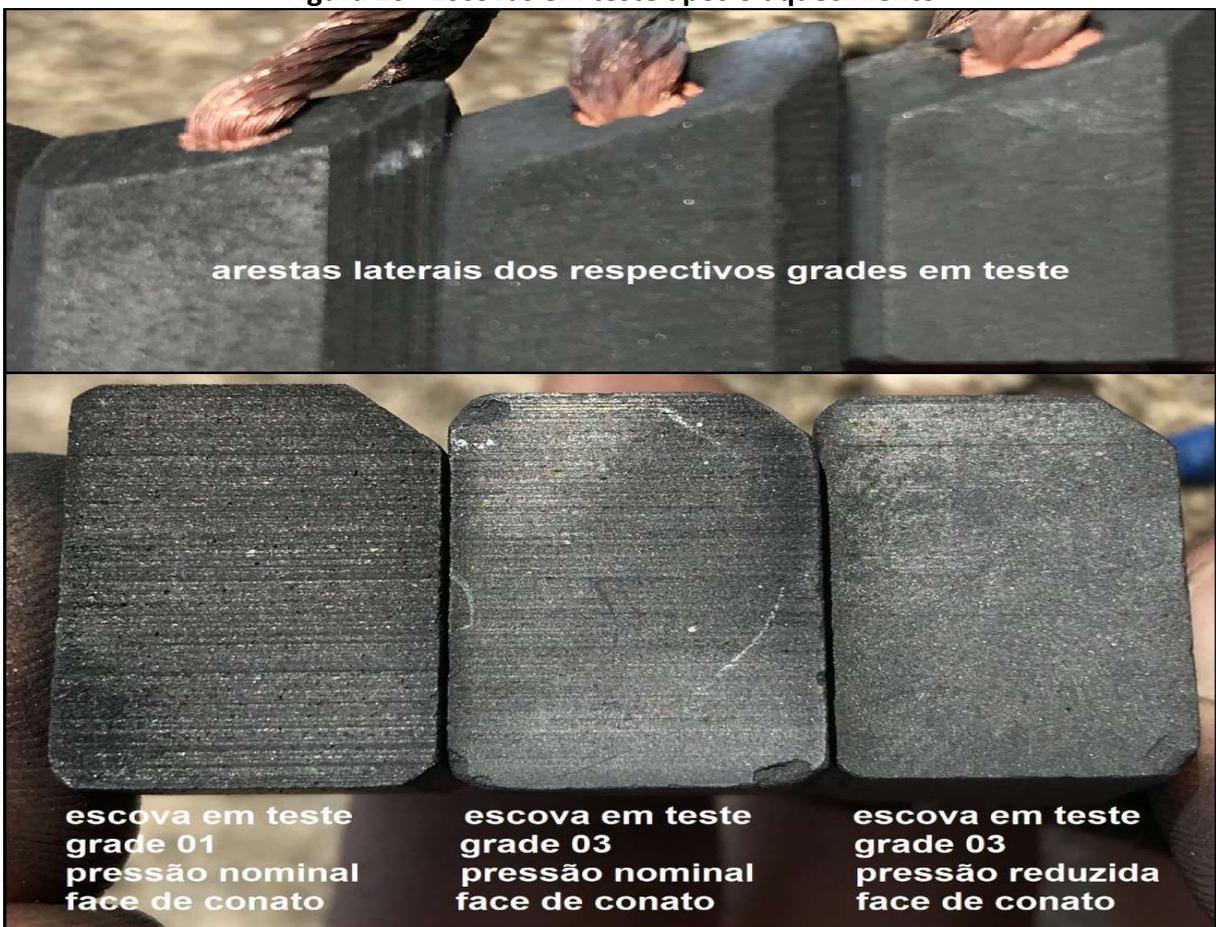
Figura 19 - Escovas em teste antes do aquecimento



Fonte: Autoria própria

A figura 20 mostra as escovas após a execução do procedimento. Por haver variações de qualidade utilizou-se de base de comparação a lateral corpo da própria escova, que apesar de aquecida à mesma temperatura da face de contato, nunca tocou o cobre do comutador.

Figura 20 - Escovas em teste após o aquecimento



Fonte: Autoria própria

26ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

7º PRÊMIO TECNOLOGIA & DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Observando as arestas laterais e a face das escovas, percebe-se o flagrante ancoramento de metal no grade 01 submetido à pressão de molas nominal, há pedaços consideráveis de cobre ancorados na face de contato, livres de oxidação e dourados devido à redução; por outro lado, ambas as escovas de grade 03, também apresentam pontos dourados na face de contato, porém, estes são bem menores e também são percebidos nas arestas laterais, que demonstram a existência no material de confecção da qualidade 03.

4 CONCLUSÃO

Com base nas explicações teóricas relacionadas ao ranhuramento, entende-se que a baixa carga de comutação, apesar de constatada na operação dos conversores no item 3.1 desse estudo, não é a principal responsável pelo desgaste anormal do comutador dado que a variação da densidade de corrente tem pequena influência na temperatura de contato.

A curva genérica de coeficiente de atrito em função da temperatura, mostrada na Figura 8 desse estudo, não contempla as máquinas conversoras, provavelmente foi levantada pelo autor fazendo uso de máquinas com densidades de corrente mais elevadas, mais comuns na indústria, de forma que seria possível encontrar as temperaturas na faixa dos 85 a 110°C descritas no item 2.2.3.2 desse trabalho.

Analisando a Equação 6, era esperada a redução na fricção dada a diminuição da normal na forma de força de molas em 36%, porém, havia suspeita sobre a manutenção do coeficiente de atrito, supostamente ele deveria variar com a temperatura e, portanto, com a mudança na força de molas. Executadas as medições, de posse das curvas de temperatura e força de atrito mostradas nas Figuras 13, 14 e 15 observou-se que a redução da pressão de molas para valores seguros de fato reduziu as forças de atrito, isso sem elevar de maneira descontrolada o coeficiente de fricção dada a ausência de centelhamento.

Percebe-se também uma redução considerável na fricção, média de 32% nos três regimes de carregamento, se ocorrer a troca do grade 01 pelo grade 03, ambos submetidos a pressão de molas nominal. Sendo assim, a qualidade 01 (original) foi superada pela qualidade 03 (em teste); esse resultado é reiterado pelo teste de desgaste das escovas em operação, abordado no item 3.3 desse trabalho, sendo demonstrado ainda a ausência de ancoramento graças a impregnação do novo grade, conforme demonstrado no item 3.4 desse estudo.

Embora constatadas ineficientes para o tipo de máquina e carregamento apresentados, em nenhuma hipótese as escovas originais devem ser combatidas como causa única e derradeira para o ranhuramento; de outro modo, um conjunto de fatores surge como cerne do problema, exigindo, portanto, uma solução conjunta de ações. Certamente, em algumas aplicações com regimes de operação distintos, as escovas de grade 01 apresentam desempenho satisfatório.

A operação do conversor com pressão de molas reduzida também demonstrou atenuar as variações bruscas de fricção nas mudanças de carregamento, conforme a Figura 15, tornando mais seguras as operações a vazio e a plena carga; além disso, a configuração diminuiu em 72% o desgaste médio das escovas em operação quando comparado a configuração original, como pode ser visto na Figura 17 desse estudo.

Importante ressaltar a eficácia do método de revelação de ancoramento de cobre na face de contato das escovas, visto na Figura 20, demonstrando mais uma vez que o ranhuramento estava atrelado ao tipo de grade e pressão de molas inadequados à operação do conversor.

Por fim, destaca-se o ganho operacional e econômico, materializado na forma de redução do consumo de escovas, que diminui as trocas e a probabilidade de falhas, e consolidado na almejada eliminação do ranhuramento, que busca a preservação da vida útil dos comutadores dos conversores rotativos e, portanto, da frota de TUE's série 900.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARIZA, C. (1977). **Manutenção corretiva de máquinas elétricas rotativas**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil.

BILFINGER, F. A. (01 de Outubro de 2019). EXA248 - **A influência da temperatura no coeficiente de atrito dinâmico**. Fonte: febrace.org.br:
<https://2018.febrace.org.br/virtual/2018/EXA/248/>

BORGES, A. N. (2007). **Caracterização de escovas de grafite e avaliação do seu desempenho em função da microestrutura**. Natal : Unversisde Federal do Rio Grande do Norte.

BRAÇAN, E. F. (1987). **Manual de Escovas Elétricas CARBOMECH**. São Paulo, São Paulo, Brasil.

BRUNI, K. A. (19 a 22 de junho de 1984). **Guia Para o Bom Desempenho de Escovas e Comutadores**. Toronto, Canada: GE Carbon Products.

CAVAZZONI, F. A. (2008). **Motor elétrico de tração de corrente contínua**. Contagem: O Lutador.

COBRASMA. (1986). **Manua de manutenção do conversor DEMETRÔ**. Belo Horizonte.

DEL TORO, V. (1994). **Fundamentos de máquinas**. Rio de Janeiro: Prentice-Hall do Brasil .

FITZGERALD. (1975). **Máquinas Elétricas**. São Paulo: McGRAW-HILL DO BRASIL.

CARBONE LORRAINE Groupe. (s.d.). TECHNICAL GUIDE . **Brushes for eletrocal machines**.

MORGANITE GEVISA. (s.d.). **Escovas Elétricas**. São Bernardo do Campo, São Paulo, Brasil.

VAUQUELIN Aurelien, V. J.-P. (2008). **A New Modelling OfnC Machines Taking**. International Conference on Electrical Machines, p. 1.