



**Universidade de Taubaté**  
Autarquia Municipal de Regime Especial  
pelo Dec. Fed. nº 78.924/76  
Recredenciada Reconhecida pelo CEE/SP  
CNPJ 45.176.153/0001-22

**Departamento de Engenharia Elétrica**  
Rua Daniel Danelli s/nº Jardim Morumbi  
Taubaté-Sp 12060-440  
Tel.: (12) 3625-4190  
e-mail: eng.eletrica@unitau.br

**JOSÉ RICARDO JERONIMO FLORES JÚNIOR**

**ESTUDO DE ATUALIZAÇÃO DOS MOTORES DE TRACÇÃO DA ESTRADA  
DE FERRO CAMPOS DO JORDÃO**

Trabalho de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Taubaté, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Rubens Castilho Junior

Taubaté  
2020



**Universidade de Taubaté**  
Autarquia Municipal de Regime Especial  
pelo Dec. Fed. nº 78.924/76  
Recredenciada Reconhecida pelo CEE/SP  
CNPJ 45.176.153/0001-22

**Departamento de Engenharia Elétrica**  
Rua Daniel Danelli s/nº Jardim Morumbi  
Taubaté-Sp 12060-440  
Tel.: (12) 3625-4190  
e-mail: eng.eletrica@unitau.br

## **ESTUDO DE ATUALIZAÇÃO DOS MOTORES DE TRACÇÃO DA ESTRADA DE FERRO CAMPOS DO JORDÃO**

**JOSÉ RICARDO JERONIMO FLORES JÚNIOR**

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE  
DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE “GRADUADO EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA”

### **BANCA EXAMINADORA:**

Prof. Dr. RUBENS CASTILHO JUNIOR  
Orientador/UNITAU-DEE

Prof. Dr. MAURO PEDRO PERES  
Professor/UNITAU-DEE

Eng. GUSTAVO MENDROT ANDRADE  
Engenheiro

Novembro de 2020

**Grupo Especial de Tratamento da Informação - GETI  
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI  
Universidade de Taubaté - Unitau**

F634e Flores Júnior, José Ricardo Jeronimo  
Estudo de atualização dos motores de tração da estrada de ferro  
Campos do Jordão / José Ricardo Jeronimo Flores Júnior. -- 2020.  
67 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade de Taubaté, Departamento de  
Engenharia Mecânica e Elétrica, 2020.  
Orientação: Prof. Dr. Rubens Castilho Junior, Departamento de  
Engenharia Elétrica.

1. Estrada de Ferro. 2. Campos do Jordão. 3. Automotrizes.  
4. Corrente contínua. 5. Corrente alternada. I. Universidade de Taubaté.  
Departamento de Engenharia Mecânica e Elétrica. Mestrado em Engenharia  
Elétrica e Eletrônica. II. Título.

CDD – 621.313

Dedico esta, bem como todas as minhas demais conquistas, à minha família, por sua capacidade de acreditar e investir em mim, e aos meus amigos, pelas alegrias, tristezas e dores compartilhadas.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades.

Agradeço ao Prof. Rubens Castilho Junior pela oportunidade, apoio e confiança na elaboração deste trabalho. À todos os professores envolvidos neste processo de aprendizado e conquista. À esta universidade, seu corpo docente, direção e administração pela oportunidade de realizar o curso.

Agradeço a minha mãe Lilian, que tem um destaque muito importante na minha vida, me dando apoio, incentivo nas horas difíceis, de desânimo e cansaço, sua presença significou segurança e certeza de que não estou sozinho nessa caminhada.

Finalmente, a todos os meus familiares, amigos e funcionários da Estrada de Ferro Campos do Jordão que me acompanharam e me apoiaram nessa jornada. E a todos aqueles que de alguma forma estiveram e estão próximos de mim, fazendo esta vida valer cada vez mais a pena.

“A verdadeira motivação vem de realização, desenvolvimento pessoal, satisfação no trabalho e reconhecimento.”

Frederick Herzberg

**JÚNIOR, J. R. J. F. Estudo de atualização dos motores de tração da Estrada de Ferro Campos do Jordão.** 2020. 60 p. Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Taubaté, Taubaté, 2020.

## **RESUMO**

Com a crescente evolução tecnológica é necessário ampliar o conhecimento, para assim buscar mecanismos que satisfaçam e aprimorem a tecnologia já empregada na Estrada de Ferro Campos do Jordão, visando a melhora contínua, a fim de otimizar a manutenção das automotrizes e, conseqüentemente, ampliando o tempo de funcionamento sem inconvenientes.

O trabalho realizado aborda a análise dos dados referentes às características dos motores de tração, visando estabelecer o atual estado em que se encontram os motores da Estrada de Ferro Campos do Jordão. Foi necessário a compreensão dos circuitos e componentes presentes na automotriz que participam do funcionamento do mesmo. A partir deste estudo, as informações apresentadas serviram de apoio para o detalhamento das aplicações de diferentes motores de tração em diferentes localidades, utilizando sistemas e motores de correntes contínua e/ou alternada. Foi também realizada uma comparação entre motores de corrente contínua e alternada, para assim, definir qual a melhor forma de substituição.

**PALAVRAS-CHAVE:** Motores de tração. Estrada de Ferro Campos do Jordão. Automotrizes. Correntes contínua e alternada.

JÚNIOR, J. R. J. F. **Study of the updating of the propulsion engines of the Campos do Jordão Railway.** 2020. 60 p. Graduate Work in Electrical Engineering – Electrical Engineering Department, University of Taubaté, Taubaté, 2020.

### **ABSTRACT**

With the increasing technological evolution, it is necessary to increase knowledge, so as to seek mechanisms that satisfy and improve the technology already employed in the Campos do Jordão Railroad, aiming at continuous improvement, in order to optimize the maintenance of the automotive and, consequently, operating time without inconvenience. This work carried out deals with the analysis of data referring to the characteristics of the traction motors, in order to establish the current state of the engines of the Campos do Jordão Railway. It was necessary the understanding of the circuits and components present in the automotive that participate in the operation of the same one. From this study, the information presented served as a support for detailing the applications of different traction motors in different locations, using alternating current and / or DC motors and systems. A comparison between direct and alternating current motors was also carried out in order to define the best form of replacement.

**KEYWORDS:** Traction motors. Campos do Jordão Railway. Automotive. Continuous and alternating currents.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Motor Sprague No. 6.....	18
Figura 2: Motor Westinghouse N° 3 .....	20
Figura 3: Estrutura básica de um motor de tração CC enrolado em série .....	23
Figura 4: Motores DK-30G retirados para manutenção .....	25
Figura 5: Carcaça do motor DK-30G .....	26
Figura 6: Induzido do motor DK-30G.....	26
Figura 7: Ensaio de carga aplicado no motor DK-30G .....	27
Figura 8: Polo principal .....	30
Figura 9: Interpolo.....	30
Figura 10: Bobinas de campo, polo e interpolo, respectivamente.....	31
Figura 11: Modelo de porta-escovas e escovas .....	33
Figura 12: Modelo de porta-escovas e escova, aplicado no motor DK-30G .....	33
Figura 13: Circuito de controle de potência do motor de tração simples .....	36
Figura 14: Circuito de controle de motor CC com relés.....	37
Figura 15: Relé de sobrecarga utilizado nas automotrizes .....	38
Figura 16: Elementos do poste e sustentação da rede aérea .....	42
Figura 17: Aparência do pantógrafo utilizado na automotriz.....	43
Figura 18: Aparência dos rabichos utilizados na automotriz.....	44
Figura 19: Aparência externa do compressor utilizado na automotriz .....	45
Figura 20: Aparência interna do compressor utilizado na automotriz.....	45
Figura 21: Aparência externa do pressostato utilizado na automotriz.....	46
Figura 22: Design interno do controller utilizado na automotriz .....	47
Figura 23: Diagrama das ligações elétricas das automotrizes .....	48
Figura 24: Tampa do controller .....	49
Figura 25: Resistências utilizadas nas automotrizes.....	49
Figura 26: Tampa de inspeção no assoalho da automotriz .....	51
Figura 27: Caixa de ligação dos cabos do motor da automotriz.....	51
Figura 28: Disjuntor de linha utilizado na automotriz.....	52
Figura 29: Fusíveis de proteção utilizados na automotriz .....	53
Figura 30: Subestação em Santo Antônio do Pinhal.....	54
Figura 31: Transformador.....	54
Figura 32: Esquema de um circuito de controle de tração do tiristor CC .....	57

Figura 33: Esquema de ciclos de CA trifásico.....	59
Figura 34: Esquema de circuito alimentado por CA .....	60

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>A</b>	Corrente em Ampere
<b>AGV</b>	Automotriz de Grande Velocidade
<b>CA</b>	Corrente alternada
<b>CC</b>	Corrente contínua
<b>DK</b>	Dick, Kerr and Company era um fabricante de locomotivas e bondes com sede em Kilmarnock, Escócia e Preston, na Inglaterra
<b>EFCJ</b>	Estrada de Ferro Campos do Jordão
<b>EMU</b>	Composição ferroviária movida a eletricidade e formada por dois ou mais carros de passageiros (Electric Multiple Unit)
<b>GTO</b>	Tiristor de Desligamento pela Porta ( <i>Gate Turn-Off Thyristor</i> )
<b>hp</b>	Unidade de medida de potência ( <i>Horse-power</i> )
<b>Hz</b>	Hertz
<b>IGBT</b>	Transistor Bipolar de Porta Isolada (Insulated Gate Bipolar Transistor)
<b>MCC</b>	Motor de corrente contínua
<b>mph</b>	Milha(s) por hora
<b>SCR</b>	Retificador Controlado de Silício (Silicon Controlled Rectifier)
<b>TGV</b>	Serviço ferroviário interurbanos de alta velocidade da França (French: <i>Train à Grande Vitesse</i> )
<b>V</b>	Tensão em volts

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	14
1.1	Objetivos.....	15
1.2	Motivação .....	15
1.3	Justificativa .....	15
1.4	Descrição dos capítulos .....	16
2	ESTADO DA ARTE .....	17
2.1	Histórico do motor de tração CC .....	17
2.1.1	Design de Sprague .....	17
2.1.2	Motor de nariz suspenso .....	18
2.1.3	Melhorias .....	19
2.1.4	The Series Motors.....	21
2.1.5	O fim do começo .....	21
2.2	Motor de tração CC .....	22
2.2.1	Motor de tração DK-30G.....	24
2.2.2	Componentes presentes no motor DK-30G .....	27
2.2.2.1	Quadro magnético.....	27
2.2.2.2	Núcleo da armadura .....	28
2.2.2.3	Eixo da armadura .....	28
2.2.2.4	Bobinas da armadura .....	28
2.2.2.5	Comutador .....	29
2.2.2.6	Polos .....	29
2.2.2.7	Bobinas de campo.....	31
2.2.2.8	Rolamentos da armadura .....	32

2.2.2.9	Lubrificação .....	32
2.2.2.10	Porta-escovas e escovas .....	32
2.2.2.11	Suspensão .....	33
2.2.2.12	Engrenagem .....	34
2.2.2.13	Caixa de engrenagens .....	34
2.2.2.14	Isolamento.....	34
2.2.2.15	Permutabilidade .....	34
2.2.2.16	Ventilação .....	35
2.2.2.17	Comutação .....	35
2.3	Circuito de controle CC .....	35
2.4	Controle e proteção dos motores .....	37
2.5	Enfraquecimento do campo .....	38
2.6	Frenagem regenerativa.....	39
2.7	Frenagem reostática .....	39
3	DESCRIÇÃO.....	40
3.1	Fonte de energia.....	40
3.1.1	Retorno .....	40
3.1.2	Linha aérea (Catenária).....	41
3.1.3	Pantógrafo .....	43
3.1.4	Rabicho .....	43
3.2	Compressor .....	44
3.2.1	Controle de freio do motorista.....	45
3.2.2	Válvula pressostática .....	46
3.3	Controller.....	47
3.3.1	Alavanca de trabalho .....	49
3.3.2	Bloco de resistências.....	49

3.3.3	Freio reostático .....	50
3.4	Cabeamento .....	50
3.5	Disjuntor de linha (Chave geral).....	52
3.5.1	Fusíveis .....	52
3.6	Circuito elétrico da EFCJ.....	53
4	SISTEMAS PROPOSTOS .....	55
4.1	Rede CA / Motor CC .....	55
4.1.1	Diodo .....	55
4.1.2	Tiristor (SCR) .....	55
4.1.3	SEPEX .....	56
4.2	Choppers CC.....	57
4.2.1	Frenagem dinâmica.....	58
4.3	Motores CA .....	58
4.3.1	Motor assíncrono .....	59
4.3.2	Circuito de controle CA.....	60
4.3.3	Tiristor GTO .....	61
4.3.4	IGBT .....	61
4.3.5	Motor de ímã permanente .....	62
4.4	Motores CA e CC.....	62
4.4.1	Diferenças entre CA e CC.....	63
5	CONCLUSÃO .....	65
	REFERÊNCIAS .....	67

## 1 INTRODUÇÃO

Uma ferrovia pode ser definida como um sistema de transporte terrestre de alto valor, com orientação fixa, transportando passageiros e cargas em contêineres especificamente construídos, utilizando sistemas de tração de alta potência projetados especificamente e controlados por sistemas de segurança de alta integridade. As ferrovias estão sujeitas a regimes de segurança estritamente regulamentados, exigem comunicações confiáveis de longa distância e equipes especialmente treinadas que atendem aos requisitos médicos definidos, às vezes trabalhando sozinhos em ambientes hostis. Os custos de construção, operação e manutenção de uma ferrovia normalmente não oferecem um retorno comercial sobre o investimento e, portanto, exigem subsídios substanciais do governo, trazendo consigo um alto grau de interferência política intrusiva e, muitas vezes, reportagens mal-intencionadas da mídia.

A vida dos ativos ferroviários é geralmente na faixa de 20-40 anos para sistemas elétricos e mecânicos e 60-120 anos para infraestrutura de engenharia civil fixa, assumindo uma manutenção regular e bem gerida. Este ciclo de vida leva à necessidade de uma abordagem de longo prazo para o projeto inicial do sistema, para o gerenciamento estratégico dos sistemas existentes e para o desenvolvimento de estratégias de substituição. A concorrência entre as empresas no mercado mundial é cada vez maior e o desenvolvimento econômico, em um cenário de ampla globalização, gera novas demandas e novos desafios às empresas. Se faz necessário para se manter a altura da concorrência, ou ainda ultrapassar, oferecer o melhor produto, com garantia de qualidade, custo mais baixo e no menor tempo possível, visando atender a demanda a cada dia mais exigente.

Este trabalho visa contribuir no entendimento sobre os motores de tração de corrente contínua utilizados em ferrovias, abordando desde a sua origem, quando ainda eram utilizadas apenas máquinas a vapor, até o seu aperfeiçoamento com os passar dos anos, sendo possível a utilização de motores de tração de corrente alternada nos dias atuais. Desta forma será realizada uma análise em que será possível comparar os motores utilizados em diferentes locais com o motor de tração de corrente contínua utilizado na Estrada de Ferro Campos do Jordão.

## **1.1 Objetivos**

O objetivo deste trabalho consiste em um estudo no qual terá foco nos motores de tração da Estrada de Ferro Campos do Jordão, assim será demonstrado a especificação das suas características, nas quais serão comparadas com outros motores tanto de corrente contínua quanto alternada. Contudo também existe a necessidade de relatar todos os aspectos que o envolvem, assim é necessário a explicação de diferentes tópicos, como o funcionamento do bonde em si, componentes presentes nos bondes, tanto de baixa quanto alta tensão, sistema de transmissão, entre outros. Assim, será possível expor as tecnologias disponíveis no mercado, e considerar uma atualização do seu sistema, que já se encontra ultrapassado, devido a falta de conhecimento a respeito.

## **1.2 Motivação**

A Estrada de Ferro Campos do Jordão foi inaugurada em 15 de novembro de 1914, sendo que os primeiros trens que trafegaram na ferrovia eram a vapor, logo, substituídos por trens a gasolina em 1916 e, posteriormente, pelos elétricos, em 1924. A ferrovia está a mais de cem anos em operação e sofreu algumas modificações com o passar dos anos, porém o seu estado atual necessita de atualizações, principalmente com o avanço da tecnologia cada vez mais acelerado, sendo disponível uma grande variedade de opções.

## **1.3 Justificativa**

Este trabalho visa contribuir para a Estrada de Ferro Campos do Jordão como um grande auxílio, no qual será possível finalmente observar os dados pertencentes a mesma, nas quais poderão oferecer uma maior confiabilidade, uma estrutura que facilita o entendimento de uma área que não é muito explorada no nosso país, desta forma amplia-se o conhecimento para explorar novas alternativas de tecnologia. Assim, além de se buscar novas possibilidades é possível aprimorar o que já se tem, desta maneira não é necessário a troca completa de componentes, apenas um complemento que causa a melhora de seu desempenho, que por consequência traz estabilidade no seu funcionamento. Tem-se como resultado uma redução de manutenção que culmina em maior praticidade e maior lucro a empresa posteriormente.

## 1.4 Descrição dos capítulos

O texto desta monografia está estruturado em cinco capítulos que abordam o tema da seguinte forma:

Capítulo 1 – Introdução: Neste primeiro capítulo apresenta a contextualização do trabalho, seus objetivos, justificativa da realização, a motivação do trabalho e uma breve descrição do conteúdo de cada capítulo;

Capítulo 2 – Estado da Arte: Neste capítulo são apresentados fundamentos do motor de corrente contínua, principalmente sobre o motor utilizado pela Estrada de Ferro Campos do Jordão, assim são abordados: o seu desenvolvimento com o passar dos anos, o seu funcionamento, seus componentes, suas aplicações e proteções adequadas, além de

Capítulo 3 – Descrição: Com base nos conceitos apresentados no capítulo 2, neste capítulo são abordados componentes e circuitos que tem impacto direto e indireto com os motores de tração, dessa forma, são apresentadas informações a respeito dos bondes da Estrada de Ferro Campos do Jordão;

Capítulo 4 – Sistemas propostos: Aqui são apresentados redes e motores que utilizam corrente contínua ou alternada empregados em sistemas ferroviários, sendo que em alguns casos utilizam dispositivos que aprimoram o funcionamento dos mesmos, além da comparação entre alternada e contínua;

Capítulo 5 – Conclusão: No último capítulo são apresentadas as conclusões sobre a proposta defendida neste trabalho, levando em consideração a análise das informações, para assim, propor considerações e sugestões.

## **2 ESTADO DA ARTE**

### **2.1 Histórico do motor de tração de corrente contínua**

Atualmente, o motor elétrico é uma parte essencial da tecnologia ferroviária tanto para trens movidos a diesel quanto a eletricidade. Na década de 1870, as locomotivas a vapor eram a única forma de tração nas ferrovias e a eletricidade era uma ciência inovadora, sendo gradualmente desenvolvida para iluminação e potência motora. Em 20 anos, bondes elétricos e locomotivas foram introduzidos para ferrovias urbanas e estavam sendo testados em ferrovias de linha principal.

Primeiro, vale a pena lembrar que os motores elétricos para uso em bondes foram desenvolvidos por vários engenheiros diferentes, todos contribuindo com ideias e testando-os, em grande medida independentemente. Havia muita rivalidade nos primeiros negócios de motores elétricos porque as pessoas percebiam o enorme potencial da tecnologia e os enormes lucros que ela poderia gerar.

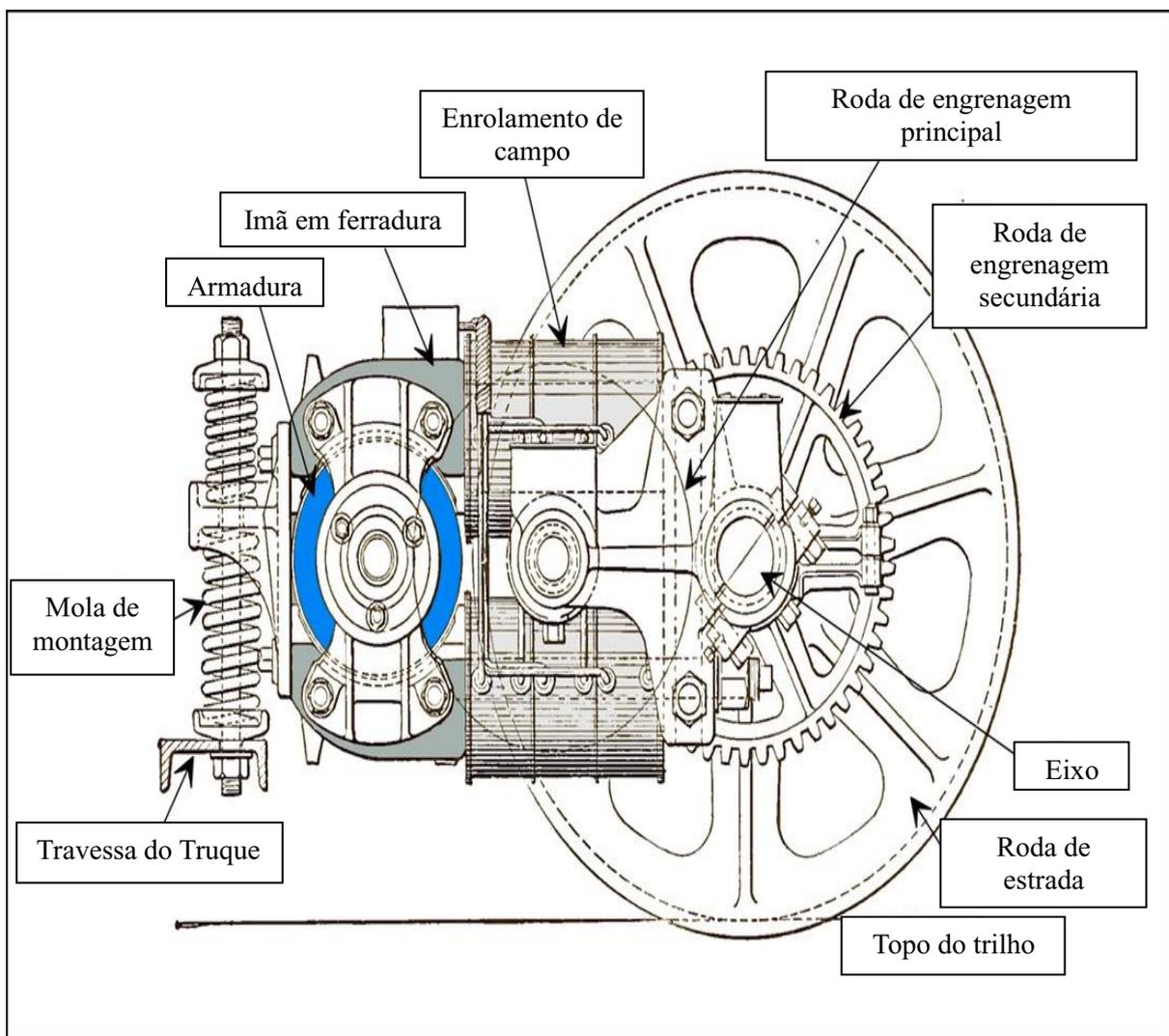
O primeiro motor elétrico que reconheceríamos hoje como uma máquina viável foi desenvolvido pelo engenheiro belga Zenobe Gramme. Ele descobriu, por acidente em 1873, que o dínamo que ele inventou produzia corrente elétrica que outra máquina do mesmo projeto poderia converter de volta em rotação. Quando a armadura do dínamo foi girada dentro de um campo magnético para produzir corrente elétrica e esta foi conectada por um par de fios a outro dínamo, ele descobriu que a armadura do outro dínamo estava girando. Ele então descobriu que o projeto mecânico de um dínamo (ou gerador, como chamaríamos hoje) era o mesmo que um motor elétrico. Outros engenheiros logo adotaram o conceito e o aprimoraram. Embora as máquinas fossem rudimentares, elas eram as primeiras máquinas elétricas de corrente contínua (CC) a serem comercialmente bem-sucedidas e foram gradualmente aprimoradas à medida que a experiência com elas era adquirida.

#### **2.1.1 Design de Sprague**

O motor Gramme funcionou, mas não foi muito eficiente e um engenheiro americano, Frank J. Sprague, estava convencido de que poderia ser melhorado. Durante o final de 1883 e início de 1884, Sprague trabalhou no desenvolvimento de uma versão melhorada do motor. O motor de corrente contínua consiste de uma peça rotativa, conhecida como armadura, e uma parte estática conhecida como campo. Nos primeiros projetos, o campo era normalmente

conectado em paralelo com o circuito da armadura para criar o campo magnético que geraria o giro da armadura. Isso era conhecido como um motor de ferida em derivação e os primeiros motores da Sprague foram projetados assim. Mais tarde, ele adicionou um campo de série para fazer o que hoje chamamos de um motor de ferida composto. Isso funcionou melhor em como ele controlava a velocidade do motor. A Figura 1 apresenta o modelo de Sprague, mostrando o redutor de duas marchas e o arranjo do ímã em forma de ferradura enrolado em volta da armadura.

Figura 1: Motor Sprague No. 6



Fonte: Cassier's Magazine 1899, modificado pelo autor

### 2.1.2 Motor de nariz suspenso

O motor Sprague foi um sucesso razoável. Era usado para a condução de teares e outras máquinas similares de velocidade constante. Uma vez que começou a vender, Sprague também usou o design como base para seus motores de tração elétrica experimentais para carros elétricos. Durante este desenvolvimento, ele contribuiu com outro princípio importante para a tração elétrica. Ele pensou que o motor deveria ser montado sob o veículo o mais próximo possível das rodas. Anteriormente, os motores normalmente eram montados dentro do veículo com uma conexão ao eixo por uma corrente ou correia. Sprague achava que o motor deveria estar perto do eixo e movê-lo através de um arranjo de pinhão e engrenagem.

O motor de Sprague foi montado de modo que uma das extremidades fosse apoiada pelo eixo enquanto a outra era transportada pelo painel de popa da estrutura do caminhão (bogie). Sprague se referiu a isso como um design de "carrinho de mão". Hoje, isso é conhecido como o motor de nariz suspenso. O design sobreviveu por mais de 100 anos.

### **2.1.3 Melhorias**

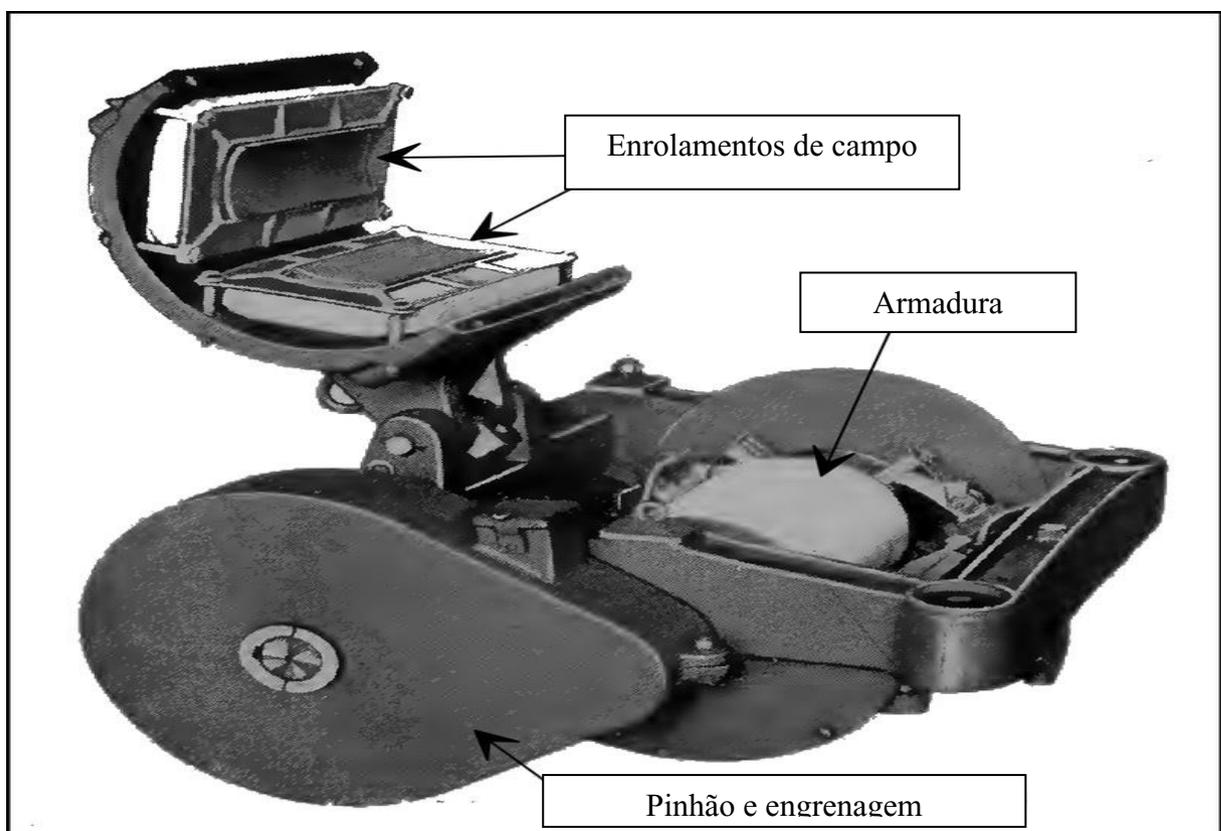
Embora vários engenheiros tivessem construído carros elétricos para uso em ferrovias de rua, nenhum deles foi realmente bem-sucedido até que Sprague equipou o primeiro bonde elétrico viável em Richmond, Virgínia, em 1888, usando seus motores compostos, mas havia problemas consideráveis. Os dois mais sérios foram que os motores eram pouco potentes em 7,5 hp. e a vulnerabilidade dos pincéis. Motores maiores foram instalados eventualmente, mas as escovas continuaram sendo um problema.

As escovas foram cruciais para o funcionamento do motor. Eles conectaram o campo estático à armadura rotativa. O problema era que, até aquele momento, as escovas eram feitas de cobre ou latão. Como eram flexíveis e esperavam operar em ambas as direções, eles se desgastavam muito rapidamente. Foi nessa época que outro engenheiro, Charles van de Poole, apresentou a ideia de usar escovas de carvão; o problema foi resolvido e seu uso sobrevive até hoje.

Outro problema foi a contaminação por sujeira e água. Os primeiros motores não foram fechados, os projetistas assumindo que eles seriam suficientemente protegidos pelo corpo do carro. No entanto, os campos e as extremidades das armaduras onde os comutadores estavam localizados estavam abertos aos elementos e rapidamente foram danificados pela água, lama, neve ou poeira. Em um esforço para minimizar os danos, as capas de lona foram tentadas inicialmente, mas depois, Westinghouse, que entrou no campo de fabricação de

motores em 1890, depois de ver os sucessos de outros fornecedores, produziu um motor com os campos, armadura e engrenagens fechadas, como é possível verificar na Figura 2. Incluíam uma cobertura articulada contendo os enrolamentos de campo que envolviam a armadura e forneciam proteção, além de proporcionar melhor desempenho. Além disso, o acionamento da engrenagem agora é único e o pinhão e a engrenagem estão contidos em sua própria caixa cheia de óleo. Dessa forma, a maioria dos princípios básicos do moderno motor de tração CC já estava em vigor. Conseqüentemente, essa ideia foi rapidamente adotada por outros fornecedores e, com melhorias, permaneceu o padrão até os dias de hoje.

Figura 2: Motor Westinghouse N° 3



Fonte: Revista Cassier, 1899, modificado pelo autor

Finalmente, houve engrenagens. Foi rapidamente reconhecido que para fornecer torque efetivo em um vagão elétrico com um motor pequeno o suficiente para caber debaixo do carro, o acionamento conectando o motor ao eixo precisava ser engrenado. As proporções escolhidas eram originalmente bastante altas; A relação de transmissão original da Sprague para os carros de Richmond era de 12: 1. Os primeiros discos tinham dois pinhões e duas engrenagens, mas o sistema não se desgastava bem. Os dentes da engrenagem desgastaram-se muito rapidamente e eram barulhentos. Às vezes, engrenagens se agarravam, causando

trancas nas rodas e parando o veículo. Alguns projetistas tentaram superar o problema usando motores sem engrenagens, onde a armadura era montada diretamente em torno do eixo, mas esses motores eram mais pesados e menos eficientes do que os motores. Em meados da década de 1890, os refinamentos no projeto do motor e das engrenagens atingiram um estágio em que as engrenagens eram confiáveis o suficiente e a relação de engrenagem era normalmente entre 3 e 4 a 1. Com essa relação, era necessário apenas um pinhão / engrenagem.

#### **2.1.4 The Series Motor**

A maioria dos motores de tração iniciais eram de derivação - onde as bobinas de campo estavam ligadas em paralelo com o circuito da armadura - além dos primeiros motores compostos da Sprague. A potência para o motor era geralmente controlada variando a resistência do campo. No entanto, em 1891, a Westinghouse produziu um motor em série, onde o campo foi ligado em série com a armadura e onde todo o circuito do motor foi controlado por uma resistência variável que foi inserida em série com o motor ao iniciar e depois cortada em etapas para aumentar a velocidade. Novamente, este permaneceu como o método padrão de controle motor até a introdução do controle de tiristores em estado sólido na década de 1980.

#### **2.1.5 O fim do começo**

No início dos anos 1890, o projeto do motor de tração CC foi amplamente estabelecido e permaneceu em uso generalizado ao longo do século XX. Ele sofreu alguns desenvolvimentos na fabricação e melhorias no projeto do comutador e da fiação, mas um engenheiro de 1892 poderia olhar para o motor ainda usado sob muitos trens elétricos hoje e reconhecer a máquina como quase a mesma.

No entanto, com a introdução da eletrônica de potência em estado sólido na década de 1970, o objetivo desejado de poder usar motores de indução de corrente alternada (CA), com controle de potência trifásico, foi finalmente à vista. No negócio de tração ferroviária nos dias atuais, o motor CC só é visto em trens mais antigos.

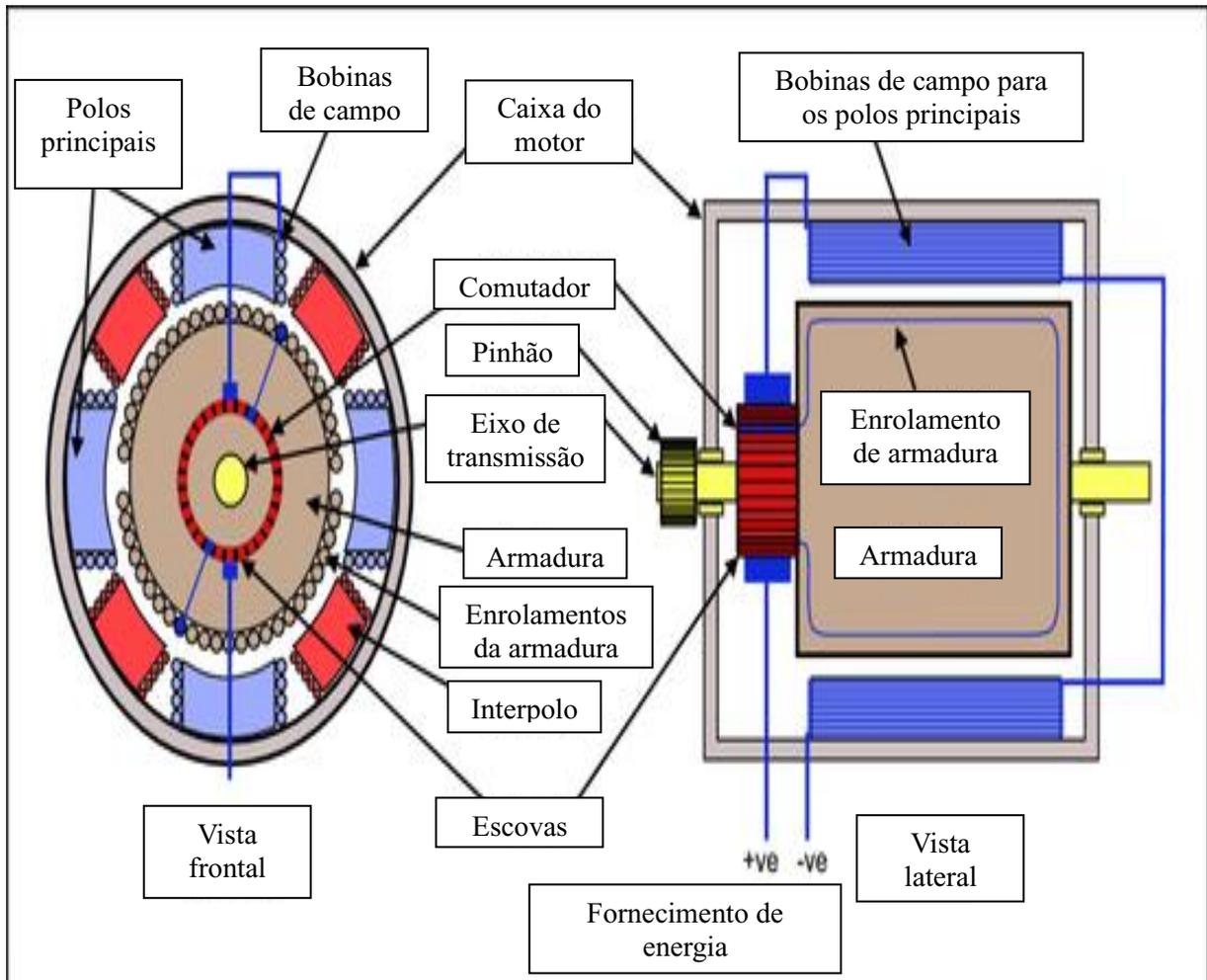
## 2.2 Motor de tração CC

Os motores elétricos são um meio comum de alimentar um trem, quer a energia necessária seja transportada a bordo do trem na forma de um motor a diesel e seu combustível ou obtida de fora do trem por conexão com uma fonte de alimentação externa carregada por uma linha aérea, ou terceiro trilho. A tração elétrica é amplamente usada em todo o mundo, especialmente para rotas com tráfego denso, como ferrovias urbanas e suburbanas, ou linhas de alta velocidade que precisam de tração elétrica para obter as velocidades necessárias para viagens entre cidades.

Historicamente, o motor de corrente contínua era a base dos acionamentos de tração elétrica em material circulante elétrico e diesel-elétrico. Muitos exemplos ainda estão em uso em todo o mundo.

O motor consiste em duas partes, uma armadura rotativa e um campo fixo como demonstrado na Figura 3. O campo fixo consiste em bobinas de arame enroladas firmemente dentro da caixa do motor. A armadura é outro conjunto de bobinas enroladas em um eixo central. Ele é conectado ao campo através de "escovas" que são contatos com mola pressionados contra uma extensão da armadura chamada comutador. O comutador coleta todas as terminações das bobinas da armadura e distribui-as em um padrão circular para permitir a sequência correta do fluxo de corrente.

Figura 3: Estrutura básica de um motor de tração CC enrolado em série



Fonte: The Railway Technical, 2018, modificado pelo autor

O MCC funciona porque, simplesmente, quando uma corrente é passada através do circuito do motor, há uma reação entre a corrente no campo e a corrente na armadura que faz com que a armadura gire. A armadura e o campo são conectados em série e o motor inteiro é chamado de "ferida em série".

Um MCC em série possui um campo de baixa resistência e um circuito de armadura. Por causa disso, quando a tensão é aplicada a ela, a corrente é alta (Lei de Ohm: corrente = tensão / resistência). A vantagem da alta corrente é que os campos magnéticos dentro do motor são fortes, produzindo alto torque (força de rotação), por isso é ideal para iniciar um objeto pesado como um trem. A desvantagem é que a corrente que flui para o motor tem que ser limitada de alguma forma, caso contrário, a alimentação pode ser sobrecarregada e / ou o motor e seu cabeamento podem ser danificados. Na melhor das hipóteses, o torque excederia a aderência e as rodas motrizes escorregariam. Tradicionalmente, os resistores eram usados para limitar a corrente inicial.

### 2.2.1 Motor de tração DK-30G

A manutenção preventiva dos motores DK-30G, presentes nas automotrizes da EFCJ, consiste nos seguintes procedimentos:

- Desligar a energia da oficina e trancar o cadeado da chave seccionadora de energia.
- Posicionar a automotriz no local de revisão e inspeção visual.
- Abrir a tampa superior do motor.
- Verificar o estado de conservação das escovas. As escovas devem ser trocadas com a observação do desgaste natural (escova com tamanho abaixo de 50% do seu tamanho total), além da pressão irregular da mola do porta-escova.
- Em caso de comprometimento das escovas, trocar por escovas novas.
- Verificar folga mecânica (coroa/pinhão), através de uma verificação manual, usando como referência as lâminas do motor em relação a escova.
- Após a manutenção no setor da elétrica, é comunicado para o setor de tração para que haja substituição do motor caso seja verificado folga mecânica.
- Desconectar os cabos dos motores e aterramentos ligados entre o corpo da automotriz e o truque.
- Com a cooperação dos funcionários do setor de tração é necessário o levantamento do corpo da automotriz, com o auxílio de macacos mecânicos, para assim ser feita a retirada do truque.
- Logo, o motor é retirado do truque e substituído por outro que já tenha passado por uma restauração, no qual deve apresentar o funcionamento adequado.

A Figura 4 representa o motor na sua estrutura fechada, sendo este retirado da parte interna do truque, para manutenção.

Figura 4: Motores DK-30G retirados para manutenção



Fonte: Produção do próprio autor

A seguir, na Figura 5 e Figura 6, respectivamente, são demonstradas partes do motor DK-30G que passaram por um tratamento, para assim manter o seu estado conservado.

Figura 5: Carcaça do motor DK-30G



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 6: Induzido do motor DK-30G



Fonte: Produção do próprio autor

Foi aplicado no motor DK-30G um ensaio de carga, nos quais foram obtidas informações e, conseqüentemente, resultados dos testes aplicados, que podem ser verificados na Figura 7.

Figura 7: Ensaio de carga aplicado no motor DK-30G

DADOS DE PLACA																					
kW	RPM	Excitação	V <sub>A</sub>	I <sub>A</sub>	Campo Principal			Isol.	Obs.: -												
49,5	880	Série	750	75	V	-	i <sub>exc</sub>	-	H/C												
ENSAIOS (Industrial/Siderúrgico - NBR 5165; Tração - NBR 8151)																					
Ensaio em Vazio n = 880 rpm				Resistências				Temp. Ambiente: 20 °C													
V <sub>A</sub> (V)	I <sub>A</sub> (A)	i <sub>exc</sub> (A)	W <sub>0</sub> (W)	Armatura (1 a 51)			Campo Principal														
750	2.35	74.5	1762.5	0.17787 Ω			-														
700	2.1	63	1470	Campo Série			Interpólo														
600	1.9	45	1140	0.19716 Ω			0.0943 Ω														
500	1.8	33.5	900	Resistências de Isolação (0.5 kVcc - 60 s)																	
400	1.75	28.5	700	Arm.+Int.	Campo Principal	Campo Série															
300	2	20.5	600	31500 MΩ	-	MΩ	88500	MΩ													
200	2.75	13.5	550	Tensão Aplicada em Δt = 60s																	
-	-	-	-	Arm.+Int.	Campo Principal	Campo Série															
Variação de Velocidade Em Vazio				2.5	kV <sub>AC</sub>	-	kV <sub>AC</sub>	2.5	kV <sub>AC</sub>												
V <sub>A</sub> (V)	I <sub>A</sub> (A)	i <sub>exc</sub> (A)	n (rpm)	Vibração Mancal L.A.			Vibração Mancal L.O.A.														
-	-	-	-	Axial	0.8	mm/s	Axial	1.1	mm/s												
-	-	-	-	Vertical	0.8	mm/s	Vertical	0.8	mm/s												
-	-	-	-	Horizontal	0.8	mm/s	Horizontal	0.9	mm/s												
-	-	-	-	Obs.: As medidas de vibração são dadas em valores RMS																	
Carga (Anti-horário pelo Comutador)						Carga (Horário pelo Comutador)															
Lig.	Série	V <sub>A</sub>	750	V	i <sub>exc</sub>	-	A	Braço	-	m	Lig.	Série	V <sub>A</sub>	750	V	i <sub>exc</sub>	-	A	Braço	-	m
I <sub>A</sub> (A)	kW <sub>ABS</sub>	n (rpm)	lbft	kW <sub>UT</sub>	η %	G <sub>fisc</sub>	I <sub>A</sub> (A)	kW <sub>ABS</sub>	n (rpm)	lbft	kW <sub>UT</sub>	η %	G <sub>fisc</sub>								
78.5	58.88	833	450	53.23	90.4%	1 1/4	79	59.25	832	450	53.16	89.7%	1 1/4								
73	54.75	862	406	49.70	90.8%	1	73	54.75	862	406	49.70	90.8%	1								
66	49.50	902	350	44.83	90.6%	1	65.5	49.13	900	350	44.73	91.1%	1								
59	44.25	946	300	40.30	91.1%	1	59	44.25	948	300	40.38	91.3%	1								
52	39.00	1001	250	35.54	91.1%	1	52	39.00	1005	250	35.68	91.5%	1								
45	33.75	1087	200	30.87	91.5%	1	45	33.75	1087	200	30.87	91.5%	1								

Fonte: Equacional, 2012

## 2.2.2 Componentes presentes no motor DK-30G

### 2.2.2.1 Quadro magnético

O quadro magnético é de aço fundido de alta permeabilidade e é do tipo caixa. Aberturas furadas e recuadas em cada extremidade são fornecidas para receber as caixas de rolamentos da armadura que são presas por parafusos de aço na estrutura e seguramente travadas contra o torneamento.

Assentos usinados adequados são fornecidos para os polos e interpolos principais, e para o garfo do porta-escova.

Uma grande abertura equipada com uma tampa de aço estampado é fornecida para facilitar a inspeção do comutador e da engrenagem da escova e o ajuste da última. A tampa é

mantida em posição por meio de uma mola e é facilmente removível. Uma cobertura semelhante é fornecida diretamente abaixo do comutador.

Superfícies cuidadosamente usinadas e registradas são fornecidas em um ângulo de cerca de 60 graus para receber as caixas de rolamentos do eixo.

#### **2.2.2.2 Núcleo da armadura**

O núcleo da armadura é constituído por finas lâminas de aço, tendo uma baixa perda de histerese, sendo cada folha finamente revestida com verniz isolante. Dutos de ventilação axial são fornecidos para permitir uma passagem livre de ar através do núcleo.

O núcleo é transportado e chaveado para uma aranha de aço fundido e é mantido na posição por uma placa final de aço fundido e porca de aço firmemente trancada. Não há dutos radiais no núcleo da armadura, de modo que os suportes espaçadores são eliminados e as placas são presas juntas sob grande pressão. Isto, juntamente com um encaixe preciso na aranha, que é de diâmetro grande e uniforme, garante um núcleo firme.

A aranha, que é pressionada e encaixada no eixo, suporta os enrolamentos da armadura na extremidade do pinhão: ela também se estende sob o cubo do comutador, permitindo que o eixo seja removido ou colocado sem perturbar os enrolamentos da armadura ou o comutador.

#### **2.2.2.3 Eixo da armadura**

O eixo da armadura é feito de aço fundido de melhor qualidade para medir. As superfícies do munhão são enroladas para garantir a vida útil máxima das buchas do mancal.

#### **2.2.2.4 Bobinas da armadura**

As bobinas da armadura são cobertas com isolamento de classe B de qualidade, de acordo com os requisitos da especificação emitida pelo instituto americano de engenharia elétrica.

Os condutores são isolados com fita de mica e as partes das bobinas que são inseridas nas fendas são isoladas com mica, após as quais as bobinas são pressionadas e cozidas. Antes

que as bobinas sejam colocadas em posição, o núcleo é pulverizado com verniz preto de secagem ao ar e as fendas revestidas com couro para evitar danos mecânicos as bobinas.

Os enrolamentos finais são suportados pela aranha e pela placa de fixação, cobrindo completamente os enrolamentos no lado inferior. As bobinas funcionam continuamente do segmento do comutador para o segmento do comutador para o segmento do comutador. Os fios de aço, encravados com o núcleo e isolados das bobinas por tiras de madeira seguram os enrolamentos no lugar. Depois de os fios de ligação estarem no lugar, toda a armadura é cozida durante 12 horas e é dada uma pulverização final do verniz de acabamento.

#### **2.2.2.5 Comutador**

O comutador é construído sobre uma aranha de aço fundido separada, carregada e encaixada em uma extensão da aranha da armadura, e mantida em posição por uma porca de aço firmemente trancada.

As barras de cobre trefilado, com acabamento preciso para medir, são isoladas umas das outras com a melhor qualidade de mica e mantidas em posição por flanges de extremidade pesadas, encaixando-se em entalhes "v" profundos virados nas barras.

Os flanges finais são isolados das barras por anéis finais de micanita e apertados juntos por parafusos de aço na extremidade frontal, permitindo assim que uma única barra seja retirada sem desmontar o comutador. A mica entre as barras é ranhurada a uma profundidade de 3/64 "abaixo da superfície do comutador. A margem ampla é feita para desgaste radial.

#### **2.2.2.6 Polos**

Os polos principais são formados por finas chapas de aço rebitadas entre chapas de aço fundido e moldadas para formar calçados, a fim de fornecer a distribuição de campo adequada e, ao mesmo tempo, servir como suporte para as bobinas de campo.

Os interpolos são de aço forjado a gota moldadas para suportar as bobinas. Tanto os principais quanto os interpolos são usinados com precisão e fixados aos assentos usinados na estrutura do ímã por meio de parafusos de aço. Ambos são demonstrados a seguir na Figura 8 e Figura 9, com calços para adequar o posicionamento.

Figura 8: Polo Principal



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 9: Interpolo



Fonte: Produção do próprio autor

### 2.2.2.7 Bobinas de campo

As bobinas principais e interpólos possuem isolamento da mesma qualidade especificada para as bobinas de armadura acima. As bobinas principais são feitas de tira de cobre e são isoladas com papel e mica. Eles são enrolados à máquina em cima de formadores, sendo posteriormente impregnados em um vácuo com composto isolante, a fim de preencher todos os interstícios. Eles são então assados e isolados com uma cobertura combinada de mica e linho, com fita trançada forte. As bobinas completas são então finalmente tratadas com um composto especial e novamente cozidas para torná-las impermeáveis à umidade.

As bobinas são presas entre as molas de aço prensadas que estão apoiadas na estrutura do ímã e as arruelas de latão suportadas pelos calçados polares. Deste modo, qualquer contração das bobinas é automaticamente absorvida e uma construção rígida é assegurada, evitando assim a falha das bobinas soltas. Depois de montada ela se encontra no estado da Figura 10, sendo necessário somente a pintura com material isolante.

As conexões de campo são feitas nos terminais da bobina de campo, onde o terminal de entrada é preso por meio de parafusos e, finalmente, suado sólido. Isto faz uma junção completamente sólida para que não haja risco de superaquecimento. Além disso, a tendência do chumbo à fratura é reduzida, deixando o comprimento mais longo possível flexível.

Figura 9: Bobinas de campo, polo e interpolo, respectivamente



Fonte: Produção do próprio autor

### **2.2.2.8 Rolamentos da armadura**

Os rolamentos da armadura consistem em buchas sólidas feitas de bronze especial e revestidas com metal babbitt de alta qualidade, em que as ranhuras são usinadas para distribuir o óleo sobre a superfície do munhão. Os casquilhos são fixados com segurança na posição em caixas de rolamentos de aço fundido.

Os casquilhos dos rolamentos do eixo são da mesma construção, exceto que estão divididos. Eles são chaveados para caixas de aço fundido que são aparafusadas a superfícies registradas usinadas no quadro magnético.

### **2.2.2.9 Lubrificação**

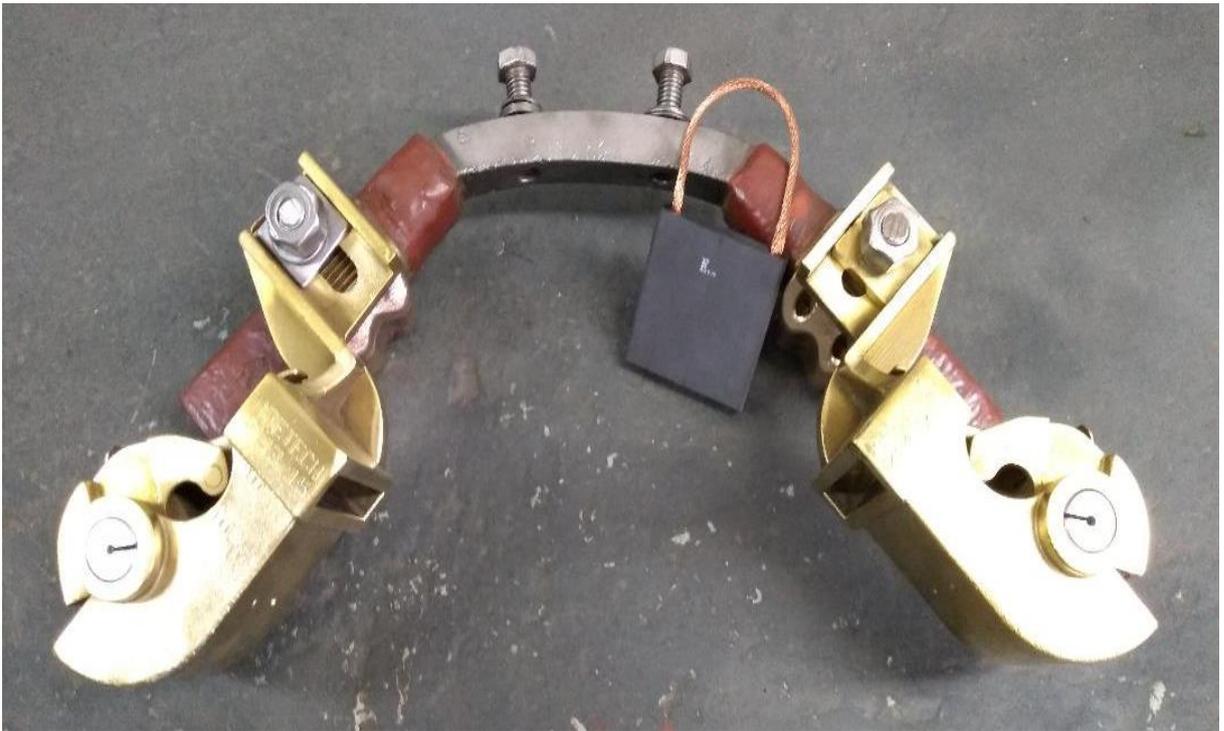
A lubrificação dos mancais da armadura é feita por meio de lâ pura saturada em óleo e disposta para estar em contato direto com o eixo por um terço de seu diâmetro no lado de baixa pressão. O reservatório de óleo tem capacidade suficiente para duas ou três semanas consecutivas. Para evitar a infiltração de óleo ao longo do eixo no motor, são fornecidos propulsores de óleo adequados. A lubrificação dos mancais do eixo é organizada de maneira similar. Uma capa contra poeira é montada em volta do eixo entre os mancais do eixo do motor.

### **2.2.2.10 Porta-escovas e escovas**

Os porta-escovas são feitos de latão fundido. Elas são ajustáveis radialmente e aparafusadas por parafusos de aço trancados com segurança, que são facilmente acessíveis removendo a tampa do comutador.

As escovas são de carbono providas de conexões de cobre flexíveis e deslizam em caixas acabadas com precisão; cada escova é independentemente ajustável. Este ajuste permite aproveitar ao máximo as boas condições de operação, reduzindo a pressão da escova, sempre que possível, com o objetivo de obter maior vida útil tanto do comutador quanto das escovas. Pode ser observado o modelo do conjunto na Figura 11 e Figura 12.

Figura 10: Modelo de porta-escovas e escovas



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 11: Modelo de porta-escovas e escova aplicado no motor DK-30G



Fonte: Produção do próprio autor

### 2.2.2.11 Suspensão

A estrutura magnética do motor é disposta para fixação rígida a uma viga a ser fornecida para o propósito pelos fabricantes de caminhões. A fim de amortecer

adequadamente o motor contra choques, é especificado que a viga deverá ser suportada em cada extremidade entre duas molas helicoidais fixadas ao chassi do caminhão, e que uma folga seja permitida para os parafusos, passando pela extremidade do feixe. e molas, para dar jogo lateral.

O peso do motor é dividido igualmente entre as molas e os rolamentos do eixo.

#### **2.2.2.12 Engrenagem**

A engrenagem é do tipo de redução única. O pinhão é de aço de alto grau especial cortado do sólido, encaixado em um cone no eixo da armadura e mantido na posição por uma porca de aço firmemente trancada. A roda de engrenagem é de aço especial, prensada no eixo ou em metades aparafusadas como pode ser aprovado.

#### **2.2.2.13 Caixa de engrenagens**

A caixa de engrenagens que envolve a engrenagem, é de aço estampado e feita em metades, cada uma das quais é pressionada a partir de uma folha sólida. As duas metades são presas com parafusos de aço firmemente trancados. O estojo é suportado em cada extremidade diretamente sob os terminais flangeados e, portanto, não são necessários suportes rebitados. Os braços de aço fundido que formam os suportes são projetados para resistir a fortes vibrações e a caixa é presa a eles por parafusos de aço.

#### **2.2.2.14 Isolamento**

O isolamento entre todas as partes energizadas do motor e da estrutura é feito para suportar uma pressão de teste igual a duas vezes a tensão de trabalho, mais a corrente alternada aplicada por um minuto.

#### **2.2.2.15 Permutabilidade**

Todas as partes do motor são usinadas e acabadas para medir e toda a perfuração é feita em gabaritos, garantindo assim a permutabilidade absoluta de peças semelhantes.

### **2.2.2.16 Ventilação**

Uma característica especial deste tipo de motor é o sistema de ventilação positiva. Grandes dutos de ventilação axial são fornecidos no núcleo da armadura, estendendo-se através do comutador em uma extremidade e levando a um poderoso ventilador de exaustão na extremidade do pinhão da armadura. O ventilador em si é formado por parte da aranha. O ar entra através de entradas blindadas no final do comutador; uma corrente de ar é puxada através de dutos no núcleo da armadura e outra corrente passa sobre a armadura e circula as bobinas de campo, ambos os caminhos se encontrando na ventoinha, que é descarregada através de quatro saídas blindadas na extremidade do pinhão.

O volume de ar e a sua velocidade são tais que qualquer poeira que entra na peça é transportada e expelida, sendo esta operação facilitada pelas passagens de ar diretas e pelo caráter unidirecional das correntes de ar na carcaça.

### **2.2.2.17 Comutação**

O motor funcionará em qualquer direção, sem carga, para as sobrecargas mencionadas acima, com posição fixa da escova e ausência virtual de faíscas no comutador. Profundidade de desgaste radial fornecida no comutador.

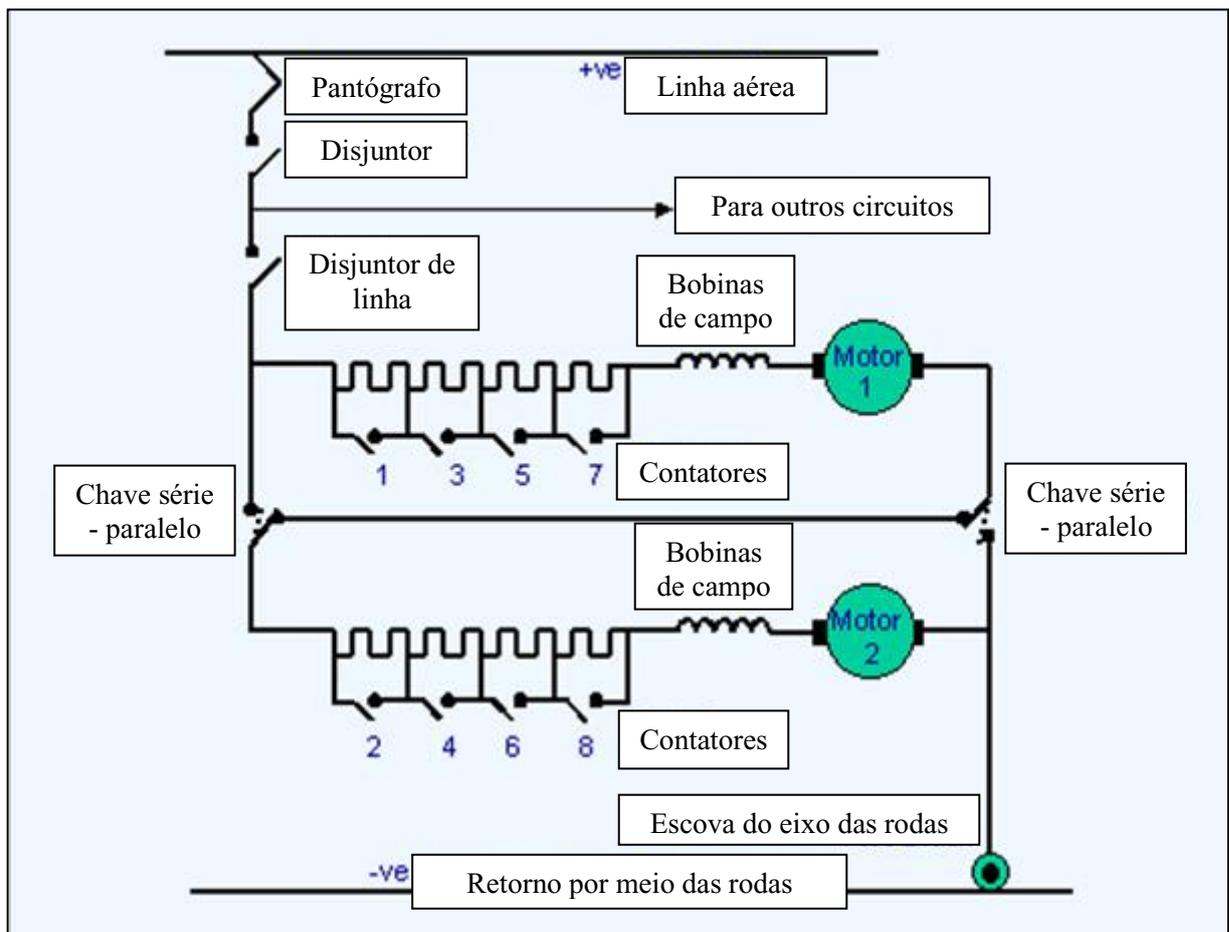
## **2.3 Circuito de controle CC**

À medida que o motor de CC começa a girar, a interação dos campos magnéticos dentro dele faz com que ele gere uma voltagem internamente. Essa "voltagem de fundo" se opõe à voltagem aplicada e a corrente que flui é governada pela diferença entre os dois. Assim, à medida que o motor acelera, a tensão gerada internamente sobe, a tensão efetiva cai, menos corrente é forçada através do motor e, portanto, o torque cai. O motor para naturalmente de acelerar quando o arrasto do trem coincide com o torque produzido pelos motores. Para continuar acelerando o trem, os resistores são desligados em etapas, cada passo aumentando a tensão efetiva e, assim, a corrente e o torque por um pouco mais até que o motor alcance. Isso pode ser ouvido e sentido em trens antigos de CC como uma série de troncos sob o piso, cada um acompanhado por um movimento de aceleração, conforme o torque aumenta repentinamente em resposta à nova onda de corrente. Quando nenhum resistor

é deixado no circuito, a tensão de linha total é aplicada diretamente no motor. A velocidade do trem permanece constante no ponto em que o torque do motor, governado pela tensão efetiva, é igual ao arrasto - às vezes chamado de velocidade de balanceamento. Se o trem começa a subir um grau, a velocidade diminui porque o arrasto é maior que o torque. Mas a redução na velocidade faz com que a tensão de retorno diminua e, assim, a tensão efetiva aumenta - até que a corrente forçada pelo motor produza torque suficiente para corresponder ao novo arrasto.

A maioria dos circuitos de motores CC está disposta para controlar dois ou quatro motores. A faixa de controle é aprimorada mudando as conexões para os motores conforme o trem acelera. O sistema é conhecido como "controle paralelo em série". Na figura 13 é possível observar os resistores e contatores usados para regular a tensão nos motores. A resistência é cortada em etapas normalmente na sequência mostrada para as conexões em série e paralela.

Figura 13: Circuito de controle de potência do motor de tração simples

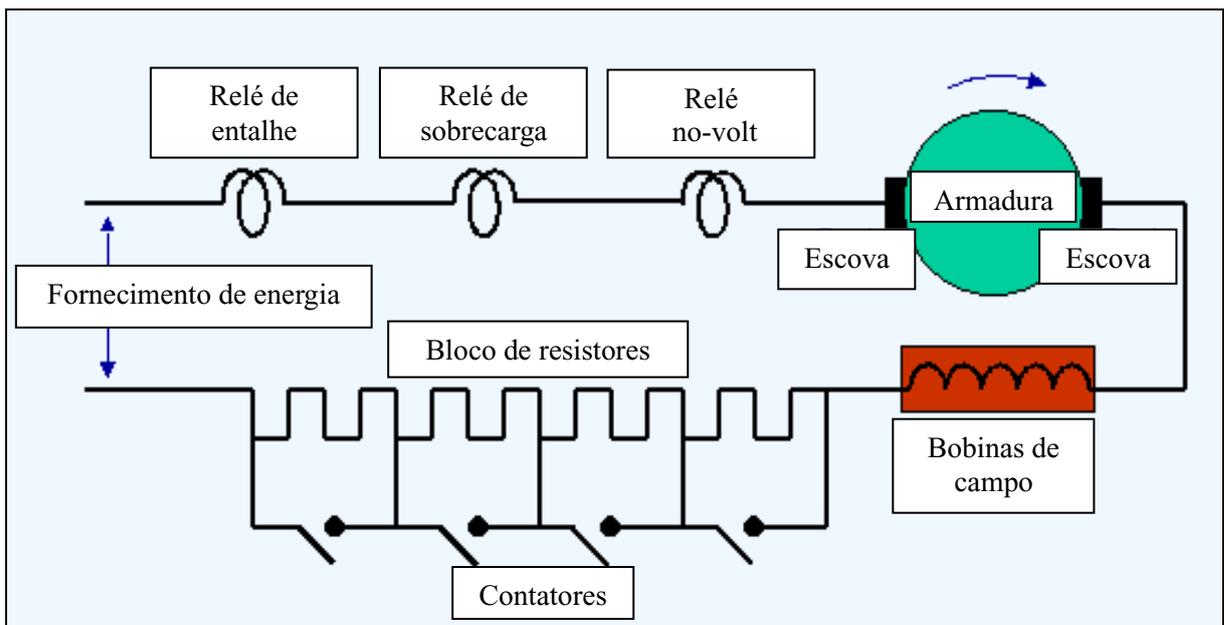


Fonte: The Railway Technical, 2018, modificado pelo autor

## 2.4 Controle e proteção dos motores

Os motores CC são controlados por um "relé de entalhe" colocado no circuito de potência, demonstrado na Figura 14. Mas existem outros relés fornecidos para proteção do motor. Picos agudos de corrente danificarão rapidamente um motor de CC, de modo que o equipamento de proteção é fornecido na forma de um "relé de sobrecarga", que detecta corrente excessiva no circuito e, quando ocorre, desliga a energia para evitar danos aos motores. A energia é desligada por meio de disjuntores de linha, um ou dois interruptores de serviço pesado semelhantes aos disjuntores controlados remotamente. Eles normalmente seriam abertos ou fechados pela ação do controlador do motorista, mas também podem ser abertos automaticamente pela ação do relé de sobrecarga.

Figura 14: Circuito de controle de motor CC com relés

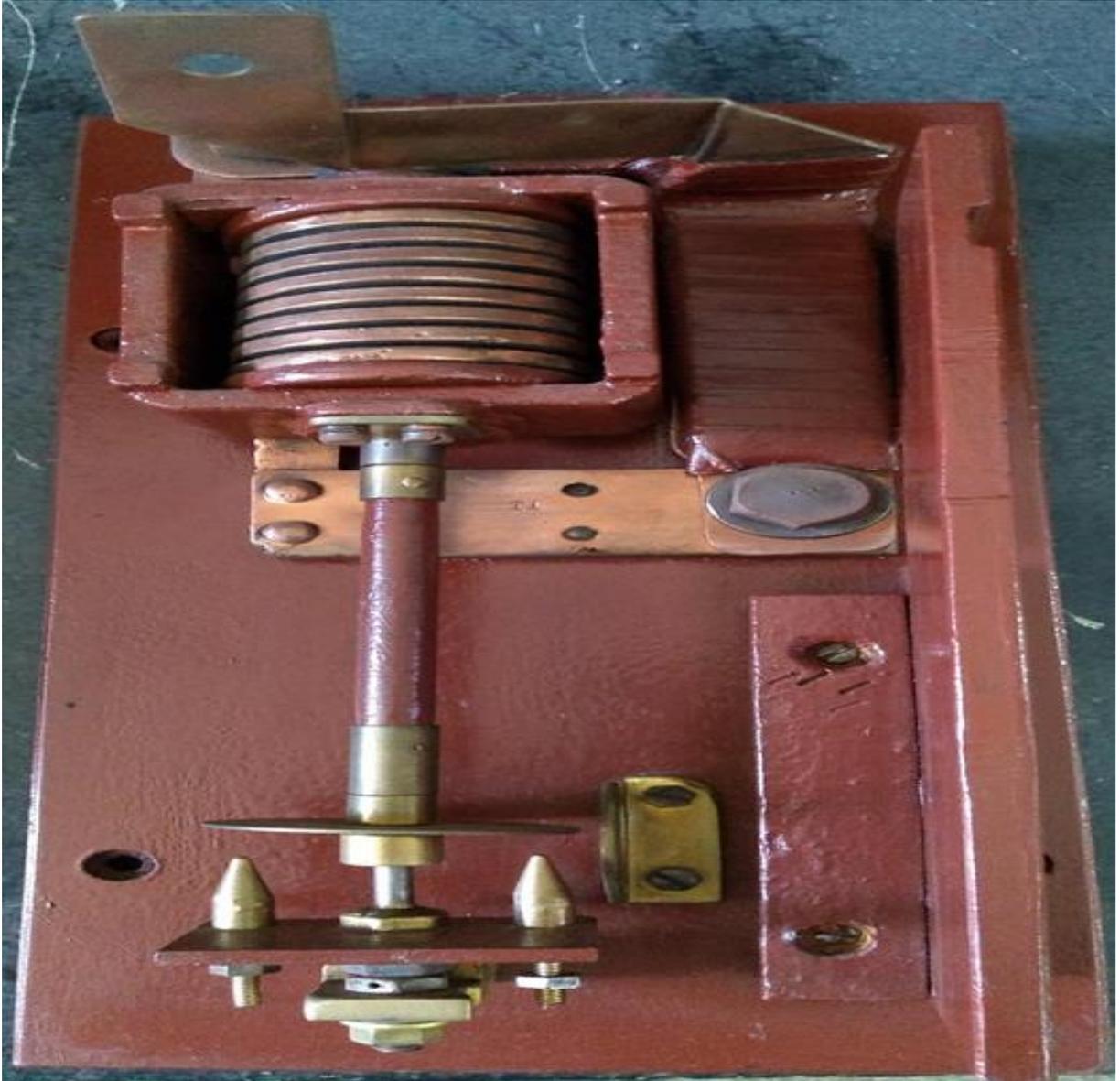


Fonte: The Railway Technical, 2018, modificado pelo autor

Um outro dispositivo de proteção também é fornecido no circuito de controle de motor CC clássico. Este é o relé "no-volt", que detecta a perda de energia por qualquer motivo e garante que a sequência de controle seja retornada ao ponto inicial (ou seja, todas as resistências são restauradas no circuito de energia) antes que a energia possa ser reaplicada. Isso é necessário para garantir que muita corrente não seja aplicada a um motor que perdeu velocidade enquanto a corrente estava desligada.

Nas automotrizes pertencentes a Estrada de Ferro Campos do Jordão somente são utilizados um relé de sobrecarga, como demonstrado na Figura 15, por veículo no qual satisfaz essa função de controle e proteção dos motores.

Figura 15: Relé de sobrecarga utilizado nas automotrizes



Fonte: Produção do próprio autor

## 2.5 Enfraquecimento do campo

O motor de corrente contínua pode ser executado de forma mais rápida do que a "velocidade de balanceamento" básica alcançada, enquanto na configuração paralela completa, sem qualquer resistência no circuito. Isso é feito por "shunting" de campo. Um

circuito adicional é fornecido no campo do motor para enfraquecer a corrente que passa pelo campo. O enfraquecimento é conseguido colocando uma resistência em paralelo com o campo. Isso tem o efeito de forçar a armadura a acelerar para restaurar o equilíbrio entre seu campo magnético e o que está sendo produzido nas bobinas de campo. Faz o trem ir mais rápido.

Várias etapas de enfraquecimento de campo podem ser empregadas, de acordo com o projeto do motor e a finalidade pretendida. Algumas locomotivas usaram até seis etapas de enfraquecimento de campo.

## **2.6 Frenagem regenerativa**

Como o motor de corrente contínua e um gerador de corrente contínua são praticamente a mesma máquina mecanicamente, percebeu-se imediatamente que um trem poderia usar seus motores para atuar como geradores e que isso proporcionaria algum efeito de frenagem se fosse possível encontrar um meio adequado de descartar a energia. A ideia formou que, se a energia pudesse ser devolvida à fonte, outros trens poderiam usá-la. Os trens foram projetados, portanto, o que poderia retornar a corrente, gerada durante a frenagem, para o sistema de abastecimento para uso por outros trens. Vários esquemas foram tentados ao longo de muitos anos com mais ou menos sucesso, mas não foi até a adoção da eletrônica moderna que esquemas confiáveis foram disponibilizados.

## **2.7 Frenagem reostática**

A principal desvantagem do sistema de frenagem regenerativa é que a linha nem sempre é capaz de aceitar a corrente regenerada. Algumas ferrovias tinham subestações equipadas com resistências gigantes para absorver a corrente regenerada não utilizada pelos trens, mas essa era uma solução complexa e nem sempre confiável. Como cada trem já tinha resistores, era um passo lógico para usá-los para descartar a corrente gerada. O resultado foi a frenagem reostática. Quando o motorista solicita o freio, as conexões do circuito de potência aos motores são alteradas de sua configuração de potência para uma configuração de freio e os resistores são inseridos no circuito do motor. À medida que a energia gerada pelo motor é dispersa nos resistores e a velocidade do trem diminui, os resistores são desligados em etapas, exatamente como são durante a aceleração. Frenagem reostática em um trem com motor de

corrente contínua pode ser continuada até menos de 20 mph quando os freios de fricção são usados para parar o trem.

Antes do advento da eletrônica de potência, havia algumas tentativas de combinar as duas formas do que hoje chamamos de "frenagem dinâmica", de modo que a corrente gerada fosse para a linha aérea da fonte de energia ou para o terceiro trilho, se pudesse ser absorvida por outros trens, mas desviado para resistores on-board se não.

Racks de resistores podem frequentemente ser vistos nos tetos de locomotivas de grande porte, para as quais a frenagem dinâmica é uma grande vantagem em classes de declives longos, onde a velocidade deve ser mantida em um nível restrito por longos períodos.

### **3 DESCRIÇÃO**

#### **3.1 Fonte de energia**

Primeiramente, a ferrovia elétrica precisa de uma fonte de alimentação que os trens possam acessar em todos os momentos. Deve ser seguro, econômico e amigável. Pode-se usar corrente contínua ou corrente alternada, a primeira sendo, por muitos anos, mais simples para a tração ferroviária, sendo esta última melhor em longas distâncias e mais barata de instalar, mas, até recentemente, demonstra ser mais complicada de controlar no nível do trem.

A transmissão de energia é sempre ao longo da pista por meio de um fio suspenso ou ao nível do solo, usando um terceiro trilho extra colocado próximo aos trilhos de rolamento. Os sistemas de CA sempre usam fios aéreos, a CC pode usar um fio suspenso ou um terceiro trilho; ambos são comuns. Ambos os sistemas suspensos exigem pelo menos um coletor conectado ao trem para que ele possa estar sempre em contato com a energia. Coletores de correntes aéreas usam um "pantógrafo", assim chamado porque era a forma da maioria deles até cerca de 30 anos atrás. O circuito de retorno é através dos trilhos de operação de volta para a subestação. Os trilhos de operação estão no potencial da terra e estão conectados à subestação.

##### **3.1.1 Retorno**

Tem que haver um circuito completo, desde a fonte de energia até o item consumidor e de volta à fonte, então um condutor de retorno é necessário para a ferrovia. Assim, usa-se os trilhos de aço nas quais as rodas funcionam. Desde que sejam tomadas precauções para evitar

que a tensão fique muito alta acima do zero do solo, ela funcionará muito bem e terá funcionado durante o último século. Naturalmente, como muitas ferrovias usam os trilhos de operação para circuitos de sinalização, precauções especiais devem ser tomadas para protegê-los de interferência.

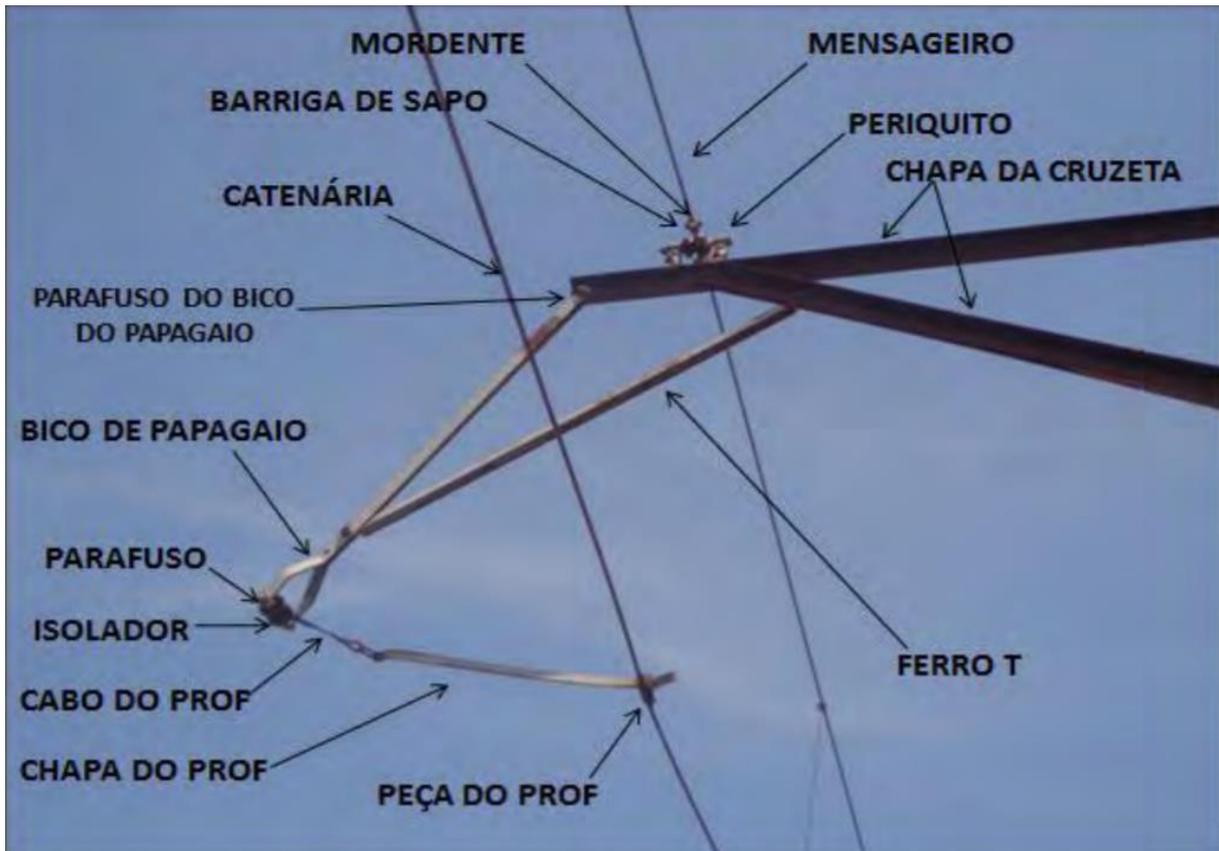
O circuito de energia no trem é completado conectando o retorno às escovas esfregando nas extremidades do eixo. As rodas, sendo de aço, levam para os trilhos de corrida. Estes são ligados à subestação que fornece a energia e que faz o trabalho. A mesma técnica é usada para suprimentos de linhas aéreas CC ou CA.

### **3.1.2 Linha aérea (Catenária)**

A mecânica da fiação da fonte de alimentação não é tão simples quanto parece. Pendurar um fio sobre a pista, fornecendo-lhe trens atuais e em funcionamento, não é tão fácil se é para fazer o trabalho corretamente e durar o tempo suficiente para justificar a despesa de instalá-lo. O fio deve ser capaz de transportar a corrente (vários milhares de ampères), permanecer em linha com a rota, resistir ao vento, frio extremo e calor e outras condições climáticas hostis.

O fio de contato deve ser mantido em tensão horizontalmente e puxado lateralmente para negociar curvas na pista. A tensão do fio de contato será na região de 2 toneladas. O comprimento do fio é geralmente entre 1000 e 1500 metros de comprimento, dependendo das faixas de temperatura. O arame é zigzagueado em relação à linha central da pista, até mesmo o desgaste do pantógrafo do trem quando ele passa por baixo. Sistemas catenárias aéreas, chamadas de "catenária" a partir da curva formada pelo cabo de suporte, têm uma geometria complexa, hoje em dia geralmente projetada por computador. A seguir, é demonstrado na Figura 16 a linha aérea da Estrada de Ferro Campos do Jordão e alguns dos seus componentes presentes.

Figura 16: Elementos do poste e sustentação da rede aérea



Fonte: Produção do próprio autor

O fio de contato é ranhurado para permitir que um clipe seja fixado no lado superior. O clipe é usado para prender o fio conta-gotas. A tensão do fio é mantida por pesos suspensos em cada extremidade do seu comprimento. Cada comprimento é sobreposto pelo seu vizinho para garantir uma passagem suave para o pantógrafo. Tensão incorreta, combinada com a velocidade errada de um trem, fará com que a cabeça do pantógrafo comece a saltar. Um arco elétrico ocorre com cada ressalto e uma panela e arame em breve ambos se desgastam em tais condições.

Mais de um pantógrafo em um trem pode causar um problema semelhante quando a cabeça do pantógrafo principal cria uma onda no fio e a cabeça traseira não consegue ficar em contato. Altas velocidades pioram o problema.

Um fio ondulado causará outro problema. Isso pode fazer com que os fios conta-gotas, dos quais o fio de contato é pendurado, "dobre" e formem pequenos loops. O fio de contato fica muito alto e agrava o contato ruim.

### 3.1.3 Pantógrafo

Dispositivo montado no topo de automotrizes, que os alimenta com corrente elétrica recolhida do fio *trolley*. O modelo de pantógrafo utilizado na Estrada de Ferro Campos do Jordão é demonstrado na Figura 17. Para proteger o equipamento de locomoção contra descargas atmosféricas na linha superior da cabeça, o pantógrafo é equipado com um para-raios e uma bobina de estrangulamento.

Figura 17: Aparência do pantógrafo utilizado na automotriz



Fonte: Produção do próprio autor

### 3.1.4 Rabicho

O rabicho possui a função de eliminar a passagem de energia pelas articulações do pantógrafo, facilitando a passagem de energia. Nota-se o desgaste dos rabichos com o passar do tempo na Figura 18.

Figura 18: Aparência dos rabichos utilizados na automotriz



Fonte: Produção do próprio autor

### 3.2 Compressor

O ar comprimido é quase sempre usado para freios e, às vezes, para alimentar as portas do trem. Também uma vez popular para alimentar interruptores ou contadores de força de tração. Geralmente é usado para levantar pantógrafos em sistemas de linhas aéreas. O ar comprimido precisa ser secado após a compressão para evitar que a umidade da condensação entre nas válvulas. O compressor é normalmente acionado diretamente a partir da fonte de energia principal (a linha aérea ou terceiro trilho em linhas eletrificadas ou o gerador principal em veículos movidos a diesel). O compressor em si consiste em uma bomba acionada por um motor elétrico. A energia do motor vem da alimentação elétrica interna ou, às vezes, diretamente do suprimento de tração. Nas locomotivas elétricas, o fornecimento pode vir do transformador, através de um retificador e de uma locomotiva diesel, do alternador auxiliar. Em algumas locomotivas a diesel, o compressor é acionado diretamente do motor a diesel por meio de um eixo de conexão. O compressor presente nas automotrizes da EFCJ é ilustrado na Figura 19 e Figura 20.

Figura 19: Aparência externa do compressor utilizado na automotriz



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 20: Aparência interna do compressor utilizado na automotriz



Fonte: Produção do próprio autor

### 3.2.1 Controle de freio do motorista

A maioria dos trens usa ar comprimido para operação de freio. A maioria das locomotivas mais antigas usam um sistema de controle de freio pneumático que requer uma

válvula de freio a ser operada pelo motorista. A válvula controla o fluxo de ar para dentro e para fora do tubo de freio que, por sua vez, controla os freios em cada veículo no trem. A válvula de freio do motorista é conectada ao tubo na cabine, para que haja sempre um suprimento constante de ar disponível para reabastecer o sistema de controle de freio quando necessário. Uma torneira de isolamento é fornecida na cabine para que o controle do freio possa ser fechado quando a cabine não estiver em uso.

O compressor é controlado automaticamente por um "regulador de compressor". O regulador é projetado para detectar o ponto em que o nível de ar comprimido no sistema caiu para o nível mais baixo permitido. Quando isso acontece, os contatos da chave do regulador fecham e enviam uma corrente de baixa voltagem para um "contator do compressor". O contator é energizado e fecha um interruptor na fonte de alimentação para ligar o motor do compressor. Quando a pressão atinge o limite superior necessário, o regulador abre e o contator desliga o motor do compressor

### 3.2.2 Válvula pressostática

É um dispositivo eletro-pneumático que regula a quantidade de pressão no reservatório de ar. Pode ser observado na Figura 21 o componente utilizado na Estrada de Ferro Campos do Jordão.

Figura 21: Aparência externa do pressostato utilizado na automotriz



Fonte: Produção do próprio autor

### 3.3 Controller

Dispositivo elétrico de distribuição e controle da energia, controle de tração e frenagem e sentido de locomoção da automotriz. Pode-se visualizar na Figura 22 o design utilizado na EFCJ.

Figura 22: Design interno do controller utilizado na automotriz

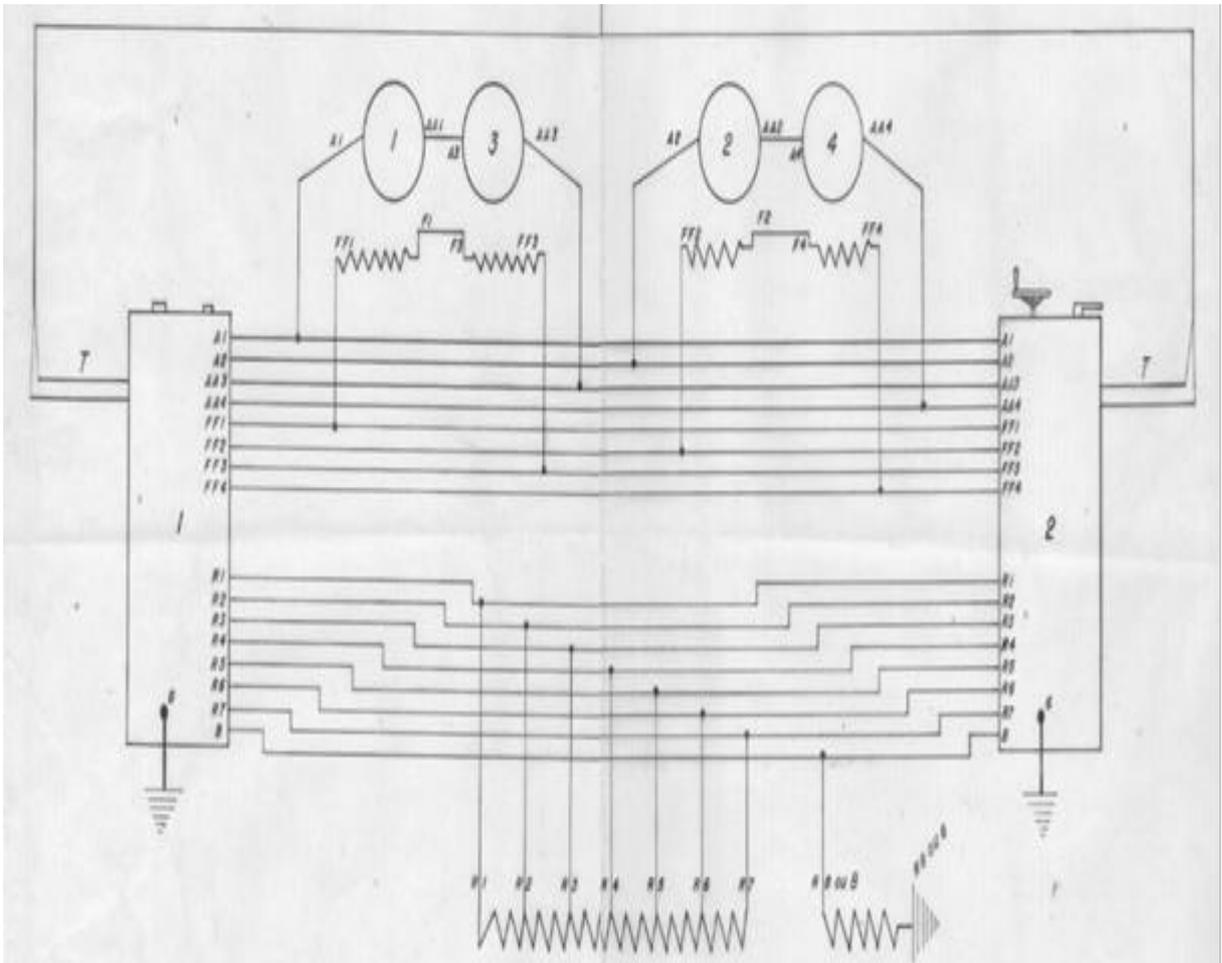


Fonte: Produção do próprio autor

A função do controller é de regular a corrente elétrica nos motores e a velocidade do bonde. Supondo que a automotriz esteja parada e que a chave de reversão esteja na posição

“FORWARD” (“AVANTE”) e que a manivela seja levada ao primeiro ponto: a corrente elétrica passará pelo controller, através de todas as resistências e pelos 4 motores, isto é, em série, e a automotriz será posta em movimento. A proporção que adquire velocidade, a corrente gradualmente diminui: a manivela é então levada ao segundo ponto, que elimina parte das resistências, o que faz aumentar a velocidade do bonde. E, assim por diante, movendo-se a manivela de ponto a ponto até o último, eliminando-se assim todas as resistências e toda a energia elétrica vai aos motores. O controller tem também a função de cortar dois motores do circuito, isto é, os motores do truque número 1 ou 2. Esta disposição é para o caso de se verificar alguma avaria em um dos motores, podendo a automotriz ser levado a manutenção, sem necessidade de ser rebocado. Pode ser verificado na Figura 23 as conexões entre os dois controllers da automotriz com as resistências que determinam a queda de tensão, sendo que a tensão máxima recebida por motor equivale a 375 V, assim a tensão máxima por truque alcança o valor de 750 V.

Figura 23: Diagrama das ligações elétricas das automotrizes



Fonte: Produção do próprio autor

### 3.3.1 Alavanca de trabalho

Peça localizada no tampo do controller que ao movimentá-la esta realiza o trabalho de engrenar pontos de aceleração ou frenagem. Peça representada na Figura 24.

Figura 24: Tampa do controller



Fonte: Produção do próprio autor

### 3.3.2 Bloco de resistências

São fios de níquel/cromo enrolados em espiral “mola” com dimensionamentos conforme especificação de retenção da corrente desejada. A seguir, na Figura 25 é demonstrado as resistências utilizadas para a queda de tensão das automotrizes.

Figura 25: Resistências utilizadas nas automotrizes



Fonte: Produção do próprio autor

### 3.3.3 Freio reostático

A manivela do controller também opera o freio reostático. Quando essa manivela é colocada em um ponto do freio “BRAKE”, os motores estão completamente desligados do fio trolley, e ligados em série com a resistência. Os motores assim produzem corrente que em forma de calor é dissipado pelas resistências, dando um truque de freiagem às rodas. Essa freiagem depende, portanto, da corrente produzida pelos motores, a qual por sua vez, depende da velocidade com que a automotriz esteja correndo, e assim, quanto maior for a velocidade da automotriz, tanto mais força terá o freio reostático. Com a automotriz, o freio reostático não tem ação. Esse freio não pode ser usado para o bonde, mas para reduzir a sua velocidade em descidas de rampas, ou no nível, para reduzir sua velocidade. Quando a automotriz estiver recuando, isso é, movendo-se em direção contrária a cabine ocupada pelo motoneiro, o freio reostático não operará na posição “FORWARD” (AVANTE), sendo preciso levar a chave de reversão a posição “REVERSE” (ATRAS) antes de se colocar a manivela de controller no ponto de freiagem, “BRAKE”.

### 3.4 Cabeamento

As locomotivas são fornecidas com um piso falso, dando cerca de três polegadas de folga entre ele e o piso principal da locomotiva. Todos os cabos que atravessam a locomotiva ou que correm entre os compartimentos do motorista estão situados entre esses andares. Todos os cabos de baixa tensão são conduzidos no conduíte de modo que, se uma falha elétrica ocorrer em um cabo de alta tensão, não há medo de que os cabos se danifiquem.

Os cabos do motor de tração são colocados em uma tubulação metálica flexível estanque e levados através de glândulas seladas para as caixas de conexão do motor fixadas sob o piso da locomotiva. Nestas caixas eles são conectados através de barras de fixação ao cabeamento de energia da locomotiva. Os pugilistas são fornecidos com tampas destacáveis cobertas por armadilhas no piso falso, de modo que todas as conexões sejam acessíveis dentro da locomotiva. Ambas as situações podem ser visualizadas nas Figuras 26 e 27, mostrando o acesso ao motor pelo compartimento da automotriz e a caixa que realiza as conexões entre o motor e os cabeamentos que se encaminham para as resistências do veículo.

Figura 26: Tampa de inspeção no assoalho da automotriz



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 27: Caixa de ligação dos cabos do motor da automotriz



Fonte: Produção do próprio autor

### 3.5 Disjuntor de linha (Chave geral)

Dispositivo de segurança elétrica que recebe e distribui energia, e em caso de curto circuito esta chave desliga automaticamente. O dispositivo utilizado nas automotrizes é representado na Figura 28.

Figura 28: Disjuntor de linha utilizado nas automotrizes

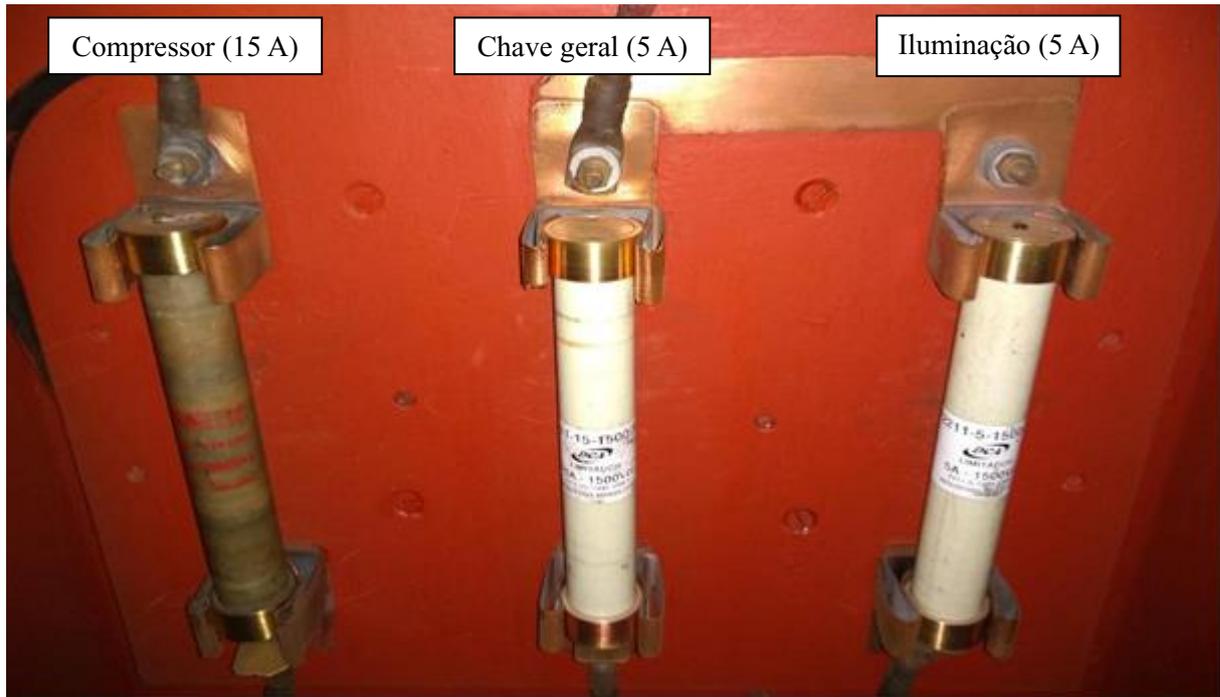


Fonte: Produção do próprio autor

#### 3.5.1 Fusíveis

É necessário essencialmente um fusível para o funcionamento da chave geral, como observado na Figura 29, sendo ele de 5 A, que realiza o percurso para o banco de resistência, que vai realizar uma queda de tensão de 1500V para 130V, desta forma é possível ativar a botoeira e acionar o botão de pulso para energizar a automotriz, sendo agora possível também acionar os interruptores de iluminação dos faróis e lâmpadas dos compartimentos dos bondes, que são independentes da alimentação da bateria. Também são utilizados fusíveis de 5 A para a iluminação 130 V e outro fusível de 15 A para o compressor.

Figura 29: Fusíveis de proteção utilizados na automotriz



Fonte: Produção do próprio autor

São compostos por um condutor de seção reduzida montados em uma base de material isolante, sendo um dispositivo de proteção contra sobrecorrente em circuitos elétricos, limitando a corrente que pode passar em um circuito no caso de uma falha.

### 3.6 Circuito elétrico da EFCJ

A energia é concedida pela concessionária de energia “ELEKTRO”, chega na subestação de Santo Antônio do Pinhal, demonstrada na Figura 30, com 13800 V em corrente alternada. Na subestação essa energia é transformada em 1500 V, através de um transformador, observada na Figura 31, e depois da queda de tensão, retifica-se para corrente contínua. Logo, essa energia elétrica é distribuída pelo fio *trolley*, até entrar em contato com o pantógrafo da automotriz, e assim percorre pelo relé de sobrecarga, direcionando essa energia para o disjuntor de linha (chave geral) que a transfere quando acionada ao controller e ao motor do compressor. Do controller, essa tensão é graduada para um grupo de resistências, que limitam essa energia para os motores, tendo como retorno os trilhos.

Figura 30: Subestação em Santo Antônio do Pinhal



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 31: Transformador



Fonte: Produção do próprio autor

## **4. SISTEMAS PROPOSTOS**

### **4.1 Rede de CA / MCC**

Esquema realizado para uma locomotiva elétrica de 25000 V de CA usada no Reino Unido a partir do final da década de 1960. O 25000 V de CA é coletado pelo pantógrafo e passado para o transformador. O transformador é necessário para reduzir a tensão a um nível que pode ser gerenciado pelos motores de tração. O nível de corrente aplicado aos motores é controlado por um "comutador de derivação", que liga mais seções do transformador para aumentar a tensão que passa pelos motores. Funciona da mesma forma que os controladores de resistência usados na tração CC, onde os contadores de resistência são controlados por uma árvore de cames operando sob os comandos do motorista.

Antes de ser passado para os motores, a CA tem que ser mudada para CC, passando-o através de um retificador. Nos últimos 30 anos, os retificadores usaram diodos e seus derivados, cujo desenvolvimento contínuo levou aos atuais e avançados sistemas de tração de CA.

#### **4.1.1 Diodo**

Um diodo é um dispositivo sem partes móveis, conhecido como semicondutor, que permite que a corrente flua através dele somente em uma direção. Ele bloqueará qualquer corrente que tente fluir na direção oposta. Quatro diodos dispostos em uma configuração de ponte, como mostrado abaixo, usam essa propriedade para converter CA em CC ou para "retificá-lo". É chamado de "retificador de ponte". Os diodos rapidamente se tornaram populares para aplicações ferroviárias porque representam uma opção de baixa manutenção. Eles apareceram pela primeira vez no final dos anos 1960, quando os retificadores de diodo foram introduzidos em locomotivas elétricas de 25000 V de CA.

#### **4.1.2 Tiristor (SCR)**

O tiristor é um dispositivo de quatro camadas e membro da família dos semicondutores que tem dois estados estáveis de operação: um estado apresenta corrente aproximadamente igual a zero, e o outro tem uma corrente elevada; limitada apenas pela resistência externa. Nesta situação utiliza-se um SCR (Retificador Controlado de Silício), no

qual é o tiristor de uso mais difundido, devido ao uso do silício, que possui alta capacidade de potência e capacidade de suportar altas temperaturas; além de apresentar alta velocidade de comutação e elevada vida útil. Ele age como um diodo na medida em que permite que a corrente flua em apenas uma direção, mas difere do diodo em que só permitirá que a corrente flua depois de ter sido ligada ou "bloqueada". Uma vez que tenha sido fechado e a corrente esteja fluindo, a única maneira de desativá-lo é enviar a corrente na direção oposta. Isso cancela o comando de abertura original. É simples de conseguir em uma locomotiva de CA porque a corrente muda sua direção durante cada ciclo. Com esse desenvolvimento, os retificadores controláveis tornaram-se possíveis e os comutadores rapidamente se tornaram história. Uma versão controlada por tiristores do sistema de tração de locomotivas elétricas de 25000 V de CA se parece com o diagrama aqui à esquerda.

Uma derivação é retirada do transformador para cada motor de CC e cada um possui seus próprios tiristores e diodos de controle. A CA do transformador é retificada em CC cortando os ciclos, por assim dizer, de modo que eles apareçam na forma bruta como meio ciclo de CA.

Na realidade, um circuito de suavização é adicionado para remover a maior parte do "ripple" e fornecer um fluxo de energia mais constante. Enquanto isso, o nível de potência do motor é controlado variando o ponto em cada ciclo retificado no qual os tiristores são disparados. Quanto mais tarde no ciclo o tiristor for fechado, menor a corrente disponível para o motor. Conforme o gating é avançado, a quantidade de corrente aumenta até que os tiristores estejam "ligados" para o ciclo completo. Essa forma de controle é conhecida como "controle de ângulo de fase".

#### **4.1.3 SEPEX**

Nos sistemas de controle de SCR mais recentes, os próprios motores são conectados de maneira diferente do arranjo CC padrão antigo. As armaduras e os campos não estão mais conectados em série, eles são conectados separadamente - excitação separada, ou SEPEX. Cada campo tem seu próprio tiristor, que é usado para controlar os campos individuais com mais precisão.

Como os motores são excitados separadamente, a sequência de aceleração é realizada em dois estágios. No primeiro estágio, a armadura é alimentada pela corrente dos seus tiristores até atingir a tensão total. Isso pode dar cerca de 25% da velocidade máxima da locomotiva. No segundo estágio, os tiristores de campo são usados para enfraquecer a

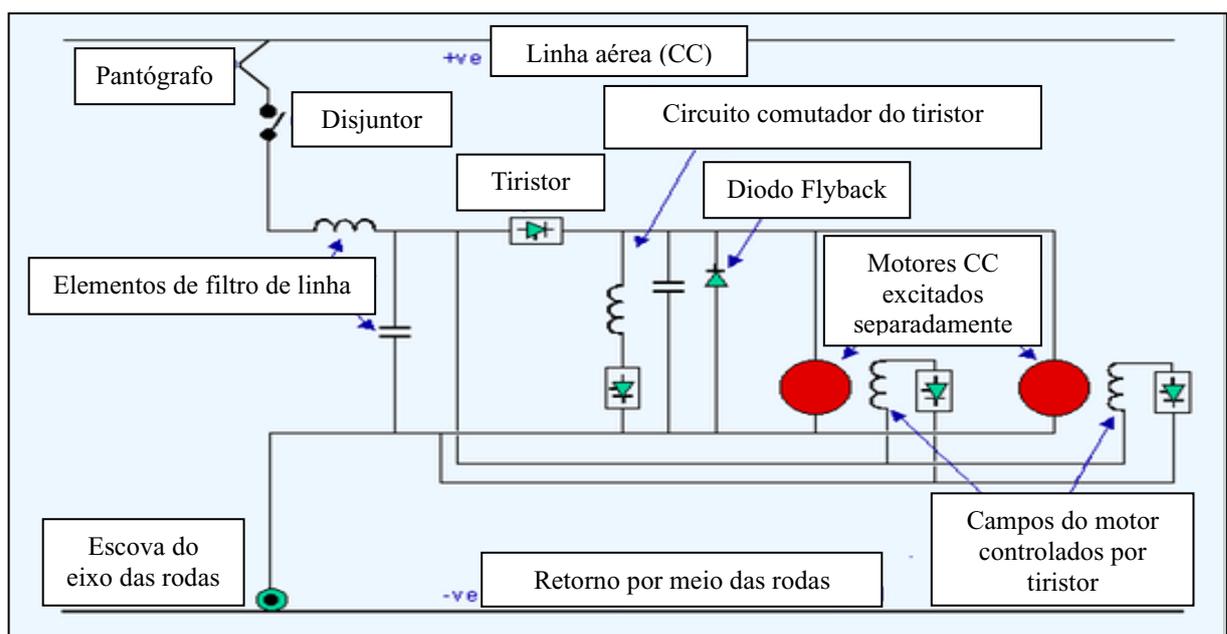
corrente de campo, forçando o motor a acelerar para compensar. Essa técnica é conhecida como enfraquecimento de campo e já foi usada em aplicações pré-eletrônicas.

Uma grande vantagem do SEPEX é que o deslizamento da roda pode ser detectado e corrigido rapidamente, em vez do método tradicional de deixar as rodas girarem até que o motorista perceba ou use um relé de deslize da roda para desligar o circuito e reiniciá-lo.

## 4.2 Choppers CC

O tradicional controle de resistência dos motores de corrente contínua gasta corrente porque é extraído da linha (sobrecarga ou terceiro trilho) e apenas alguns são usados para acelerar o trem a 20-25 mph quando, finalmente, a tensão total é aplicada. O restante é consumido nas resistências. Imediatamente os tiristores foram mostrados para trabalhar para a tração CA, todos começaram a procurar uma maneira de usá-los em sistemas CC. O problema era como desligar o tiristor assim que ele fosse disparado, em outras palavras, como fazer com que a tensão reversa operasse em um circuito CC essencialmente unidirecional. Isso é feito adicionando um "circuito ressonante" usando um indutor e um capacitor para forçar a corrente a fluir na direção oposta ao normal. Isso tem o efeito de desligar o tiristor ou "comutar". Ele é mostrado, na Figura 32, o diagrama completo do circuito de controle do tiristor CC. Ele tem seu próprio tiristor para ligá-lo quando necessário.

Figura 32: Esquema de um circuito de controle de tração do tiristor CC



Fonte: The Railway Technical, 2018, modificado pelo autor

### 4.2.1 Frenagem Dinâmica

Trens equipados com controle de tiristor podem prontamente usar frenagem dinâmica, onde os motores se tornam geradores e alimentam a corrente resultante em uma resistência a bordo (frenagem reostática) ou de volta ao sistema de alimentação (frenagem regenerativa). Os circuitos são reconfigurados, geralmente por um "interruptor de motor / freio" operado por um comando do motorista, para permitir que os tiristores controlem o fluxo de corrente enquanto os motores diminuem a velocidade. Uma vantagem do circuito de controle dos tiristores é sua capacidade de escolher frenagem regenerativa ou reostática simplesmente detectando automaticamente o estado de receptividade da linha. Assim, quando a voltagem regenerada através do circuito do filtro de conexão de alimentação atinge um limite superior pré-definido, um tiristor dispara para desviar a corrente para o resistor on-board.

Duas outras características do circuito de tiristor CC são o "diodo de roda livre" e o "filtro de linha". O diodo de roda livre mantém a corrente circulando através do motor enquanto o tiristor está desligado, usando a própria indutância eletromagnética do motor. Sem o circuito de diodo, a corrente acumulada para o motor seria mais lenta.

O controle do tiristor pode criar muita interferência elétrica - com todo esse corte, está ligado a isso. O "filtro de linha" compreende um capacitor e um indutor e, como o próprio nome sugere, é usado para impedir que a interferência do circuito de alimentação do trem entre no sistema de alimentação.

O tiristor em aplicações de tração CC controla a corrente aplicada ao motor cortando-o em segmentos, pequenos no início do processo de aceleração, aumentando gradualmente à medida que a velocidade aumenta. Este corte do circuito deu origem ao apelido de "controle do helicóptero". É representado visualmente pelo diagrama abaixo, onde o tempo "ON" do tiristor é regulado para controlar a tensão média no circuito do motor. Se o tempo "ON" for aumentado, o mesmo acontece com a tensão média e o motor acelera. O sistema começou a aparecer nas EMUs do Reino Unido durante os anos 80.

### 4.3 Motores CA

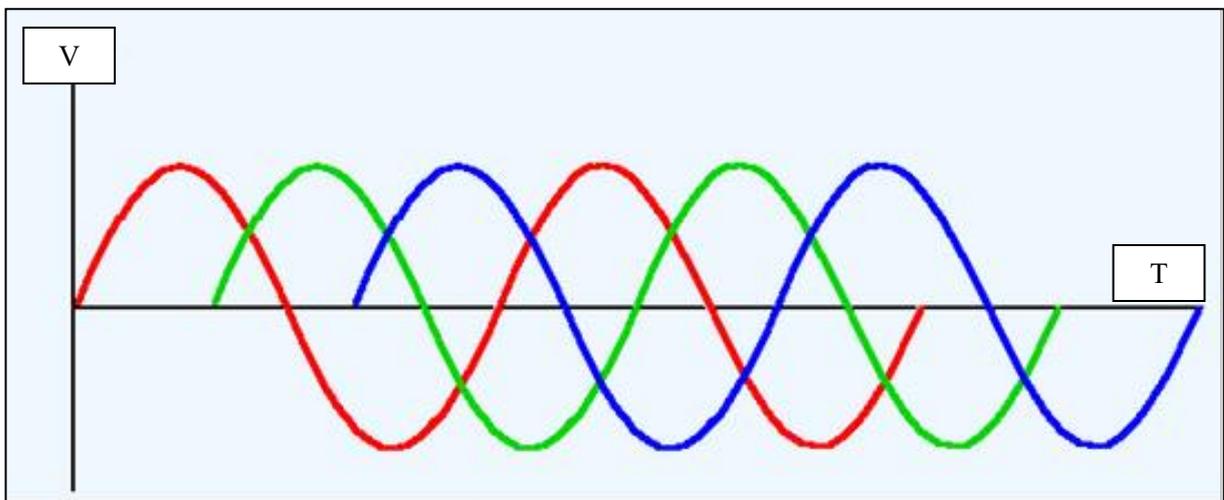
Existem dois tipos de motor de corrente alternada, síncrono e assíncrono. O motor síncrono tem suas bobinas de campo montadas no eixo de acionamento e as bobinas de armadura no invólucro, o inverso da prática normal. O motor síncrono tem sido usado em tração elétrica - a aplicação mais conhecida dos franceses em seu trem TGV Atlantique. Isso

usava uma fonte de alimentação de 25000 V de CA, retificado para CC e, em seguida, invertido de volta para CA para alimentação do motor. Ele foi projetado antes que o tiristor GTO tivesse sido suficientemente desenvolvido para uso ferroviário e usasse tiristores simples. A vantagem para o motor síncrono nesta aplicação é que o motor produz as tensões reversas necessárias para desligar os tiristores. Foi uma boa solução é o seu dia, mas foi rapidamente ultrapassado pelo segundo tipo de motor CA - o motor assíncrono - quando os tiristores GTO se tornaram disponíveis.

#### 4.3.1 Motor assíncrono

O motor assíncrono, também chamado de motor de indução, é um motor de CA que compreende um rotor e um estator como o motor de CC, mas o motor de CA não precisa de corrente para fluir através da armadura. A corrente que flui nas bobinas de campo força o rotor a girar. No entanto, ele tem que ter uma fonte trifásica, ou seja, uma em que a CA tem três condutores, cada um conduzindo em um ponto um terço do período do ciclo normal, como é representado na Figura 33.

Figura 33: Esquema de ciclos de CA trifásico



Fonte: The Railway Technical, 2018, modificado pelo autor

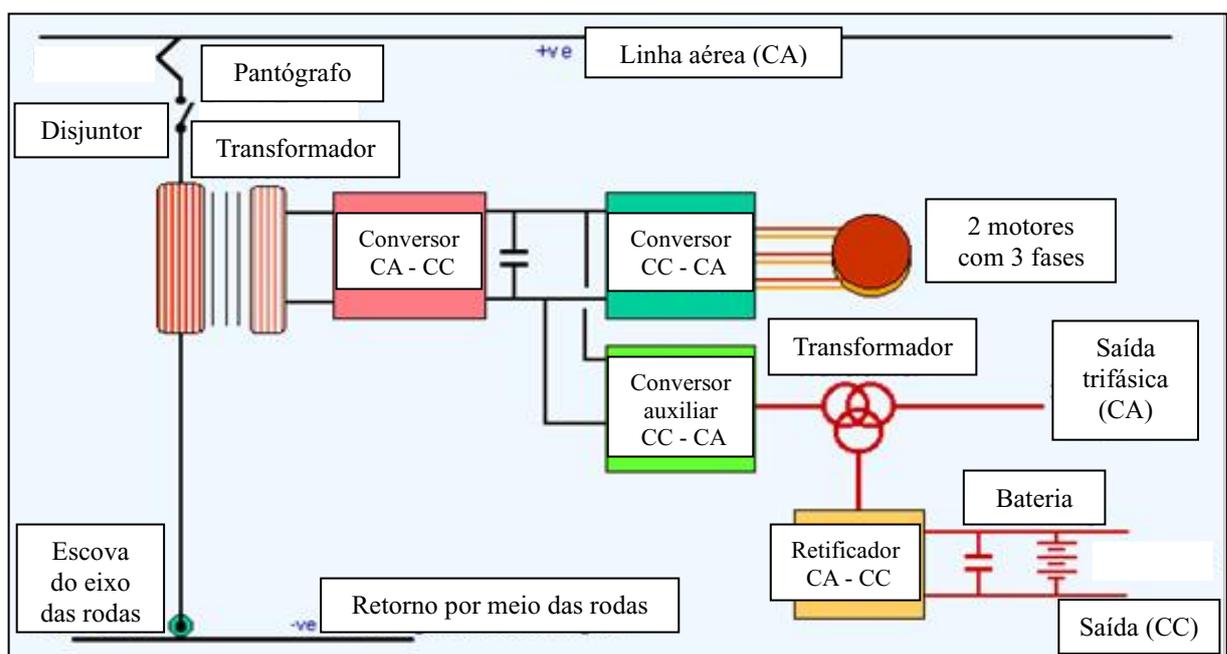
As duas grandes vantagens do projeto trifásico são que, um, o motor não tem escovas, já que não há conexão elétrica entre a armadura e os campos e, dois, a armadura pode ser feita de lâminas de aço, em vez do grande número de enrolamentos necessários em outros motores. Esses recursos tornam mais robusto e mais barato de construir do que um motor de comutador.

### 4.3.2 Circuito de controle CA

A eletrônica moderna nos deu o inversor de frequência. Ele só se tornou disponível com a eletrônica moderna porque a velocidade de um motor trifásico é determinada pela frequência de sua alimentação, mas, ao mesmo tempo, a potência tem que ser variada. A frequência costumava ser difícil de controlar e é por isso que, até o advento da eletrônica moderna, os motores CA eram usados quase exclusivamente em aplicações de velocidade constante e eram, portanto, inadequados para a operação ferroviária. Um motor de tração trifásico moderno é controlado alimentando-se em três correntes CA que interagem para fazer a máquina girar. As três fases são mais facilmente fornecidas por um inversor que fornece as três entradas de motor de tensão variável, frequência variável. As variações da tensão e frequência são controladas eletronicamente.

O motor CA pode ser usado por um sistema de alimentação de tração CA ou CC. No caso da alimentação CA, demonstrado na figura 34, a tensão da linha (digamos, 25000 V monofásica) é alimentada em um transformador e um enrolamento secundário é retirado para o conversor CA para CC (retificador) que produz uma saída CC de, digamos, 1500 - 2000 volts dependendo da aplicação. Isso é então passado para o conversor de motor (inversor) que fornece as três fases controladas para os motores de tração. A conexão entre o retificador e o inversor é chamada de link CC. Isso geralmente também fornece uma saída para os circuitos auxiliares do trem.

Figura 34: Esquema de circuito alimentado por CA



Fonte: The Railway Technical, 2018, modificado pelo autor

Todos os tiristores são GTOs, incluindo aqueles no retificador, uma vez que agora são usados para fornecer uma saída mais eficiente do que é possível com os tiristores mais antigos. Além disso, todas as instalações de controle de motor CC estão disponíveis, incluindo a frenagem dinâmica, mas são fornecidas de forma mais eficiente e com menos partes móveis. Aplicada a uma fonte de tração CC, a configuração trifásica é ainda mais simples, pois não precisa de um transformador ou de um retificador. A tensão da linha CC é aplicada ao inversor, que fornece o controle do motor trifásico.

O controle desses sistemas é complexo, mas é feito por microprocessadores. O controle dos pulsos de tensão e da frequência deve ser combinado com a velocidade do motor.

### **4.3.3 Tiristor GTO**

No final dos anos 80, o tiristor tinha sido desenvolvido para um estágio em que poderia ser desligado por um circuito de controle, bem como ligado por um. Isso significava que o circuito de comutação dos tiristores poderia ser eliminado para circuitos alimentados por alimentação CC, uma economia em vários dispositivos eletrônicos para cada circuito. Agora os tiristores poderiam ser ligados e desligados virtualmente à vontade e agora um único tiristor poderia ser usado para controlar um motor de corrente contínua.

É neste ponto que o motor CC convencional atingiu seu estado final na indústria de tração ferroviária. A maioria dos sistemas que estão sendo construídos agora usa motores CA.

### **4.3.4 IGBT**

Tendo o inversor de frequência usando tiristores GTO universalmente aceitos (bem, quase) como o sistema de tração moderno, os engenheiros de eletrônica de potência produziram um novo desenvolvimento. Este é o IGBT ou o Transistor Bipolar de Porta Isolada. O transistor foi o precursor da eletrônica moderna e pode ser ligado ou desligado como um tiristor, mas não precisa que as altas correntes do tiristor se desliguem. No entanto, até muito recentemente, só era capaz de lidar com correntes muito pequenas, medidas em milésimos de ampères. Agora, o dispositivo moderno, na forma do IGBT, pode lidar com milhares de amplificadores e apareceu em aplicações de tração. Uma versão de corrente mais baixa foi usada pela primeira vez em vez de tiristores em inversores de fonte auxiliar no início da década de 1990, mas uma versão com maior valor nominal entrou em serviço nos acionamentos de tração CA mais recentes. Seu principal benefício é que ele pode alternar

muito mais rápido (três a quatro vezes mais rápido) que os GTOs. Isso reduz a corrente necessária e, portanto, o calor gerado, dando unidades menores e mais leves. A comutação mais rápida também reduz o complexo "gearing" de GTOs e faz com que um som de aceleração muito mais suave e mais uniforme de debaixo do trem. Com os IGBTs, a mudança de marcha desapareceu.

#### **4.3.5 Motor de Ímã Permanente**

O próximo desenvolvimento no projeto de motores elétricos é o motor de ímã permanente. Este é um motor síncrono de corrente alternada trifásica com a construção usual de gaiola de esquilo substituída por ímãs fixados no rotor. O motor requer um sistema de controle complexo, mas pode ser até 25% menor que um motor trifásico convencional para a mesma potência nominal. O projeto também fornece temperaturas operacionais mais baixas, de modo que o resfriamento do rotor não é necessário e o estator é uma unidade vedada com resfriamento líquido integral. Em 2011, vários tipos diferentes de trens foram equipados com motores de ímã permanente, incluindo 25 trens de alta velocidade AGV, bondes na França e Praga e EMUs na Europa e no Japão. O tamanho reduzido é particularmente atraente para os veículos de piso baixo, onde os motores de cubo podem ser uma maneira eficaz de fornecer tração em um bogie compacto. O desenvolvimento do projeto do motor e os sistemas de controle associados continuam e é certo que o motor de ímã permanente será visto em mais ferrovias no futuro. Uma boa descrição do motor por Stuart Hillmansen, Felix Schmid e Thomas Schmid está na *Railway Gazette International*, em fevereiro de 2011.

#### **4.4 Diferenças CA e CC**

Para entender os princípios dos modernos sistemas de controle de potência de tração, vale a pena conferir os fundamentos dos circuitos CC e CA. CC é corrente contínua - ela viaja em uma direção somente ao longo de um condutor. CA é corrente alternada - assim chamada porque muda de direção, fluindo primeiro de um lado ao longo do condutor, depois do outro. Isso acontece muito rapidamente, sendo que o número de vezes que muda de direção por segundo é chamado de frequência e é medido em Hertz.

Do ponto de vista da transmissão, a CA é melhor que a CC porque pode ser distribuída em altas voltagens por um fio condutor pequeno, enquanto a CC precisa de um fio grande e pesado ou, em muitas ferrovias de CC, um trilho extra. A CC também precisa de subestações

alimentadoras mais frequentes do que a CA - a razão para as médias ferroviárias é de cerca de 8 para 1. Ela varia muito de uma aplicação para outra, mas isso dá uma ideia aproximada.

Ao longo dos cem anos, aproximadamente, desde a introdução da tração elétrica nas ferrovias, a regra geral é que a CA é usada para distâncias mais longas e linhas principais e corrente contínua para linhas mais curtas, suburbanas ou de metrô. O CC recebe até 3000 volts, enquanto o CA usa 15000 - 50000 volts.

Até recentemente, os motores de corrente contínua eram o tipo preferido de ferrovias, porque suas características eram perfeitas para o trabalho. Eles eram fáceis de controlar também. Por esse motivo, até mesmo trens alimentados por suprimentos de corrente alternada eram geralmente equipados com motores de corrente contínua.

### **5.1.1 Motores CA e CC**

Ambos os motores CA e CC possuem a mesma estrutura básica, mas existem diferenças e, por várias razões, o motor CC era originalmente a forma preferida de motor para aplicações ferroviárias e a maioria dos sistemas o utilizava. Hoje em dia, a moderna eletrônica de potência permitiu o uso de motores CA e, para a maioria dos novos equipamentos construídos atualmente, o motor CA é do tipo usado.

Muitas vezes, as pessoas perguntam sobre as diferenças entre os motores de CA e CC como usados em locomotivas e unidades múltiplas. Nos primórdios da tração elétrica, no início deste século, ambos os tipos foram tentados. Os limites da tecnologia na época favoreciam o motor CC. Ele forneceu a característica de torque correta para a operação da ferrovia e era razoavelmente simples de controlar.

No início dos anos 80, a eletrônica de potência havia progredido para o estágio em que o motor trifásico de CA se tornou uma alternativa séria e mais eficiente ao motor CC porque: eles são mais simples de construir, não necessitam de contatos mecânicos para funcionar (como escovas) e são mais leves que os motores CC para potência equivalente; a eletrônica moderna permite que os motores CA sejam controlados de forma eficaz para melhorar a aderência e a tração; os motores CA podem ser controlados por microprocessador a um grau delicado e podem regenerar a corrente até quase parar enquanto a regeneração CC desvanece rapidamente a baixas velocidades; eles são mais robustos e mais fáceis de manter que os motores CC.

Este tipo de motor é comumente chamado de motor assíncrono e era frequentemente chamado de motor de gaiola de esquilo devido à sua forma de projeto inicial. Os motores CA

e CC são similares quando olhados externamente, mas existem diferenças na construção, particularmente porque o motor CC tem um comutador e as escovas que o motor CA não possui.

## 5 CONCLUSÃO

A implementação da tecnologia no cotidiano não alterou apenas as relações interpessoais, como permitiu também promover grandes transformações nas empresas. Com o mercado cada vez mais competitivo, as empresas buscam oferecer produtos e serviços de qualidade, dessa forma, é necessário investir em produtos inovadores que entregam aos clientes, como também, a própria estrutura interna. Na Estrada de Ferro Campos do Jordão, por ser uma empresa da propriedade do governo do Estado de São Paulo, são encontrados empecilhos que comprometem diretamente no progresso do avanço tecnológico. Por se tratar de um órgão público, a empresa pode utilizar somente a verba fornecida pelo Estado de São Paulo. Dessa forma, para realizar a compra de determinado produto, é necessário passar por um processo de aprovação pela empresa, para que assim seja possível adquirir o produto, porém, com os cortes de orçamento, fica cada vez mais difícil aderir novos itens que possam trazer melhorias para os funcionários e para a própria empresa.

Com este trabalho foi possível conhecer as propriedades que envolvem o motor de tração, entendendo assim seus circuitos, componentes e dispositivos que auxiliam no seu funcionamento. Também foi tratado sobre sistemas e motores de tração utilizados em diferentes localidades, relatando a conveniência e explicação desses conjuntos em suas aplicações. Foram levantados a respeito dos prós e contras da aplicação da corrente contínua e alternada, tanto da sua aplicação em rede, quanto nos próprios motores, para assim, relatar suas características, para a adequação que pode trazer maiores benefícios ao sistema. Os motores de CC e CA apresentam similaridades na aparência externa, porém o diferencial é que grande parte dos MCC possuem um sistema ultrapassado, porém muito utilizado por antigas ferrovias. Já com o motor de corrente alternada, com os avanços tecnológicos foi possível cada vez mais aperfeiçoar seu sistema, gerando maiores benefícios do seu uso em automotrizes.

No caso da Estrada de Ferro Campos do Jordão, que não é capaz de oferecer um grande investimento no momento, aplicado a esse componente, o melhor a se fazer é buscar aprimorar componentes e situações que facilitem a manutenção. Como propostas futuras à empresa podem ser dadas as seguintes sugestões: melhorar o circuito de controle, implementando os outros relés, garantindo maior proteção aos motores; substituir macacos mecânicos por hidráulicos, que iriam facilitar a retirada do truque, melhorando assim a praticidade; aumentar a área da tampa de inspeção para facilitar a manutenção e, dessa forma

aumentar o acesso para visualização e facilidade para retirada dos cabos dos motores, além da praticidade para correção de erros das porta-escovas e comutador.

## REFERÊNCIAS

(Allenbach; Kaller 1995a). ALLENBACH, J. -M.; KALLER, R. **Traction électrique**. 1.ed. Laussane: Presses Universitaires Romandes, 1995. v.1. 292 p.

(Allenbach; Kaller 1995a). ALLENBACH, J. -M.; KALLER, R. **Traction électrique**. 1.ed. Laussane: Presses Universitaires Romandes, 1995. v2. 412 p.

(Martins et al, 1987). MARTINS, R. W. C. et. al. **Tração elétrica**. 1.ed. São Paulo: Nobel, 1987. v.1. 371 p.

(Martins et al, 1988). MARTINS, R. W. C. et. al. **Tração elétrica**. 1.ed. São Paulo: Nobel, 1987. v.2. 309 p.

**Primeira locomotiva com Motor Elétrico da Evolução do Motor**. Disponível em: < <http://newtec4.blogspot.com.br/2010/02/1879-primeira-locomotiva-eletrica.html/>>. Acesso em: 20/06/2018.

**The first electric motors**. Disponível em: < <http://www.oldmodels.co.uk/history/>>. Acesso em: 05/06/2018.

The Railway Technical Website. **Electric Locomotives**. Disponível em: < <http://www.railway-technical.com/trains/rolling-stock-index-1/electric-locomotives.html>>. Acesso em: 07/09/2018.

The Railway Technical Website. **Electric Traction Power**. Disponível em: < <http://www.railway-technical.com/infrastructure/electric-traction-power.htm>>. Acesso em: 04/08/2018.

The Railway Technical Website. **The Early History of the DC Traction Motor**. Disponível em: < <http://www.railway-technical.com/trains/rolling-stock-index-1/the-early-history-of-the-dc.html>>. Acesso em: 04/08/2018.

The Railway Technical Website. **Train Equipment**. Disponível em: < <http://www.railway-technical.com/trains/rolling-stock-index-1/train-equipment/>>. Acesso em: 10/19/2018.

(Steimel, 1998). STEIMEL, A. Control of the induction machine in traction. **Elektrische Bahnen**, v. 96, n. 12, p 361-369, 1998.