INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE SÃO PAULO – IFSP

ALEXANDRE VAZZOLER IGOSHEFF

FREIO A DISCO AUTOMOTIVO COM CONTROLE ELETRÔNICO PARA MELHORIA DE EFICIÊNCIA NA FRENAGEM

São Paulo - SP

2013

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SÃO PAULO – IFSP

ALEXANDRE VAZZOLER IGOSHEFF

FREIO A DISCO AUTOMOTIVO COM CONTROLE ELETRÔNICO PARA MELHORIA DE EFICIÊNCIA NA FRENAGEM

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – IFSP como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Automação e Controle de Processos.

Orientador: Prof. Dr. João Sinohara da Silva Sousa

São Paulo - SP

2013

I26 Igosheff, Alexandre Vazzoler.
Freio a disco automotivo com controle eletrônico para melhoria de eficiência na frenagem / Alexandre Vazzoler Igosheff. São Paulo: 2013.
73 p.: il., 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. João Sinohara da Silva Souza

Dissertação (Mestrado Profissional em Automação e Controle de Processos) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, IFSP, 2013.

1. Freio a disco 2. Controle 3. Eficiência de frenagem I. Igosheff, Alexandre Vazzoler II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo. III Título

CDU 681.0

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SÃO PAULO
CAMPUS SÃO PAULO
DIRETORIA GERAL DO *CAMPUS* SÃO PAULO
Coordenadoria de Registros Escolares de Pós-Graduação

ATA DE EXAME DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Nome do Programa: **Mestrado Profissional em Automação e Controle de Processos**

Nome do(a) Aluno(a) : Alexandre Vazzoler Igosheff

Nome do Orientador: Prof. Dr. João Sinohara da Silva Sousa

Nome do Co-orientador:

Título do Trabalho: "Freio a Disco Automotivo com Controle Eletrônico para Melhoria de Eficiência na Frenagem"

Abaixo o resultado de cada participante da Banca Examinadora

Nome completo dos Participantes Titulares da Banca	**Sigla da Instituição**	**Aprovado / Não Aprovado**
Prof. Dr João Sinohara da Silva Sousa – Orientador	IFSP – SPO	Aprovado.
Prof. Dr. Alexandre Simião Caporali – Membro Interno	IFSP – SPO	Aprovado
Prof. Dr. Wendell de Queiroz Lamas – Membro Externo	USP- LORENA	Aprovado
Nome completo dos Participantes Suplentes da Banca	**Sigla da Instituição**	**Aprovado / Não Aprovado**
Prof. Dr. Alexandre Brincalepe Campo – Membro Interno	IFSP - SPO	
Prof. Dr. Valdeci Donizete Gonçalves – Membro Externo	IFSP – SJC	

Considerando-o: [X] APROVADO
[ ] NÃO APROVADO

Assinaturas

Presidente da Banca

Membro Interno

Membro Externo

São Paulo, 17 de Dezembro de 2013

Observações: O aluno tem que apresentar a versão definitiva com as correções estipuladas pela banca examinadora antes de 19/01/2014.

AGRADECIMENTOS

A Deus agradeço pelo trabalho concluído.

Aos meus saudosos pais por tudo o que fizeram por mim durante as suas vidas.

A minha adorável família por toda a paciência e apoio prestado para a conclusão desse trabalho.

Ao meu orientador professor Dr. Sinohara, que foi responsável pela criação do excelente curso de mestrado no IFSP.

Ao especialista Eng. Euclides Martins Oliveira Neto pelo suporte com o programa de controle de temperatura do freio a disco implementado no LabVIEW 2011.

Ao professor Dr. Antônio Carlos Canale, por fornecer um modelo de caminhão para o Simulink.

Ao professor Me. Paulo Urbano Ávila, por fornecer dados experimentais de veículos comerciais instrumentados para testes funcionais.

Ao professor Dr. Alexandre S. Caporali, por suporte com o programa Simulink.

Ao Eng. Júlio Florez, por fornecer dados técnicos sobre falhas de campo em freios a disco de veículos comerciais.

Ao professor Me. Alexandre Pazian, por compartilhar a experiência com chassi de ônibus.

Ao Eng. Marco Arcifa, por compartilhar o seu conhecimento sobre a transferência de calor.

Finalmente ao professor Dr. Dirceu Lavoisier Graci Fernandes, por compartilhar o seu vasto conhecimento sobre freios e produção de trabalhos científicos.

“Às vezes, quando você inova, comete erros. É melhor admiti-los rapidamente e continuar a melhorar suas outras inovações.”

Steve Jobs

RESUMO

Para sobrevivência no mundo globalizado, as empresas de veículos precisam constantemente melhorar sua competitividade, tanto em termos de aprimoramento tecnológico quanto para atender exigências em termos de segurança, custo e qualidade. Com relação aos sistemas de frenagem, pode-se constatar que ainda existem certas fragilidades nos freios dos veículos automotores dos dias de hoje. Essas fragilidades ficam expostas pela simples observância das inúmeras áreas de escape em serras e também pelos inúmeros acidentes causados por ineficiência no sistema de freio dos veículos. Assim, esse trabalho apresenta a proposição e desenvolvimento de um protótipo de sistema de freio a disco para testes, integração de controle eletrônico de temperatura e eliminação de filme de água nos discos para melhorar a eficiência dos freios e consequentemente, para maior segurança na condução de veículos automotores. O sistema de frenagem proposto deve ser facilmente integrável à eletrônica embarcada e à rede de comunicação dos veículos atuais. O projeto também apresenta possibilidades de aprimoramento de recursos para auxiliar a manutenção veicular preventiva e também para ser utilizado como ferramenta no próprio desenvolvimento de novos produtos. É interessante estabelecer que, embora a eletrônica embarcada tenha evoluído muito no decorrer dos anos, as soluções integradas para os freios não têm sido, até o momento, enfoque primordial entre os fabricantes de veículos. Nesse sentido, esse trabalho propõe soluções bastante práticas e promissoras para implantação nos veículos contemporâneos. Uma bancada de teste de freio a disco permitirá a execução de experimentos para a redução de temperatura e a remoção de água, onde uma simulação de comunicação em rede CAN permitirá diversas opções de controle.

Palavras-chave: CAN, controle eletrônico, freio a Disco, temperatura, veículos.

ABSTRACT

For survival in the globalized world, companies of vehicles need to constantly improve their competitiveness, both in terms of technological improvement and to meet requirements in terms of safety, cost and quality. With regard to braking systems, is possible to see that there are still certain weaknesses in the brakes of motorized today´s vehicles. These weaknesses are exposed by the simple observance of numerous escape areas in the mountains and also by numerous accidents caused by inefficiency in the vehicles brake systems. Thus, this work presents the proposition and development of a prototype for disc brake system tests, integration of electronic temperature control and elimination of water film on the discs to improve efficiency of the brakes and, consequently, to greater safety in driving motor vehicles. The proposed braking system must be easily integrable into electronics and communication network of current vehicles. The project also offers possibilities for enhancement of resources to assist the preventive and vehicular maintenance also to be used as a tool in the development of new products. Is interesting to establish that while electronics have developed a lot over the years, the integrated solutions for brakes have not been so far, primary focus among vehicle manufacturers. In this sense, this paper proposes practical and promising solutions for deployment in contemporary vehicles. A disc brake workbench will be the prototype for temperature reduction and water elimination testing as well as a CAN simulation for different controls proposals.

Keywords: CAN, disc brake, electronic control, temperature, vehicles

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-Área de escape da rodovia Anchieta. 18
Figura 2-Módulos eletrônicos em rede. 20
Figura 3-Maybach e suas diversas unidades de controle. 21
Figura 4-Pacote de dados de uma rede CAN.....22
Figura 5-Transmissão de informação pela rede 23
Figura 6-Arquitetura de módulos em rede. 25
Figura 7-Componentes de módulo eletrônico.....26
Figura 8- Automóvel com eletrônica embarcada para trazer conforto e segurança ao condutor. 27
Figura 9-Detalhe de um NTC instalado no motor e a sua curva característica. 28
Figura 10-Reflexão difusa em superfície irregular. 29
Figura 11-Representação de termopares associados. 30
Figura 12-Semicondutores n e p associados em um elemento térmico. 31
Figura 13-Elemento Peltier aplicado em sistema de arrefecimento. 32
Figura 14-Blocos de um controlador PID com malha fechada no domínio da frequência.....34
Figura 15-Sistema de freio automotivo. 35
Figura 16-Desenho de freio a disco em corte.....37
Figura 17-Freio a disco ventilado montado no eixo de tração de um ônibus rodoviário, sem a roda interna. 38
Figura 18-Discos ventilados de locomotiva. 39
Figura 19-Freio com alta temperautra de operação, em veículo de corrida. 41
Figura 20-Comportamento de um veículo freando. 45
Figura 21-Força tangencial e força normal no momento da frenagem. 46
Figura 22-Passagem de ar pelo interior de um disco de freio ventilado. 48
Figura 23-Curvas de aumento de temperatura do freio e pneus traseiros de caminhão. 49
Figura 24-Análise termográfica de rotor de freio a disco. 51
Figura 25-Ford Mustang com um kit esportivo para freios. 52
Figura 26-Defletores de ar para freios a disco. 53

Figura 27-Tomada de ar para freio de veículo Ferrari da Fórmula 1. 54
Figura 28-Experimento com o início do Fading com a temperatura ao redor de 200℃. 55
Figura 29-Freio a disco de ônibus rodoviário, com falhas devido ao auperaquecimento. 56
Figura 30-Freio de caminhão com a presença de trincas por superaquecimento. 57
Figura 31-Sistema básico de controle de freio. 58
Figura 32-Modelo de controlador nebuloso para freio. 59
Figura 33-Modelo geral de controlador genético adaptativo para freio. 59
Figura 34-Diagrama de blocos do protótipo de freio com controle de temperatura. 61
Figura 35-Protótipo de freio com controle de temperatura. 62
Figura 36-Exemplo de uma montagem de tubulação para a ventilação forçada em freio a disco de automóvel. 63
Figura 37-Diagrama de componentes do módulo de aquisição e controle. 65
Figura 38-NI myDAQ instalado no protótipo de freio com controle de temperatura. 66
Figura 39-Sensor óptico de rotação, do fabricante Balluff. 67
Figura 40-Sensor de rotação montado sobre base de isopor no suporte do eixo de tração. 68
Figura 41-Polia do eixo de tração com quatro raios marcados para o sensor de rotação. 68
Figura 42-Amplificador transistorizado para ligar e desligar o ventilador centrífugo a partir de saída digital D0 do myDAQ. 69
Figura 43-Termistor na pinça de freio do protótipo e detalhe de conexão com o myDAQ. 70
Figura 44-Ventilador centrífugo com vazão de 10 L/s, controlado pelo myDAQ. 71
Figura 45-Diagrama elétrico do protótipo de freio com controle de temperatura. 72
Figura 46-Diagrama em blocos do programa LabVIEW utilizado no protótipo. 73
Figura 47-Painel de controle do VI do protótipo de freio a disco com controle de temperatura. 74
Figura 48-Rotina do LabVIEW para aquisição de temperatura à partir de um termistor de 10 kΩ, montado na pinça de freio e conectado ao myDAQ, utilizando o polinômio de Steinhart-Hart. 75

Figura 49-Rotina do registrador de dados para a criação de arquivos texto, com as informações de tempo, temperatura e rotação. 76
Figura 50-Rotina de conversão de pulsos elétricos por rotação da polia do eixo..... 77
Figura 51-Disco de freio com presença de água em sua superfície..... 78
Figura 52-Sensor infravermelho de chuva. 79
Figura 53-Transceptor CAN de alta velocidade da Philips, modelo TJA 1050. 80
Figura 54-Curva de freio com e sem refrigeração líquida por Peltier. 81
Figura 55-Pastilha de um elemento Peltier colocada sobre a pinça de freio. 82
Figura 56- Gráficos de rotação e temperatura do protótipo no primeiro teste de funcionamento. 83
Figura 57-Gráficos gerados a partir de dados do registrador do LabVIEW, durante a execução da rotina de controle de temperatura do protótipo de freio a disco. 84
Figura 58-Controlador de temperatura aplicado ao protótipo, com dados de julho de 2013. 85
Figura 59-Início da eletrônica embarcada. 94
Figura 60-Módulo de gestão do motor flexível (bicombustível) de automóvel Volkswagen. 97
Figura 61-Blocos de Simulink do modelo de freio de caminhão. 98
Figura 62-Curva de aumento de temperatura do modelo do Simulink. 98

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

℃	Grau Celsius
ABS	*Antiblockiersystem (alemão), Antilock Braking System* (Sistema de freio antitravamento)
AMR	Regulagem de torque de tração
ASR	*Antriebs-Schlupf-Regelung (alemão), Anti-Slip Regulation* (Sistema de controle antiescorregamento das rodas)
btu	*British Thermal Unit* (Unidade térmica britânica)
CAN	*Controller Area Network* (Rede embarcada de módulos de controle)
CBS	*Combined Brake System* (Sistema de freio combinado)
DMM	*Digital Multimeter* (multímetro digital)
ECU	*Electronic Control Unit* (Unidade de controle eletrônico)
EDC	*Electronic Diesel Control* (Controle eletrônico de motor Diesel)
EEPROM	*Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory*
EGAS	Acelerador eletrônico
ESP	*Electronic Stability Program* (Programa eletrônico de estabilidade)
GMA	Momento de guinada
GPS	*Global Positioning System* (Sistema de posicionamento global)
h	Hora
hp	*Horse Power* (Unidade de medida de potência)
IHM	*Interface* Homem Máquina
kg	Quilograma
km	Quilômetro
LabVIEW	*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*
LED	Diodo Emissor de Luz
LIN	*Local Interconnect Network* (Rede local de atuadores e sensores)

LSI	*Large Scale Integration* (Integração eletrônica em larga escala)
NTC	*Negative Thermal Coefficient*
OEM	*Original Equipment Manufacturer* (Fabricante original do equipamento)
PID	*Proportional Integral and Diferential controller* (Controlador proporcional, integral e diferencial)
ROM	*Read Only Memory* (Memória de leitura)
RPM	Rotações por minuto
RTOS	*Real Time OS* (Sistema operacional em tempo real)
SAE	*Societyof Automotive Engineers* (Sociedade dos engenheiros automotivos)
SBC	*Sensotronic Brake Control* (Controle eletrônico de freio)
SMD	*Surface Montage Devices* (Dispositivos eletrônicos para montagem em superfície)
SP	*Set Point*
UCE	Unidades de Controle Eletrônico
UCP	Unidade central de processamento
VI	*Virtual Instrument* (instrumento virtual do LabVIEW ™)
WiFi	*Wirelêss Fidelity* (Fidelidade de transmissão de dados sem fio)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 15
1.2 Objetivo 16
1.3 Organização do trabalho 17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 18
2.1 Evolução da eletrônica embarcada 19
2.1.1 Rede CAN 20
2.2 Sensores e atuadores 27
2.2.1 Sensor de temperatura 27
2.2.2 Sensor óptico 28
2.2.3 Elemento Peltier 29
2.3 Controlador proporcional, integral e derivativo (PID) 32
2.4 Teoria de freios 35
3 PROPOSIÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO PARA O TESTE DE MELHORIA DE EFICIÊNCIA DE SISTEMA DE FREIO DE VEÍCULO AUTOMOTOR 58
3.1 Funcionamento básico do sistema 62
3.2 Equipamentos e Programa de Controle e Registro de Dados 64
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 83
5 CONCLUSÃO 88
5.1 Sugestões para trabalhos futuros 88
REFERÊNCIAS 90
APÊNDICE A - LINHA DE TEMPO DA ELETRÔNICA EMBARCADA 94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fração de dados registrados 86

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 27
Equação 2 33
Equação 3 33
Equação 4 33
Equação 5 34
Equação 6 41
Equação 7 42
Equação 8 42
Equação 9 45
Equação 10 45
Equação 11 46
Equação 12 47
Equação 13 49
Equação 14 50
Equação 15 50

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação e relevância do trabalho

A competitividade e sobrevivência das empresas ligadas direta e indiretamente ao ramo automobilístico é de suma importância para o país, pois representa um dos maiores setores da atividade econômica nacional. Para sobrevivência no mundo globalizado, as empresas de veículos precisam constantemente melhorar sua competitividade, tanto em termos de aprimoramento tecnológico quanto para atender exigências em termos de segurança, custo e qualidade. Um veículo automotor é composto por uma determinada quantidade de subsistemas complexos, como por exemplo, motor, transmissão, chassi e freios.

Esses subsistemas do trem de força são estruturados por componentes mecânicos, hidráulicos e elétricos, que interagem entre si para propiciar a mobilidade.

Inicialmente um veículo automotor foi concebido com funções implementadas por componentes sem inteligência eletrônica, que possuíam limitações quanto às funções de segurança, conforto, emissões, flexibilidade e diagnose. Com o advento dos dispositivos da microeletrônica e das tecnologias de sistemas embarcados, a utilização dos sistemas computacionais nos sistemas automotivos foi motivada pelos próprios requisitos do mercado, pelas legislações de redução de poluentes e segurança na condução. Pode-se verificar que os benefícios da eletroeletrônica tendem a melhorar vários domínios da cadeia de um complexo sistema automotivo dos dias de hoje, pois ainda existe muito para se explorar, como por exemplo, na segurança veicular. A tendência para os carros do amanhã será a tomada de decisão, onde os comandos e atos do motorista poderão ser ou não, aceitos pelo próprio veículo. Santos (2010) afirma que existe uma quantidade enorme de aplicações eletrônicas para o gerenciamento dos propulsores e a conectividade embarcada, mas pouco ainda se desenvolveu para o gerenciamento dos sistemas de freios e esse será o foco principal desse trabalho.

Com relação aos sistemas de frenagem, pode-se constatar que ainda existem certas fragilidades nos freios dos veículos automotores dos dias de hoje. Essas fragilidades ficam expostas pela simples observância das inúmeras áreas de escape

em serras e também pelos inúmeros acidentes causados por ineficiência no sistema de freio dos veículos. Nesse quesito ligado à segurança, irá se perceber como o controle eletrônico do freio a disco poderá melhorar a eficiência da frenagem veicular nas situações mais adversas.

Nos veículos comerciais podem-se encontrar recursos tecnológicos como freio auxiliar por bloqueio do fluxo de gases de escape, ou retardadores, que restringem o movimento do eixo cardam para desacelerar o veículo, mas isso tudo pode não ser tão eficiente se os freios estiverem superaquecidos.

A redução de atrito nos discos de freio automotivo pode causar graves acidentes para os ocupantes de um veículo, ou terceiros, dependo de quantos veículos podem estar envolvidos, as suas cargas e velocidades. Shigley et al (2008) afirmam que apenas uma ligeira mudança no coeficiente de atrito causará uma grande alteração na força de pedal requerida para frenagem. Uma redução na ordem de 30 % nesse coeficiente, devido a uma mudança de temperatura ou nível de umidade, por exemplo, pode resultar em uma necessidade de aumento de 50 % da força no pedal para se obter o mesmo torque de frenagem em condições normais.

1.2 Objetivo

Esse trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento de um protótipo para a realização de testes práticos, visando a proposição de melhores soluções tecnológicas que possam ser facilmente integradas à eletrônica embarcada de veículos automotores, para à melhoria da segurança por meio da maior eficiência do sistema de frenagem. Os dois aspectos principais priorizados no trabalho, quanto à melhoria da eficiência da frenagem, foram o problema de superaquecimento e da eliminação do filme de água no sistema.

De maneira geral o trabalho procura responder às seguintes demandas:

- É possível a aprimorar tecnicamente o sistema de frenagem presente nos veículos comerciais e de passeio?
- A solução pode ser facilmente integrada na eletrônica embarcada presente nos veículos atuais?

- Pode haver melhoria da segurança a partir da emissão de sinais de alarme para o condutor?
- Pode-se ter um levantamento de informações históricas da utilização dos freios?

Um superaquecimento do sistema de freio a disco pode ser contido com a atuação de uma ventilação direcionada, que irá propiciar uma vazão de ar distribuída pelas superfícies dos discos, independentemente da carga transportada ou da velocidade em que se desloca o veículo. Uma vantagem extra desse sistema será uma segunda função que pode ser aproveitada para trazer ainda mais segurança ao veículo e aos seus ocupantes, fato que o fluxo de ar direcionado também pode ser utilizado em dias de chuva, trazendo uma melhoria da eficiência de frenagem pela remoção do filme de água entre o disco e as pastilhas de cada roda, evitando assim o efeito lubrificante da água nas frações de segundos, em que normalmente as pastilhas levam para estarem de fato em contato direto com as superfícies do disco.

1.3 Organização do trabalho

O capítulo 2 consiste da fundamentação teórica pela revisão bibliográfica, análise de documentos, casos de montadoras de automóveis e pesquisa com profissionais do ramo automotivo. Será focada a evolução da eletrônica embarcada em veículos, as tecnologias utilizadas e os conceitos sobre frenagem mais utilizados.

No capítulo 3 será apresentada a concepção e funcionamento do protótipo para experimentação do controle eletrônico para a melhoria de eficiência do freio a disco, cada componente será apresentado em detalhes, com a sua interconexão no sistema.

O capitulo 4 mostrará os resultados dos experimentos com o protótipo e a análise dos mesmos, propiciando a conclusão do trabalho de pesquisa.

Na última parte desse trabalho, a conclusão, será apresentada, assim como, as sugestões para trabalhos futuros, de forma a se continuar essa pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capitulo será analisada a eletrônica automotiva, com as suas mais diversas aplicações, os seus componentes periféricos, a conectividade na forma de redes de unidades de controle e ainda entender como funcionam os sensores e atuadores utilizados no estudo de caso.

Não menos importante, será analisado como funciona o freio, os seus componentes e características, explorando os conceitos teóricos de atrito, geração de calor, os tipos de freios, mecanismos atuadores, além dos importantes casos de falhas desse sistema, que são realidades na operação veicular.

Pode-se ver na figura 1, que em rodovias como a Anchieta em São Paulo, essa que possui um constante fluxo de descida de serra no sentido do litoral devido ao porto de Santos, foram implantadas áreas de escape para os caminhões, devido a possibilidade real de falhas dos freios, podendo gerar acidentes de graves proporções.

Figura 1-Área de escape da rodovia Anchieta.

Fonte: Google mapas (acesso em Outubro de 2013)

2.1 Evolução da eletrônica embarcada

Segundo Anjos (2011) o uso de eletrônica nos automóveis tem revolucionado a aplicabilidade e a cobertura de muitos opcionais e funções oferecidas aos consumidores. Essa revolução na eletrônica automotiva tem melhorado significativamente o desempenho, a confiabilidade e o conforto nos automóveis. Em muitos casos, a eletrônica empregada também simplificou a fabricação de muitos componentes e a montagem dos veículos pelas montadoras. No entanto, todo o potencial da eletrônica em auxiliar esses processos de fabricação e de melhorar a vida dos consumidores ainda está a ser totalmente explorado. À medida que a tecnologia avança, existe cada vez mais uma fusão entre os componentes eletrônicos e os mecânicos/mecatrônicos tradicionais que tornarão, no futuro, a montagem dos veículos mais eficiente e mais segura para toda a indústria.

Os primeiros automóveis fabricados tinham seus componentes elétricos interligados por meio de fios comuns de cobre e não utilizavam ainda o conceito de circuitos separados e independentes, visto a baixa quantidade de componentes do sistema elétrico do veículo automotor da época. Com o aumento do número de componentes eletrônicos em um veículo, a consequência foi o aumento também no número de componentes eletrônicos em um veículo, a consequência foi o aumento também do número de interligações necessárias para conectar todo esse novo volume. Porém, ao invés de evoluir para a produção automatizada, os chicotes elétricos continuam a serem fabricados manualmente e aparentemente, essa situação vai durar ainda muito tempo, segundo especialistas. Como há vários processos envolvidos, desde a definição do chicote, seu tamanho até a confecção final, a produção manual ainda é mais barata.

A bateria é outro item indispensável ao sistema elétrico em si, a bateria não apresentou significativas mudanças no decorrer dos anos, se compararmos aos demais componentes do sistema embarcado. A principal evolução, além dos materiais adotados, foi a tensão de alimentação, onde as primeiras baterias tinham tensão de 6 Volts, passando para 12 Volts, alguns protótipos foram construídos com 42 Volts e os veículos híbridos atuais operam com 300 Volts por bateria. A evolução das baterias também foi marcada pela larga utilização de eletrólito de ácido sulfúrico

e nos dias de hoje os híbridos possuem baterias de níquel-metal hidreto, níquel-cobalto-alumínio ou ainda íons de lítio. Com a crescente instalação de mais e mais módulos de controle nos veículos automotores, as baterias também precisaram evoluir.

2.1.1 Rede CAN

Em 1986 a Robert Bosch apresentou um protocolo de rede para a comunicação de unidades de controle embarcadas em automóveis, chamada de rede de unidades de controle (CAN). A rede CAN tornou-se um padrão internacional (ISO 11898) em 1994, foi especialmente desenvolvida para a rápida troca de dados entre controladores eletrônicos em veículos motorizados e também propiciar uma redução na quantidade de cabos e sensores nos veículos modernos. Conforme Santos (2010), pode-se considerar o domínio do veículo, como um sistema computacional embarcado automotivo, composto por uma grande quantidade de módulos eletrônicos de controle que são vistos nos exemplos das figuras 2 e 3, que tem a capacidade de gerenciar diversas funções, como o freio *Antilock Braking System* (ABS) visível na figura 2, mobilidade de cruzeiro, transmissão automática, climatização, emissões, estabilidade, entre outras.

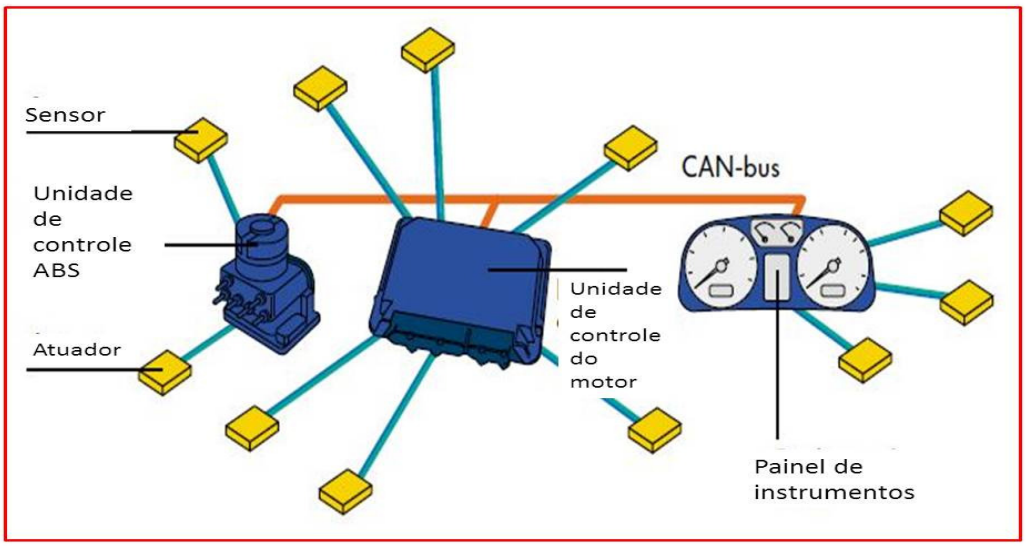

Figura 2-Módulos eletrônicos em rede.

Fonte: Apostila Volkswagen (2010)

Da mesma forma, como na arquitetura de um computador pessoal, um sistema computacional automotivo é basicamente estruturado por Unidades de Controle Eletrônico (UCE), usualmente *Electronic Control Units* – ECU, compostas de processadores, memórias e unidades internas de entradas e saídas. Uma UCE interage com o ambiente externo captando grandezas físicas, como temperatura, pressão, vazão, posição, velocidade, torque, entre outras, por meio de sensores, ou ainda acionando válvulas solenoide, motores de passo e outros atuadores (transdutores), usando como suprimento de energia a bateria e o alternador do veículo.

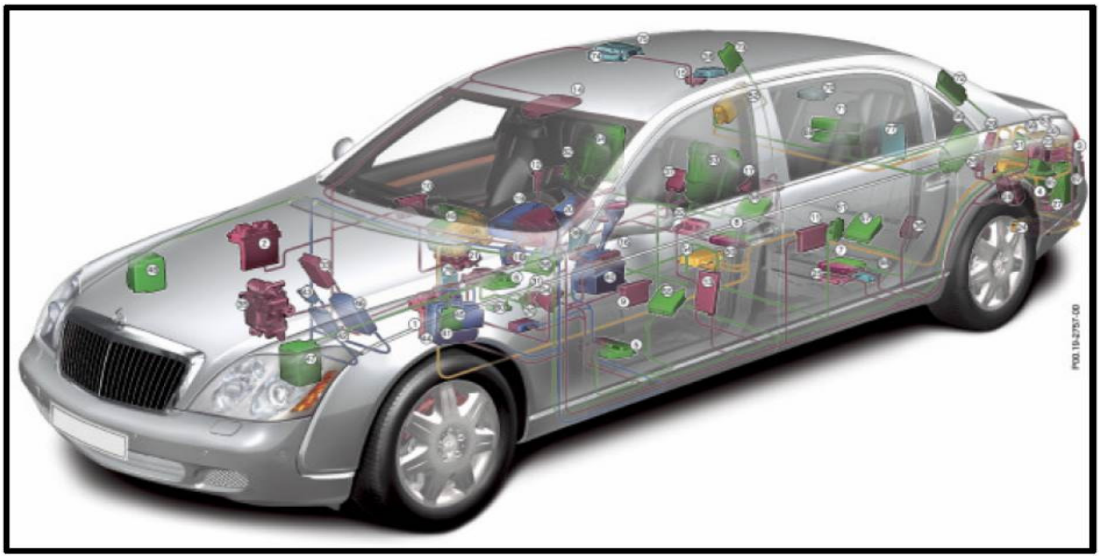

Figura 3-Maybach e suas diversas unidades de controle.

Fonte: Apostila Mercedes-Benz (2003)

Conforme Santos (2010), a evolução da tecnologia de microcontroladores, redes de comunicação e computação distribuída motivou a aplicação de tecnologias de sistemas embarcados distribuídas em automóveis, visando à otimização em tempo e custo no processo de desenvolvimento e facilidade de criação e distribuição de novas funções no domínio automotivo. Esse cenário evolutivo impulsionou o desenvolvimento e o emprego de novas tecnologias e ferramentas de desenvolvimento, diagnóstico e manutenção, agregando novos profissionais das áreas de eletrônica e computação, como parceiros de um mercado automotivo dinâmico e inovador. A tecnologia de sistemas embarcados automotivos motivou a aplicação de funções com uma arquitetura de computação distribuída, considerando,

ainda que tecnologias de tolerância a falhas sejam inerentemente aplicadas devido à criticidade de uma aplicação automotiva. As UCEs compostas de funções específicas que se comunicam entre si são distribuídas e interconectadas próximas às grandezas físicas de um automóvel, motivando a redução de cabeamento e conectores, e interligadas por um barramento de comunicação, onde transmitem informações, conforme a figura 4 apresenta, em forma de pacote de dados, nas tarefas executadas pelas UCEs.

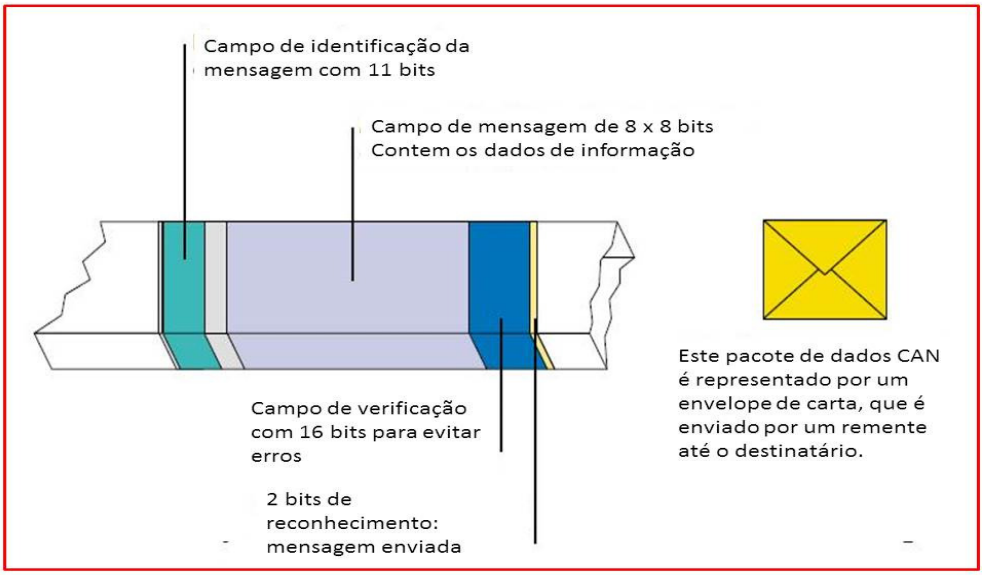

Figura 4-Pacote de dados de uma rede CAN

Fonte: Apostila Volkswagen (2010)

Guimarães (2007) descreve os sistemas automotivos atuais como implementadores de diversos dispositivos eletroeletrônicos capazes de suportar uma grande quantidade de funções perceptíveis ao motorista e passageiros, tais como: sistemas de ar-condicionado por zonas de conforto, automático e com prioridade ao deslocamento do veículo (desligando-se automaticamente em ultrapassagens), navegação inteligente, sistemas integrados de multimídia, conectividade, controle de frota, redução de emissões e funções que facilitam o diagnóstico e a manutenção do veículo, controle de tráfego, rastreamento, segurança, qualquer função por fio como direção elétrica, acelerador eletrônico, freio eletrônico, transmissão com gerenciamento eletrônico, etc. Para o gerenciamento dos diversos componentes e funções de um sistema automotivo, o sistema embarcado distribuído é composto de uma estrutura em camadas com uma UCP, um sistema operacional que tende a ter

propriedades de tempo real (*Real Time Operating Systems* - RTOS) cuja função consiste em gerenciar os recursos computacionais e interfacear com os requisitos das aplicações implementadas com tecnologias, que visam suportar os diversos controles em um automóvel. Dessa forma a arquitetura de computação distribuída consiste de várias UCEs interligadas através de canais de comunicação (CAN), que se diferenciam entre si quanto às demandas solicitadas pelas aplicações. É preciso salientar que o gerenciamento da base de dados, considerando aquisição, processamento e atuação de sinais, conforme a figura 5, é uma característica importante para aplicações automotivas que possuem funções com propriedades de tempo real, consistência de dados e tolerância a falhas, as quais podem comprometer a funcionalidade e a segurança do sistema a controlar. Para que uma arquitetura distribuída possa executar as funções automotivas de acordo com o especificado, as UCEs devem ser conectadas por meio de um barramento de comunicação e as tarefas realizam transações com uma base de dados de forma segura e confiável, comunicando-se pela passagem de mensagens. Nota-se também que aspectos relativos a transações em uma base de dados podem ser refletidos nas redes de comunicações de acordo com os tipos de sinais que elas suportam. Como verificado anteriormente, um bom exemplo de arquitetura em blocos para UCE automotiva mostra a mesma conectada às saídas, que são os atuadores e às entradas, que são os sensores.

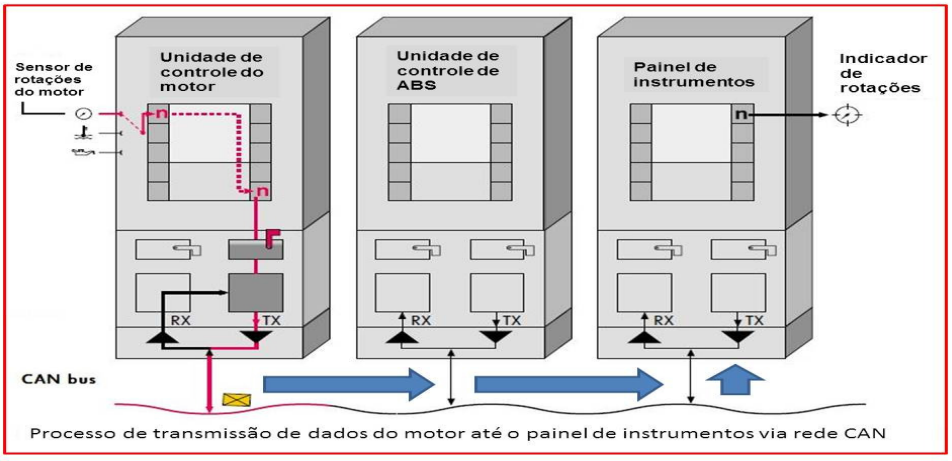

Figura 5-Transmissão de informação pela rede

Fonte: Apostila Volkswagen (2010)

Segundo Guimarães (2007), é importante salientar que a inserção de novas funções automotivas motiva a utilização de UCEs interconectadas, apresentando uma arquitetura de computação distribuída, aumentando assim, o grau de complexidade para o sistema de controle e gerenciamento global. Considerando-se então que os sistemas automotivos apresentam uma crescente evolução de inovações tecnológicas motivadas pelo uso de sistemas eletrônicos, a aplicação de sistemas eletrônicos deverá ser cuidadosamente analisada, para evitarem-se os possíveis danos aos sistemas mecânicos que serão controlados, visto que o excesso de eletrônica também pode ser prejudicial e gerar riscos de acidentes.

Pode-se considerar que o estado atual dos sistemas eletrônicos empregados nos sistemas automotivos consiste em quatro partes principais (não sendo unânimes nessa classificação e dependente da característica OEM) que são a eletrônica da carroçaria, sistemas eletrônicos de gerenciamento mecatrônico, redes de comunicação e sensores inteligentes. Um sistema de freio eletrônico pode permitir a medição e o controle da pressão de frenagem e cada roda pode ser independentemente controlada, como no caso do *Sensotronic Brake Control* (SBC).

Por meio do controle eletrônico de freio, é possível dosar as proporções de frenagem entre a frente e traseira, assim como das laterais de um veículo, independentemente e assim evitando o efeito de “mergulho” ou a perda de estabilidade, que são consideradas falhas e podem causar acidentes. Esse sistema de freio não tem um servo-freio, mas sim conta com a presença de um motor elétrico e um reservatório de pressão hidráulica, o pedal de freio passa a ter um sensor eletrônico do tipo Hall, para detectar o deslocamento mecânico do pedal em uma necessidade de frenagem do veículo. Devido a esse tipo de configuração, as vibrações existentes quando a função ABS é ativada, não são mais sentidas no pé do condutor do veículo.

As funções de ABS, *Anti-Slip Regulation* (ASR) e *Electronic Stability Program* (ESP) são todas integradas em uma unidade eletrônica de controle de freio, como se pode ver na arquitetura eletrônica do veículo Classe C, ilustrado na figura 6, essa rede é uma das mais complexas já embarcadas em um único veículo, é dividida em CAN C (rede de alta velocidade), CAN B (rede de média velocidade) e CAN D (rede de diagnose veicular).

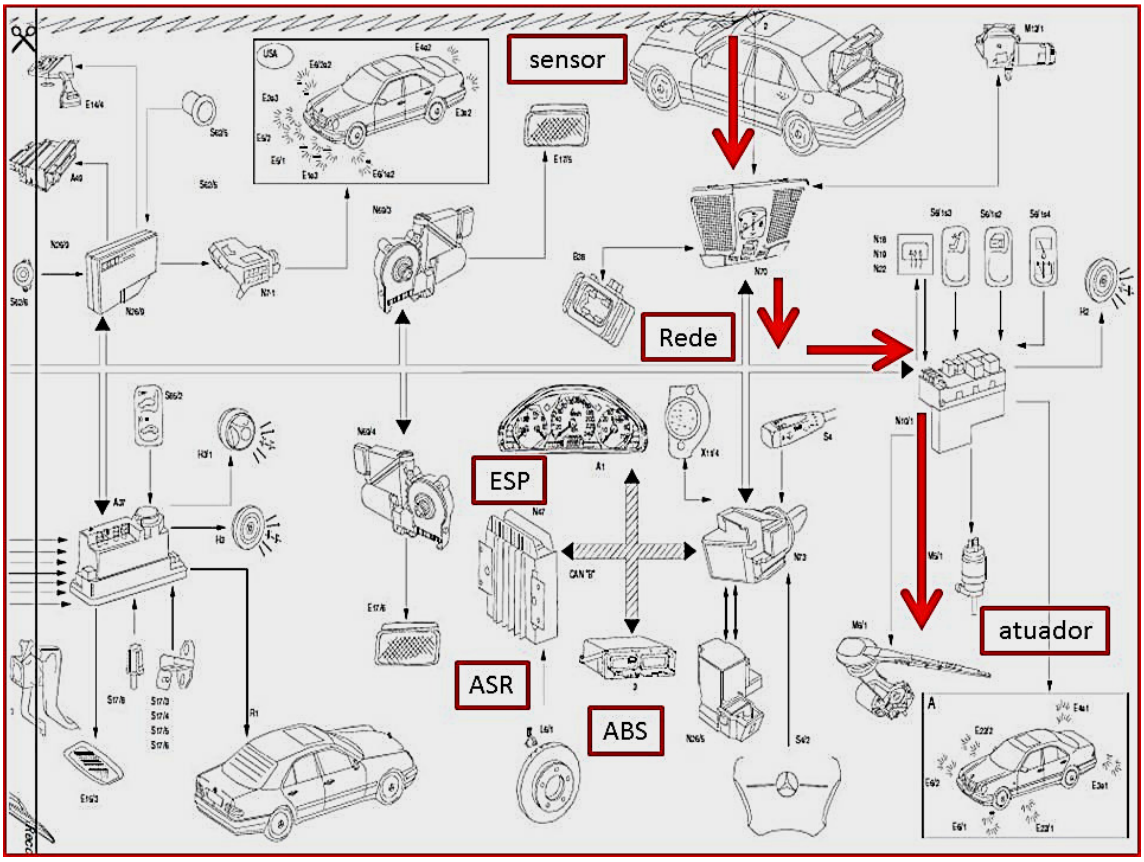

Figura 6-Arquitetura de módulos em rede.

Fonte: Apostila Mercedes-Benz (2003, p.7)

O sistema de freio passa a ter inteligência que lhe permite, por exemplo, uma rotina de checagem de todos os sensores e atuadores no momento em que se abre a porta do veículo, qualquer falha é denunciada pelo sistema, podendo até inibir a partida do veículo para garantir a segurança dos ocupantes e tudo isto graças à integração propiciada pela rede CAN.

Na figura 7, pode-se ver uma típica unidade de controle eletrônico dos dias de hoje, ela é constituída por diversos componentes eletrônicos digitais e analógicos.

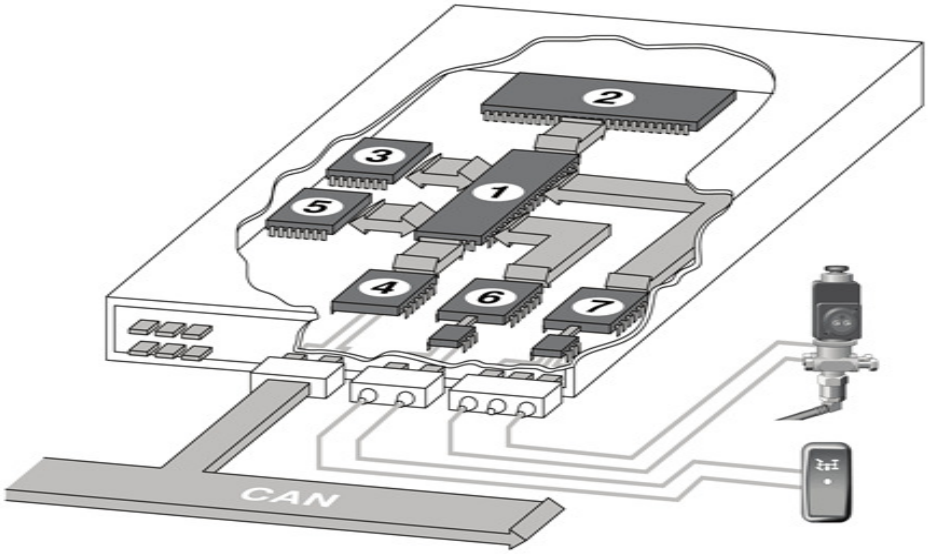

Figura 7-Componentes de módulo eletrônico.

Fonte: DaimlerChrysler (2004, p.15)

1. Microcontrolador;
2. Memória ROM;
3. Memória de falhas;
4. Interface CAN;
5. Memória de parâmetros reprogramável eletronicamente (EEPROM);
6. Conversor A/D (analógico para digital) de entrada com opto acoplador;
7. Conversor D/A (digital para analógico) de saída com driver de potência e opto acoplador.

A difícil condução de um veículo em dias de chuva ou alagamentos, conforme pode-se ver na figura 8, pode ser minimizada com a implementação de controle eletrônico e comunicação com a rede CAN, eletrônica embarcada que pode tornar a condução de um veículo muito mais segura.

Figura 8- Automóvel com eletrônica embarcada para trazer conforto e segurança ao condutor.

Fonte: Freiar (2013)

2.2 Sensores e atuadores

2.2.1 Sensor de temperatura

O sensor de temperatura NTC da figura 9 é um termistor, ou resistor térmico, onde a sua característica é reduzir a resistência elétrica conforme a temperatura aumenta (coeficiente negativo de temperatura). Esse sensor é largamente aplicado nos veículos automotores, como por exemplo, monitorar a temperatura do motor, monitorar a temperatura do ar de admissão, monitorar a temperatura de saída do ar-condicionado, monitorar a temperatura das unidades de controle eletrônico, etc. A equação 1 é o polinômio de Steinhart-Hart, obtida empiricamente, é a que melhor representa a resposta de NTCs, segundo França (2007),

$$T = \frac{1}{a+b.\ln R+c.(lnR)^3} - 273{,}15 \qquad [℃] \qquad (1)$$

R é valor de resistência Ôhmica e a, b e c são as constantes dos materiais do NTC.

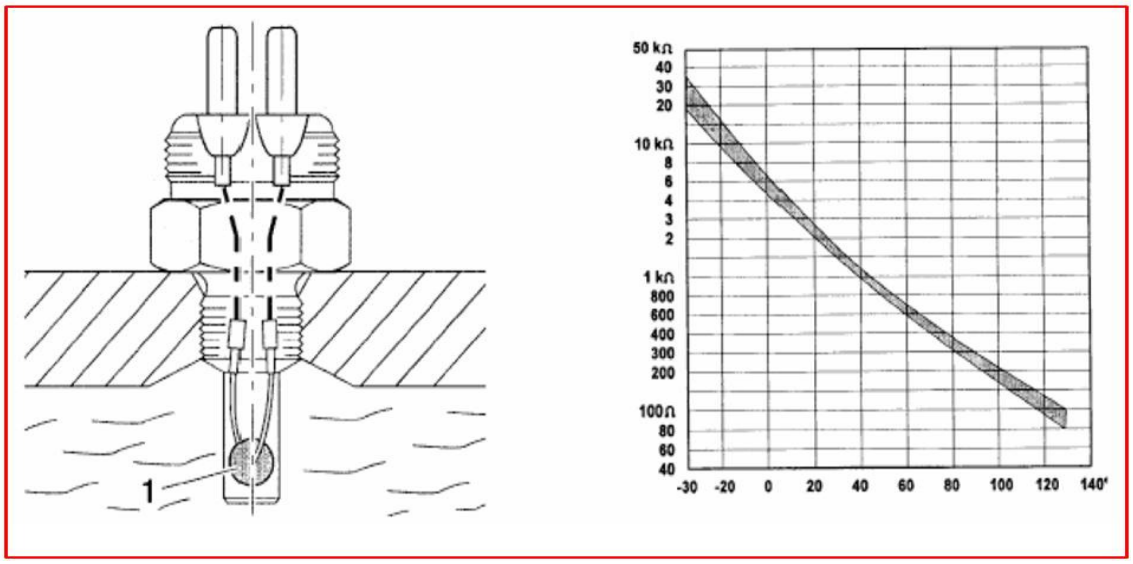

Figura 9-Detalhe de um NTC instalado no motor e a sua curva característica.

Fonte: DaimlerChrysler

2.2.2 Sensor óptico

Esse tipo de sensor é utilizado em automóveis para detectar chuva. Segundo a Balluff (2013), uma das maiores fabricantes de sensores ópticos, os sensores ópticos por reflexão difusa possuem tanto um emissor de luz infravermelha, como o receptor localizados em um só corpo. A reflexão difusa ocorre em contato com uma superfície não uniforme e rugosa, conforme apresentado na figura 10. Pode ser comparada a uma série de espelhos em miniatura, de pouca reflexão e com diferentes ângulos de orientação. A luz que incide nessa superfície, sofre grande dispersão. Quanto mais escura e quanto pior for a qualidade de acabamento da superfície, tanto maior será a perda de reflexão. O ajuste para o objeto que deve ser detectado não é crítico e não envolve qualquer dificuldade nesse tipo de sensor. Um objeto qualquer (como por exemplo, uma placa com 90% de reflexão), retorna por reflexão difusa que ocorre em sua superfície uma parte da luz que volta para o receptor. Se um objeto padrão entrar na curva de detecção, ocorre a comutação, ou seja, a alteração do sinal de saída. À distância monitorada é uma característica que varia em função da dimensão, da forma, da cor e das características da superfície do objeto que reflete o feixe. Utilizando-se um cartão Kodak com 90% de reflexão

(que corresponde aproximadamente ao papel branco), a distância do sensor pode ser de até 400 mm.

Esses sensores podem ser utilizados na detecção de movimento, presença e até rotação, conforme será visto no desenvolvimento prático desse trabalho.

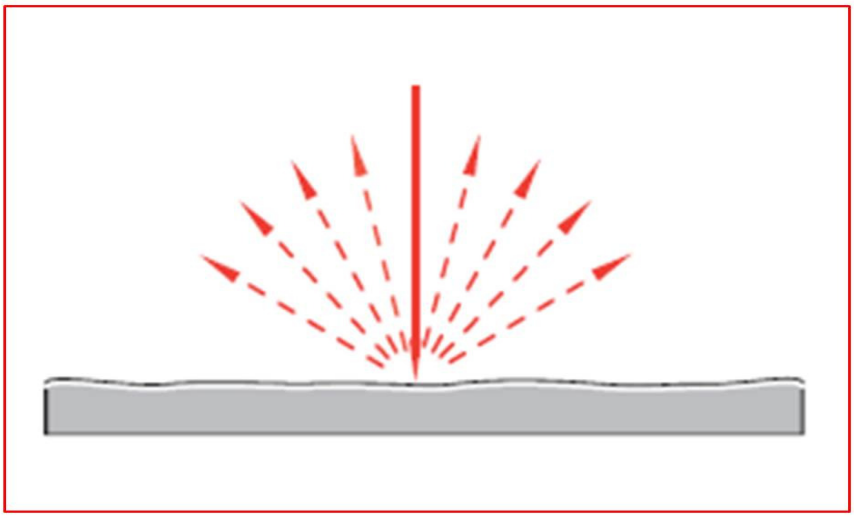

Figura 10-Reflexão difusa em superfície irregular.

Fonte: Balluff

2.2.3 Elemento Peltier

A Binder (2013) fabrica na Alemanha elementos Peltier, que é uma tecnologia de componentes atuadores termoelétricos que podem transportar o calor de um lado do dispositivo para o outro, dependendo da direção de sua corrente elétrica. Embora o princípio seja conhecido, chamado de Seebeck, similar aos termopares, podendo ser visto na figura 11. Somente os materiais semicondutores permitiram o avanço da tecnologia Peltier em que os pontos fortes dessa tecnologia são de manter a estabilidade na refrigeração, a sua fácil localização, independência, confiabilidade e controle com precisão. Além disso, elementos Peltier não possuem partes móveis, existentes nos refrigeradores convencionais, tornando-os livres de vibração e ruído. A principal vantagem sobre o compressor convencional de unidades de refrigeração é a eliminação dos fluidos refrigerantes, poluentes, inflamáveis ou nocivos. No entanto, o máximo desempenho e eficiência dos sistemas de refrigeração de Peltier

são consideravelmente mais baixos do que a dos sistemas de compressor. Com suas características particulares, a tecnologia Peltier é oportuna para um amplo espectro de aplicações especiais, mas não irá substituir compressores para aplicações tais como refrigeradores domésticos devido a sua baixa eficiência para tal função.

O menor componente de um elemento térmico é o termopar, que consiste de dois condutores elétricos com diferentes coeficientes de Seebeck para gerar a mais alta tensão termoelétrica possível.

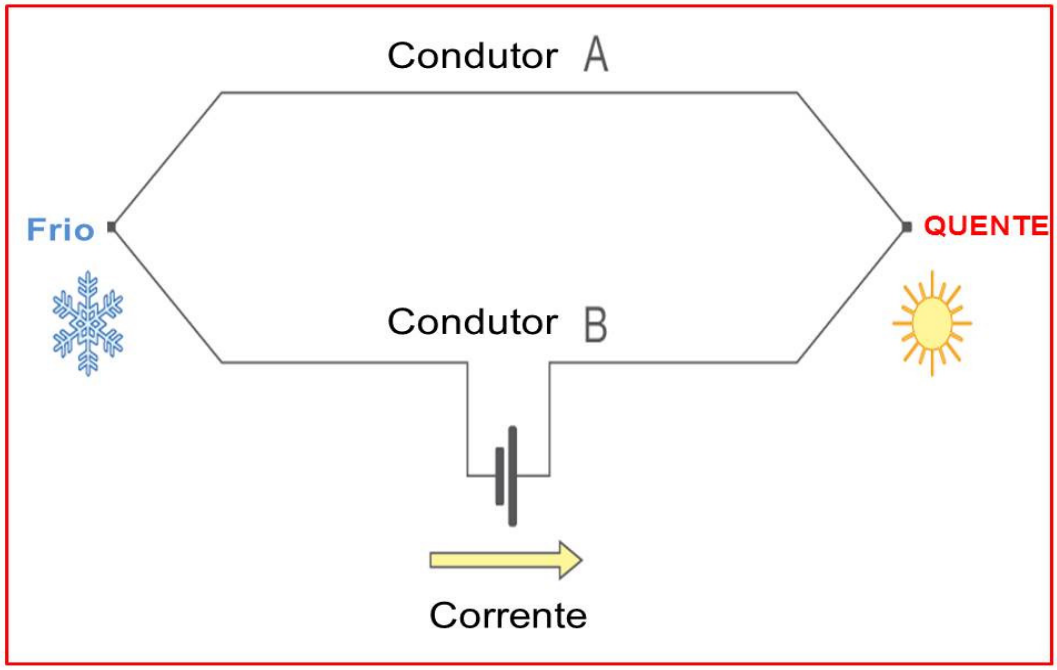

Figura 11-Representação de termopares associados.

Fonte: Binder

O material usado mais frequentemente, são blocos semicondutores conectados nas extremidades com cobre. Até agora, o material semicondutor mais adequado para aplicações de temperatura ambiente tem sido telureto de bismuto na dopagem dos semicondutores n e p (negativo e positivo), conforme a montagem da figura 12.

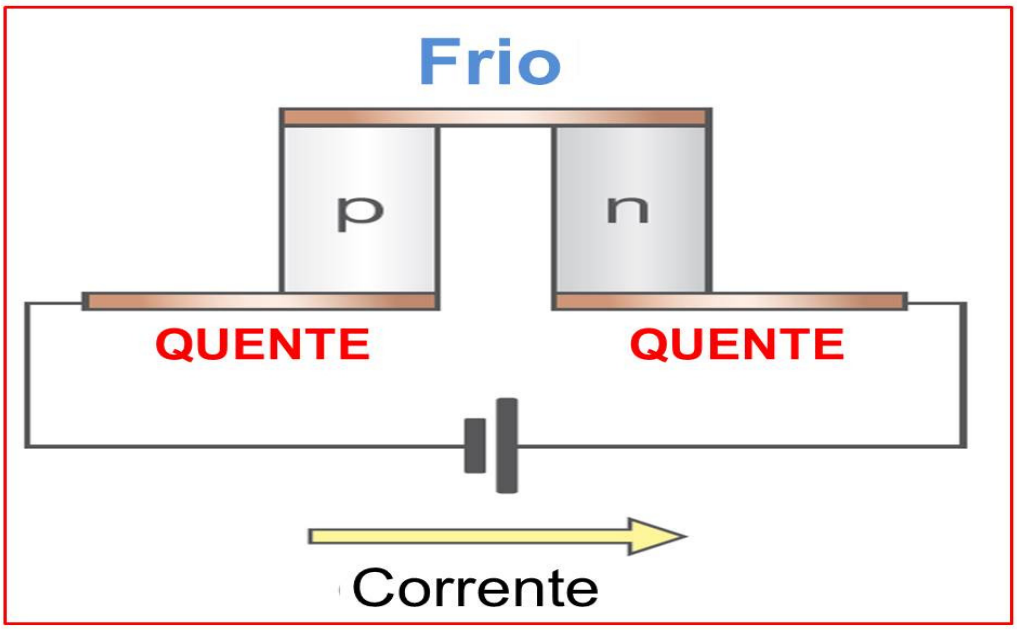

Figura 12-Semicondutores n e p associados em um elemento térmico.

Fonte: Binder

Um elemento Peltier é composto por diversos termopares conectados eletricamente em série por pontes de cobre. As pontes de cobre em cada lado, são termicamente ligadas por placas de cerâmica (normalmente óxido de alumínio), mas eletricamente isolados uns dos outros. Esses semicondutores nessa tecnologia, não são aplicados no sentido convencional tal como os diodos semicondutores. Os diodos semicondutores devem estar em contato direto para inibir o fluxo de corrente em uma direção. No elemento Peltier por outro lado, isso não é útil e os vários semicondutores são geralmente ligados por pontes metálicas. Os semicondutores são, portanto, preferencialmente utilizados nessa aplicação ao invés de outros materiais condutores,

Igosheff et al (2013) apresenta na figura 13 uma aplicação do elemento Peltier em um sistema didático de arrefecimento automotivo, onde os estudos de comportamento do arrefecimento em diversas faixas de temperatura são analisados, esse tema foi apresentado no SAI 2013 do Instituto Federal de São Paulo.

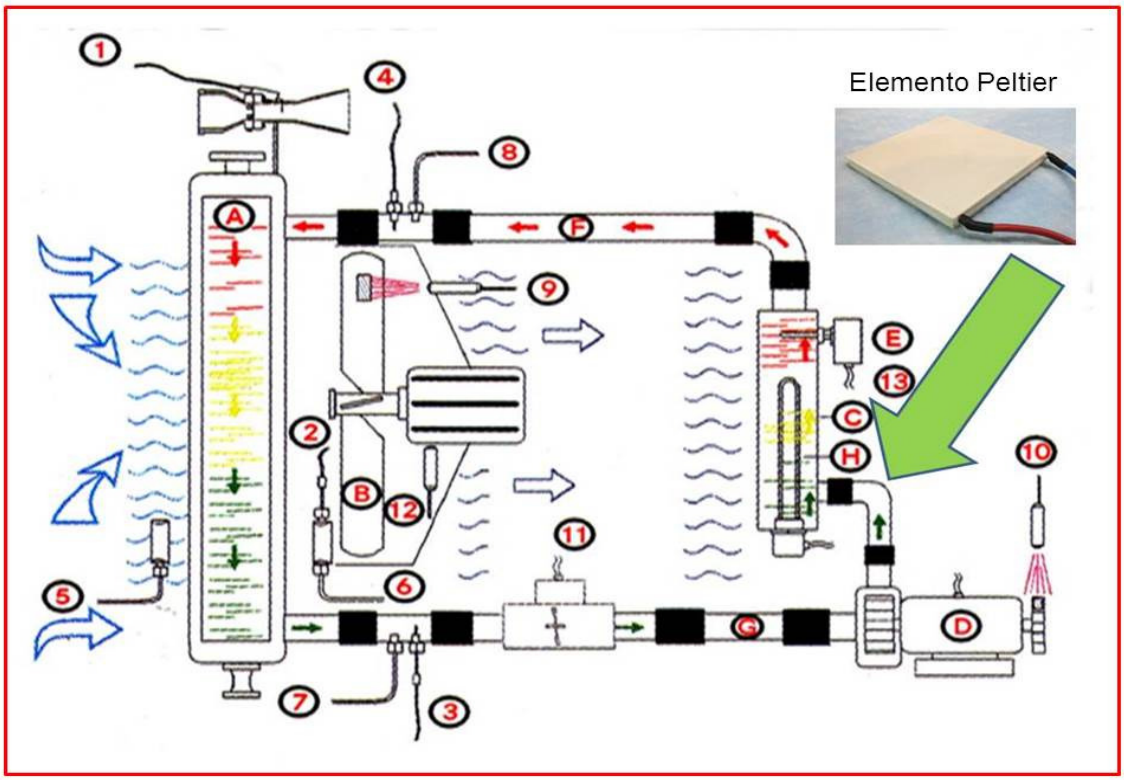

Figura 13-Elemento Peltier aplicado em sistema de arrefecimento.

Fonte: Acervo do autor

2.3 Controlador proporcional, integral e derivativo (PID)

Conforme descreve Yu (2006), um controlador proporcional, integral e derivativo consiste de três simples ações, associadas pelas letras P, I e D.

Yu (2006) utiliza um exemplo de um trocador de calor (para ser mais exato, um resfriador) aplicando esse processo de controle, onde tem-se incorporadas as três ações de controle já citadas. Um líquido quente chega até o trocador de calor, que é resfriado até uma temperatura específica, trocando calor com água gelada.

Um termopar mede a temperatura de saída, que é convertida em um sinal chamado de PV, ou variável do processo, em uma faixa de tensão entre 4 até 20 mA.

O PV é comparado com o ponto de ajuste (*Set Point* - SP) e com a saída do controlador (CO), que é gerada baseada em um algoritmo de controle. A saída do controlador é convertida em um sinal de pressão de ar para atuar em uma válvula,

dessa forma a quantidade de água gelada é ajustada de acordo com as características dessa válvula (determinada pela CO).

A realimentação gerada para o controlador é baseada em uma diferença entre SP e PV, chamada de erro (E), como visto na equação 2.

$$E(t) = SP(t) - PV(t) \quad (2)$$

O controle proporcional é executado pelo controlador chamado P, em que a saída CO é diretamente proporcional ao sinal de erro E, como se vê na equação 3.

$$CO = \text{Sinal de Polarização} + Kc\,(SP - PV) \quad (3)$$

O sinal de polarização é o valor da saída do controlador sem o erro. Isso é intuitivo e uma simples ação que é bastante similar ao comportamento humano.

Quando se está muito longe do objetivo desejado, faz-se um grande ajuste que se aproxime do mesmo, se já se está próximo, dessa forma um pequeno ajuste é feito.

Kc é chamado de ganho do controlador, um parâmetro ajustável.

O controle proporcional e integral que utiliza a letra I atua na válvula de controle da vazão de água gelada na proporção direta da integral do erro no tempo.

A resultante chama-se controlador PI e está expressa na equação 4.

$$CO = \text{Sinaldepolarização} + K_c\left[(SP - PV) + \frac{1}{\tau_I}\int (SP - PV)dt\right] \quad (4)$$

Aqui se tem um segundo parâmetro de sintonia τ_I, que é chamado de tempo de reinício ou simplesmente tempo de integração com a unidade de tempo em minutos, ou o inverso do ganho de integração. A equação do controlador PI indica que a CO irá manter-se alterando até que a diferença entre SP e PV diminua para erro zero. A ação de integração usualmente degrada a eficiência do laço de fechamento do processo de controle, ou em linguagem de controle, a integração introduz uma defasagem de 90° no laço de realimentação da malha fechada.

Yu (2006) afirma que a resposta do controlador PI é mais oscilatória no seu início de atuação, mas ainda assim 70 % das indústrias utilizam esse tipo de controlador.

O controle proporcional, integral e derivativo, incorpora a ação D, que usa a tendência da variação do processo para fazer os ajustes necessários.

A tendência do processo é estimada usando a derivada do sinal de erro em relação ao tempo. O controle PID ideal é apresentado na equação 5.

$$\mathrm{CO} = \mathrm{Sinaldepolarização} + \mathrm{K_c}\left[(\mathrm{SP}-\mathrm{PV}) + \frac{1}{\tau_\mathrm{I}}\int(\mathrm{SP}-\mathrm{PV})\mathrm{dt} + \tau_\mathrm{D}\frac{\mathrm{d(SP-PV)}}{\mathrm{dt}}\right] \quad (5)$$

Aqui aparece o terceiro parâmetro de sintonia chamado τ_D, que é o tempo de derivação e também conhecido como ganho de derivação. Com a aplicação desse controlador, os efeitos oscilatórios praticamente desaparecem e a resposta do controlador se torna rápida e precisa.

Na figura 14, tem-se uma ideia de como é a malha fechada de controle para o tipo de controlador aplicado na planta do exemplo dado por Yu (2006).

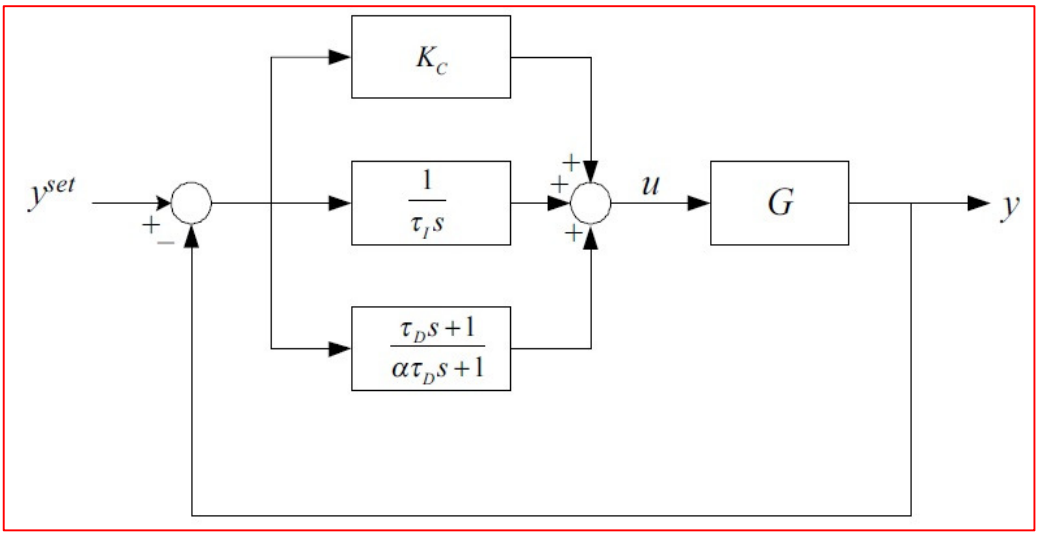

Figura 14-Blocos de um controlador PID com malha fechada no domínio da frequência.

Fonte Yu (2006, p.15)

2.4 Teoria de freios

Arias-Paz (1970) afirma que historicamente, os freios automotivos foram concebidos para uso de tambores, já que eram muito similares aqueles sistemas de freio com sapatas aplicados em carruagens puxadas por cavalos ou freios de locomotivas a vapor.

Com a evolução da tecnologia automotiva observou-se que para os motores cada vez mais potentes, precisava-se de freios também mais eficazes, dessa forma começaram as aplicações com freios a disco.

Hoje em dia a configuração mais comum em automóveis e veículos comerciais são discos de freio na dianteira e discos ou tambores de freio na traseira, conforme ilustrado no diagrama da figura 15, podendo variar essa combinação, conforme as aplicações e potências dos motores.

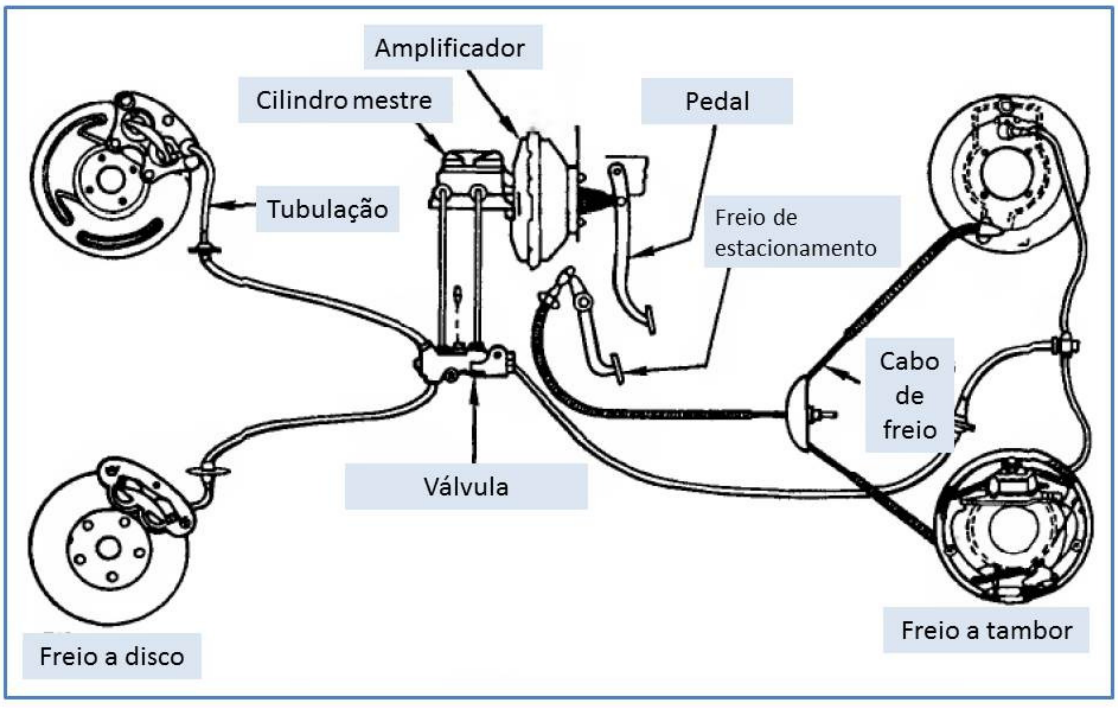

Figura 15-Sistema de freio automotivo.

Fonte: Elaborada pelo autor a partir de Limpert (1999)

Arias-Paz (1970) exemplificara que em um carro de potência média, a aceleração proporcionada pelo motor é relativamente grande, onde, desde o instante do arranque até atingir os 60 km/h, transcorrem 15 s, durante os quais o automóvel percorre cerca de 140 m. Se a essa velocidade for aplicada a força máxima dos freios (emergência), o carro detém-se aos 20 metros em menos de 2,5 s, quer dizer, que a desaceleração atingida é seis vezes maior que a aceleração proporcionada pelo motor, e se a potência desse motor é de 60 cv, a potência representada pelo esforço rápido dos freios é mais que o dobro.

A frenagem por tambores de freio consiste na aplicação de uma superfície fixa contra um tambor giratório, o atrito contém a rotação da parte móvel, convertendo-se a energia absorvida em calor, que se dissipa por radiação na atmosfera. Os tambores giratórios costumam estar situados nas rodas do carro, seu princípio de funcionamento é o seguinte: quando o motorista aciona o freio, esse pressuriza um fluido hidráulico no cilindro mestre, do qual saem tubulações para cada uma das rodas. Nos pratos de freio existentes em cada roda, há dois corpos de bomba, com dois pistões, que separados pela pressão do líquido, aplicam as sapatas articuladas contra o tambor giratório. Quanto maior for a pressão com que as sapatas são aplicadas contra o tambor, maior será o efeito dos freios. Da mesma forma que se utiliza a aderência da banda de rodagem do pneu sobre o solo para a propulsão do veículo, se o esforço de rotação é maior que essa aderência, as rodas patinam e o carro não se move. Também para frear utiliza-se essa aderência, de modo que a resistência existente na frenagem faz as bandas de rodagem parar o veículo, além disso, um carro com as rodas traseiras totalmente bloqueadas tende a ir para o lado, se forem as dianteiras perde-se a direção, pois o veículo continua indo em linha reta. Por essa razão, o que mais interessa é que os freios atuem até quase prender as rodas, sem chegar a bloqueá-las. Deduz-se que a eficácia dos freios depende, em última análise, da qualidade e desgaste da banda de rodagem como também do estado e do tipo de pavimentação. Um carro com pneus gastos e lisos sobre um piso de asfalto molhado, agarra muito menos que com a banda de rodagem nova sobre o cimento seco e no primeiro caso prenderá com facilidade as rodas, patinando perigosamente se o motorista não tiver presente que, quando mais potente seja o mecanismo de freios, mais cuidados deverão ter ao usá-lo sobre o piso escorregadio. Na década de 80 houve a introdução dos freios ABS, que em

frenagem de emergência com eminente travamento das rodas, cria uma modulação da pressão hidráulica e garante que as rodas não travem e o carro não perca a sua trajetória.

Arias-Paz (1970) definira o princípio de funcionamento do freio a disco, com uma característica de funcionamento idêntico ao das pinças que atuam sobre os aros de bicicletas. No automóvel a pressão hidráulica atinge os cilindros atuadores, cujos êmbolos (pistões) deslocam-se e comprimem as pastilhas contra o rotor, que se atritam sobre ambas as faces do disco unido à roda do carro. Podem-se visualizar esses componentes na figura 16.

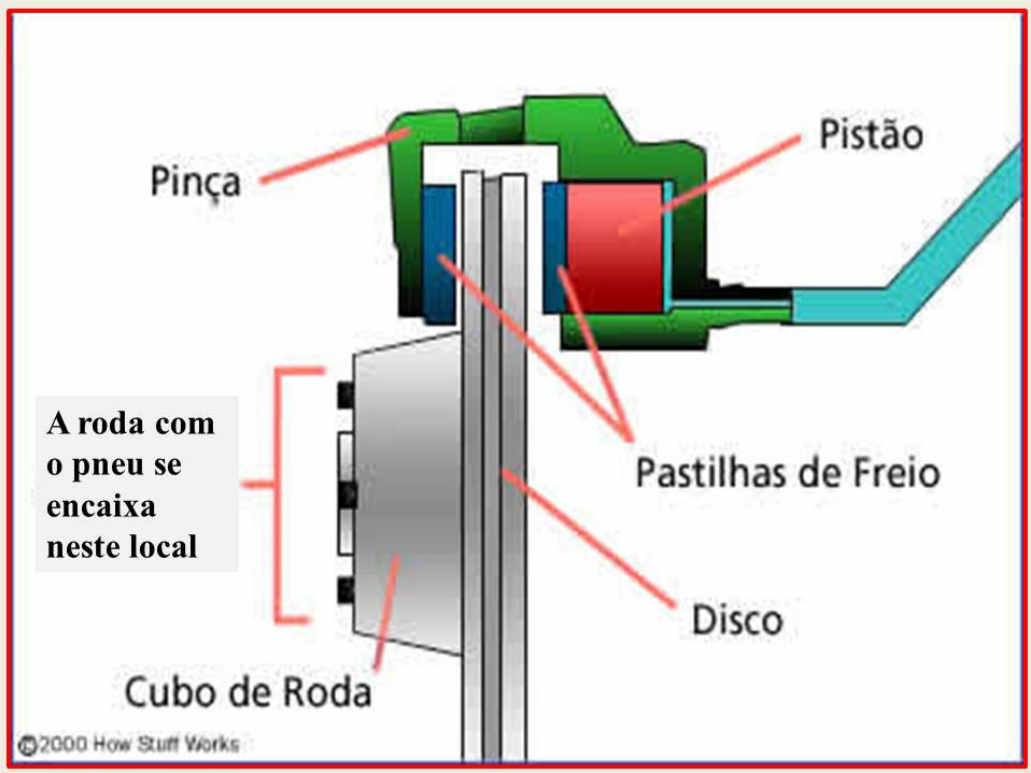

Figura 16-Desenho de freio a disco em corte.

Fonte: Nice (2000)

Nos automóveis os discos de freio possuem cerca de 300 mm de diâmetro e 15 mm de espessura, giram juntamente com a roda, sendo que três quartos de sua superfície recebem ar para refrigerar-se melhor. A outra quarta parte está entre dois cilindros, cujos êmbolos comprimem contra o disco as pastilhas de atrito, quando a

pressão hidráulica que vem da bomba acionada pelo pedal atinge o cilindro por meio da tubulação e ligação entre ambas as faces do disco. Na figura 17 pode-se ver o freio a disco do tipo ventilado em um eixo traseiro de ônibus rodoviário, que possui um potente motor propulsor de seis cilindros para viagens de longa duração.

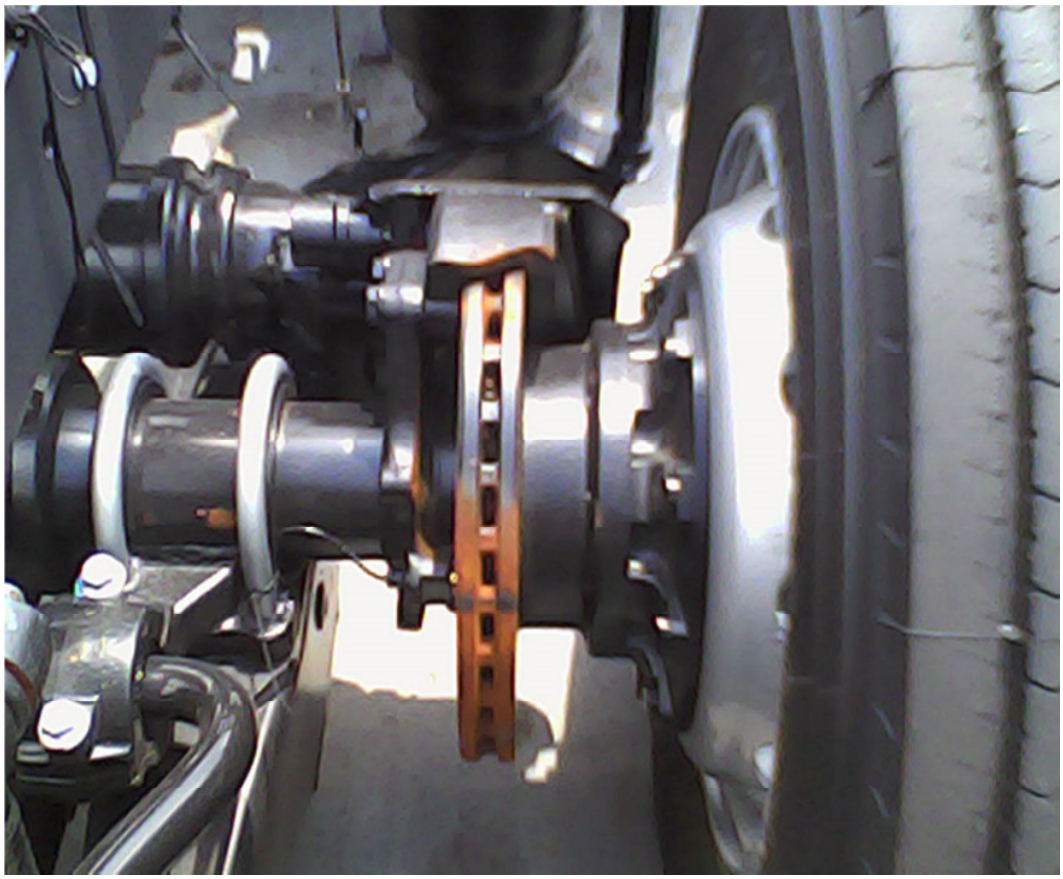

Figura 17-Freio a disco ventilado montado no eixo de tração de um ônibus rodoviário, sem a roda interna.

Fonte: Acervo do autor

Na figura 18 podem-se observar os discos de freio de locomotivas, que assim como nos freios de automóveis esportivos e veículos comerciais, são do tipo discos ventilados, onde a rotação de cada disco permite a circulação de ar, da mesma forma que em um ventilador, fazendo com que a temperatura se reestabeleça mais

rapidamente. O ar entra pelo centro do disco e sai pela borda externa após realizar a troca de calor.

Figura 18-Discos ventilados de locomotiva.

Fonte: Acervo do autor

Nos freios de tambores existem internamente duas sapatas de material de atrito, que são pressionadas contra a superfície interna dos tambores, dessa forma, reduzindo-se assim a rotação das rodas. Nesse tipo de freio já se atingiu praticamente um limite de capacidade técnica, que facilmente atingem elevadas temperaturas quando usados com certa continuidade, pois os tambores não têm boa ventilação para dissipar o calor proveniente de seu atrito com as sapatas que estão fechadas em seu interior.

Raszl (1995) descrevera a concepção energética de freios, onde comenta que os fabricantes de freios estão preocupados em entender e controlar os fenômenos físicos envolvidos no funcionamento dos mesmos para desenvolvimento de freios, assim analisando:

a) Torque requerido para frenagem;

b) Capacidade de absorção da energia liberada para a frenagem.

Essas duas condições determinam o projeto matemático para definir qualquer tipo de freio, porém, na operação do veículo algumas falhas podem surgir. Se um freio é requerido para trabalhar em um regime maior do que a sua própria capacidade, com certeza um ou mais de seus componentes irão falhar. O freio é uma máquina térmica que transforma energia cinética em energia térmica. Seu trabalho é gerar calor a uma taxa controlada e dissipá-la para a atmosfera. Esse conhecimento é importante para manter-se a integridade do freio.

Assim, têm-se duas energias envolvidas na frenagem, que são:

a) Mecânica;

b) Térmica.

Raszl (1995) dissera que um veículo, ou qualquer outro corpo, pode ter energia potencial ou energia cinética. Se o veículo está parado no topo de uma subida, isto representa a existência de certa quantidade de energia potencial. Se for aplicado um impulso horizontal (uma ação de força) o veículo começará a rodar para baixo. A energia potencial começará a se tornar energia cinética as quais se mantêm aumentando na medida em que a velocidade do veículo aumenta. A qualquer momento dado, o veículo possui certa quantidade de energia cinética baseada na sua velocidade e massa. Se desejar ir devagar com o veículo, conforme se desce a rampa, deve-se então encontrar uma maneira de absorver a energia cinética. Isto é facilmente feito pela conversão em energia térmica através dos freios e dissipação dessa energia para a atmosfera.

A figura 19 mostra o disco de freio em brasa, do lado direito de um carro de corrida. Isso se deve a sua alta temperatura e pela convecção do calor, fato que os carros de corrida desenvolvem elevadas velocidades, mas que durante uma prova, precisam diversas vezes reduzir drasticamente a velocidade para conseguir acompanhar o contorno de uma pista.

Deve-se ser capaz de fazer isso e controlar a aplicação do freio a uma taxa que se considera adequada e segura, caso contrário, se o veículo não estiver dimensionado para desenvolver uma frenagem tão rápida quanto necessária para o momento, certamente pode-se estar sob o risco de uma falha com acidente.

Figura 19-Freio com alta temperautra de operação, em veículo de corrida.

Fonte: Arthomobiles. fr (2008)

Conforme exemplificara Raszl (1995), a energia de frenagem deve ser aumentada na mesma medida em que se aumenta a massa do veículo, por exemplo, um veículo com 4,6 t precisa de duas vezes mais energia de frenagem que necessitaria um veículo com 2,3 t rodando na mesma velocidade. A cada unidade de tempo a velocidade é quadrática. Um veículo requer quatro vezes mais energia de frenagem a 60 km/h do que precisaria se estivesse a 30 km/h e nove vezes se estivesse a 90 km/h.

A energia de frenagem e a potência do veículo podem ser relacionadas, pode-se verificar isto na equação 6, mas é interessante exemplificar que 1 hp é a energia requerida para levantar 4566 kg na altura de 1 m no período de 1 minuto.

Usando a equação 6, pode-se calcular a energia cinética.

$$E = \frac{M * V^2}{2} \qquad [kg.m^2\ /s^2] \qquad (6)$$

M = massa (o peso do veículo dividido pela gravidade de 9,81 m/s^2);

V = velocidade do veículo em m/s.

Se um caminhão reboque com 27.200 Kg em 96 km/h fosse requerido parar em 1 min, isto resultaria em uma potência total de 220 hp para a frenagem. Em frenagem de pânico o veículo deve ser parado em 6 s ou menos. Seis segundos é 1/10 de um minuto, assim a potência que o freio deve absorver seria de 2200 hp ao invés de 220 hp.

O calor gerado, no nosso exemplo, de uma única parada é suficiente para aumentar a temperatura de 23,5 kg de água a partir do ponto de congelamento até a ebulição em 6 s.

Assim sendo, 0,17181 kcal/s = 1 hp.

A quantidade de calor gerada para dissipar uma potência de 2200 hp em 6 s, pode ser encontrada com o auxílio da equação 7.

Q= Potência . Δt (7)

Q = 0,1781.2200.(6 s) = 2350 kcal

Também, pode-se conhecer a massa do corpo que gera o calor, utilizando-se a equação 8.

$$m = \frac{Q}{c.\Delta t} \quad [kg] \qquad (8)$$

c= 0,119 kcal/kg*℃ (calor específico do ferro)

Raszl (1995) definira que em um sistema de freio de um veículo pesado, cada eixo é projetado para absorver em torno de 50 a 60 hp continuamente. Os freios podem realizar esse trabalho sem qualquer dano ao material de atrito, tambores e discos ou outros componentes periféricos do freio. Quando os freios são exigidos a absorver energias acima do especificado, o material de atrito pode queimar e até desintegrar-se, os discos e tambores sofrerão choques térmicos cíclicos, advindos da fadiga térmica e consequentemente as trincas que levam os discos e tambores à falha total.

Raszl (1995) também trouxera a questão de energia presente em um motor propulsor com 100 hp, que pode acelerar um veículo à velocidade de 96 km/h em 1 min. Os freios são exigidos para frear o mesmo veículo a 96 km/h em 6 s (tempo de

frenagem). Os freios devem absorver e dissipar a energia equivalente a 10 vezes a potência do motor, ou seja, 1000 hp.

De maneira similar, Canale (1989) define a frenagem como uma conversão das energias cinética e potencial em calor. Essa conversão se dá no atrito das sapatas (lonas) com as panelas no tambor e entre as pastilhas com os discos, ou ainda, indesejavelmente na área de contato do pneumático com o solo. Um fator limitante do desempenho do freio é a temperatura das faces que se atritam. Isso porque, o coeficiente de atrito entre elas decresce com o aumento da temperatura, diminuindo consequentemente o torque de frenagem, além disso, um aumento exagerado da temperatura diminui a resistência à abrasão das pastilhas e lonas, diminuindo com isso sua vida útil. Concluindo, no projeto dos freios, os limites de temperatura dos materiais que se atritam devem ser observados.

Segundo Canale (1989), duas condições operacionais da frenagem devem ser estudadas:

- frenagem moderada de longa duração: como o veículo descendo uma rampa de grande extensão. Nesse caso, todo o calor gerado deve ser dissipado para o ambiente (ar), mantendo a temperatura do sistema abaixo da máxima determinada pelos materiais que se atritam;

- frenagem severa de pequena duração (emergência): toda a energia convertida em calor deve ser armazenada na capacidade térmica do sistema mecânico de frenagem, sem também ultrapassar a temperatura limite.

Segundo Canale (1989) também afirma, a dissipação do calor gerado no freio para o meio ambiente é um fator importante de desempenho, principalmente nas frenagens intermitentes, mas constantes, ou de longa duração. Essa dissipação se faz das seguintes maneiras:

- condução através dos componentes do sistema de freio - é de pequena importância prática;

- radiação - relativamente baixa nas condições normais de uso;

- convecção - é o fator mais importante na troca de calor com o meio ambiente. É função da quantidade e qualidade da área externa do sistema em contato com o fluído refrigerante (ar), diferença de temperatura entre eles, da velocidade e da turbulência do fluxo sobre o sistema de freio.

Discos de freio são geralmente construídos em aço, podendo haver ligas específicas para possibilitar comportamento diferenciado em veículos de carga, esportivos ou de luxo, sendo nesse último tipicamente mais suave. Os discos também podem ser internamente ventilados para dissipar melhor o calor com o veículo em movimento. Pode-se entender que o ar proveniente do movimento do veículo passa pelo disco e faz com que o calor seja dissipado no fluxo de ar, porém, nem todos os veículos possuem características para uma ótima ventilação, necessitando, por vezes, sistemas de ventilação forçada, que é a proposta desse trabalho. Para veículos esportivos e de carga, os discos são internamente ventilados e possuem uma superfície maior para propiciar uma ótima dissipação de calor, com diversas geometrias de suas aletas internas, assim permitindo um melhor contato do fluxo de ar para a troca de calor, quando comparados com os discos sólidos convencionais.

Um disco que não esteja plano ou reto nas áreas de contato com as pastilhas poderá causar frenagens ruins, ruidosas e com vibrações perceptíveis aos passageiros e ao condutor, muitas vezes os discos podem empenar por choques térmicos, como por exemplo, em uma frenagem de emergência e em seguida atravessar uma poça de água.

As pastilhas de freio são compostas de materiais de atrito (atrito) para estarem em contato com o disco de freio e executarem a tarefa de frenagem, minimizando o desgaste do disco. Na manutenção veicular, geralmente troca-se as pastilhas de freio quando apresentam desgaste, por um custo muito menor do que se trocar o disco. O excesso de calor no processo de frenagem pode acelerar o desgaste das pastilhas ou até mesmo podendo causar a queima e a destruição dos pneus, quando existir o travamento dos pistões atuadores do freio, muitas vezes isto ocorre pela contaminação do fluido hidráulico, ou pela presença de água que desenvolve a corrosão das partes metálicas. A alta temperatura dos freios pode gerar uma falha de frenagem devido ao efeito de redução do atrito, *fading*.

A presença da água cria um efeito lubrificante, podendo esse efeito ser significativo no aumento no espaço de frenagem, assim como, no aumento do tempo de frenagem, fator crucial na eminência de uma colisão ou atropelamento quando o veículo se move.

Limpert (1999) quantificara a distância total de frenagem, que pode ser calculada pela soma da área do retângulo (*Speed* x $T_{reaction}$) com a área do triângulo (*Speed* x $T_{braking}$ /2), como se vê na figura 20 e equação 9, que segue abaixo:

$$D_{total} = \frac{2.(Speed.T_{reaction}) + (Speed.T_{braking})}{2} \quad [m] \quad (9)$$

O gráfico da figura 20 representa melhor esse cálculo.

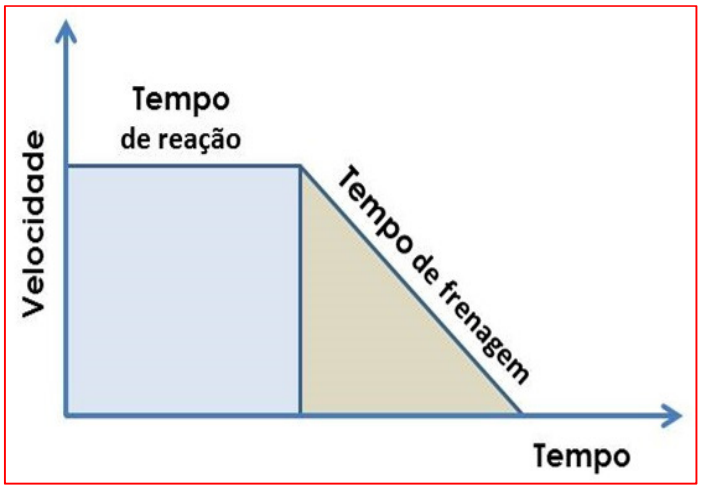

Figura 20-Comportamento de um veículo freando.

Fonte: Baseado em Limpert (1999)

Loh et al (2000), apresentaram uma relação muito importante na frenagem, que está indicada na equação 10, referente ao coeficiente de atrito dos freios. Essa equação mostra uma relação direta entre a força tangencial e a força normal, resultando o coeficiente de atrito como sendo uma grandeza de valor adimensional, pode-se visualizar as forças atuando em uma frenagem na figura 21.

$$\mu = \frac{Ft}{Fn} \quad (10)$$

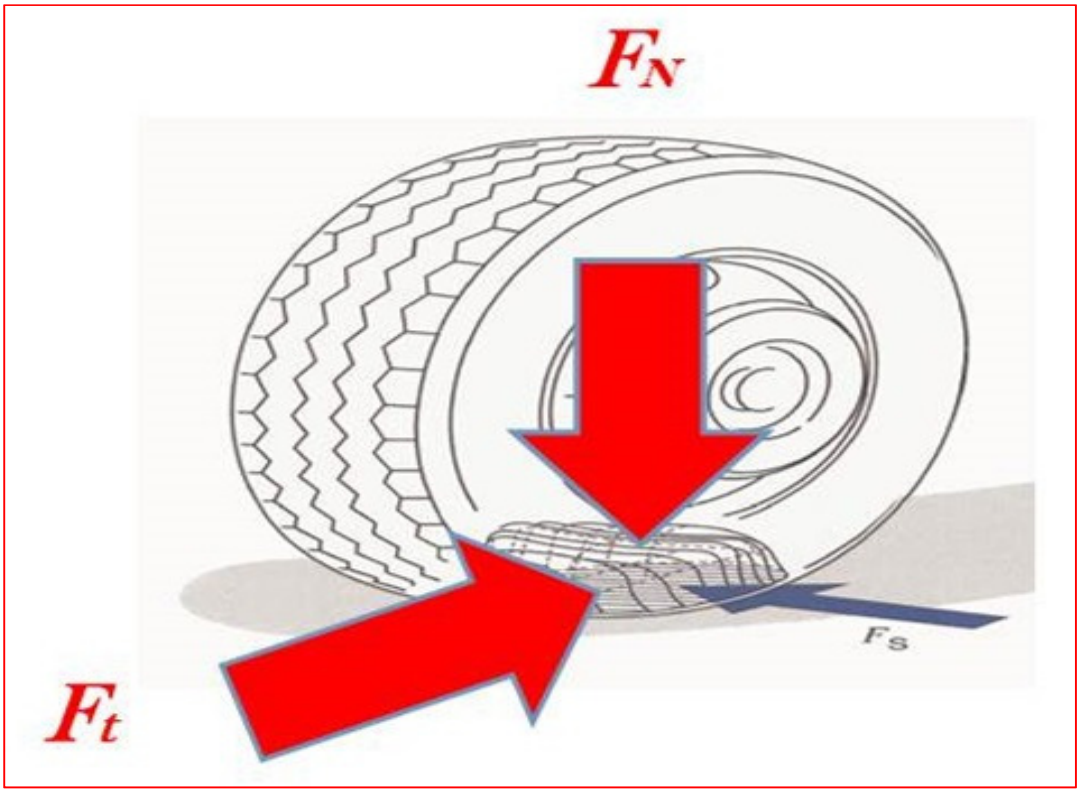

Figura 21-Força tangencial e força normal no momento da frenagem.

Fonte: Elaborado pelo autor

Loh et al (2000) também apresentaram outra forma para se obter o coeficiente de atrito, que é a relação entre o torque do freio dividido pelo raio efetivo do rotor e duas vezes a pressão hidráulica e a área do pistão da pinça de freio, como vê-se na equação 11.

$$\mu = \frac{(T/R)}{(2.P.A)} \qquad (11)$$

Loh et al (2000) criaram um modelo instantâneo de aumento de temperatura, onde afirmaram que após cada evento de frenagem a velocidade angular do rotor diminui constantemente, assim como, aumenta proporcionalmente a temperatura que gradativamente se estabiliza.

Esse comportamento físico pode ser descrito no modelo de crescimento estabilizado, apresentado na equação 12, que determina a temperatura instantânea

$$T = \frac{A}{1 + B.e^{-Ct}} \quad [°C] \qquad (12)$$

Variáveis do modelo apresentado:

T = temperatura instantânea (°C)

A = máxima temperatura (°C)

B = fator de escala para a temperatura inicial

C = taxa de crescimento

t = tempo (s)

O comportamento do aumento de temperatura desse modelo experimental pode ser graficamente obtido no Matlab Simulink ™, por meio de um modelo de freio de caminhão criado pelo professor Dr. Antônio Carlos Canale da USP de São Carlos.

Deve-se ter em mente que os freios dianteiros (discos), assim como, os freios traseiros (tambores) possuem as mesmas características do aumento de temperatura, porém, os seus valores máximos podem ser muito diferentes em um mesmo veículo.

Segundo Ávila e Lombardi Jr.(2010), sempre que um corpo a uma temperatura superior é colocado próximo ou em contato com outro a uma temperatura menor, existirá uma troca de calor (troca de energias internas), ou seja, o mais quente ficará mais frio e o mais frio se tornará mais quente até que a temperatura de ambos seja a mesma. A esse processo chama-se equilíbrio térmico do sistema, condição na qual todas as temperaturas de todos os corpos que o compõe deverão ser as mesmas, discos ventilados reestabelecem esse equilíbrio mais rapidamente, como visto no fluxo de ar representado na figura 22.

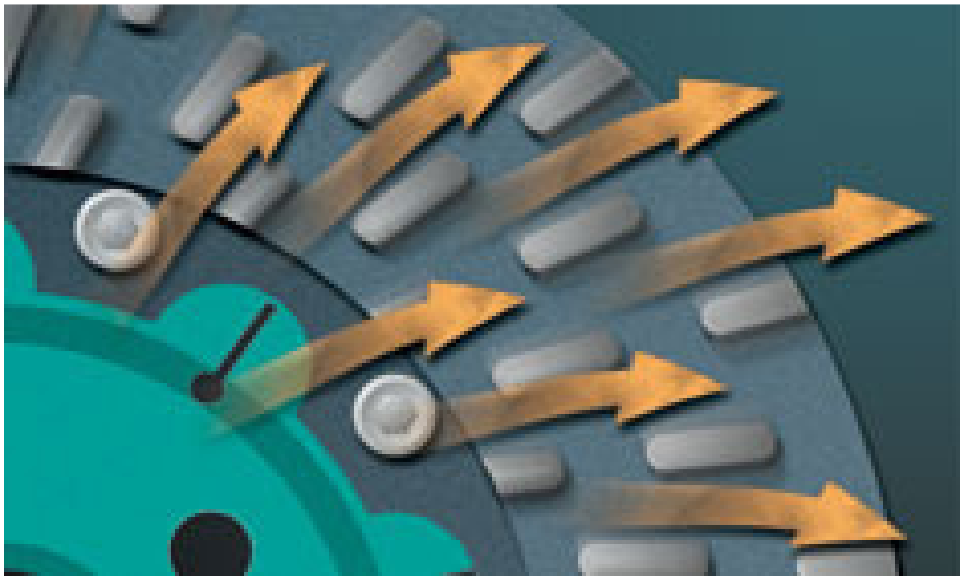

Figura 22-Passagem de ar pelo interior de um disco de freio ventilado.

Fonte: Project-MU (2013)

Na figura 23 pode-se visualizar o gráfico das temperaturas do freio e dos pneus traseiros de tração de um caminhão em teste de frenagem na descida de uma serra. A forma do aumento da temperatura é similar nos modelos teóricos anteriormente apresentados. Os pneus também têm a sua temperatura incrementada por efeito da transferência de calor.

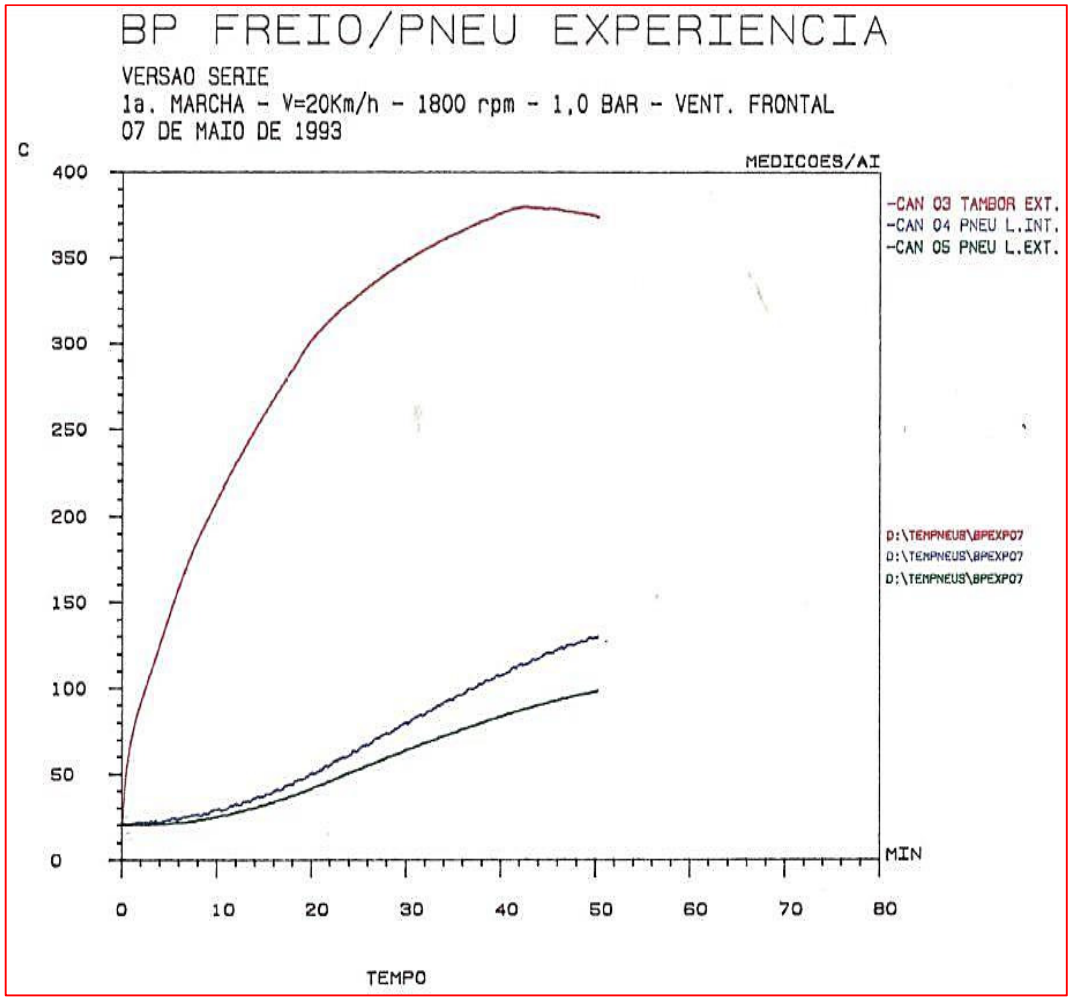

Figura 23-Curvas de aumento de temperatura do freio e pneus traseiros de caminhão.

Fonte: Ávila (2012)

Ainda segundo Ávila e Lombardi Jr. (2010), na troca de calor tem-se que ter em mente as leis da termodinâmica.

1) Primeira Lei da Termodinâmica - Em todo sistema fechado deve ocorrer a conservação de energia entre dois estados, inicial e final.

Representação da lei na equação 13:

$$E2 - E1 = Q - W \quad (13)$$

E1 = energia do estado inicial (Joule);

E2 = energia do estado final (Joule);

Q = calor (unidade caloria, Q › 0 quando sistema recebe calor);

W= trabalho (W › 0 quando o sistema gera trabalho pela conversão de energia).

2) Segunda Lei da Termodinâmica–De acordo com Kelvin-Planck apud Ávila e Lombardi Jr. (2010, p. 11) "É impossível para qualquer sistema operar em um ciclo termodinâmico e fornecer trabalho líquido para sua vizinhança trocando energia na forma de calor com um único reservatório térmico". Com esse parágrafo fica claro que não é possível a construção de um sistema ideal.

A segunda lei é expressa na equação 14:

W= Qh - Qc (14)

Onde:

W = trabalho disponível (cal);

Qh = calor da fonte quente (cal);

Qc = calor da fria (cal).

Schuetz (2009) descrevera a restauração da temperatura do freio automotivo como se vê na equação 15, onde o tempo de refrigeração do rotor em segundos (t+cool) é definido pela multiplicação da velocidade do ar com o veículo em movimento (U∞) e o tempo estimado de redução de temperatura do rotor (tcool), considerando-se a temperatura ambiente no tempo infinito e finalmente tudo isso dividido pelo diâmetro do rotor do freio a disco (Dd).

Disso pode-se concluir que quanto maior for o diâmetro do rotor do freio a disco, menor será o tempo de redução da temperatura do freio.

Se o veículo tiver uma maior velocidade, proporcionalmente terá uma maior energia cinética, mais calor e maior tempo para a restauração da temperatura.

$$t^{+}_{cool} = \frac{t_{cool}}{D_d}\frac{U_{\infty}}{} \quad [s] \qquad (15)$$

Schuetz (2009) comparara os resultados calculados com essa equação e os dados coletados em veículo instrumentado em teste em um túnel de vento, onde os resultados se mostraram muito similares.

Uma análise termográfica de disco de freio é apresentada na figura 24, onde o rotor se apresenta com temperaturas mais elevadas progressivamente da parte central para o seu maior raio.

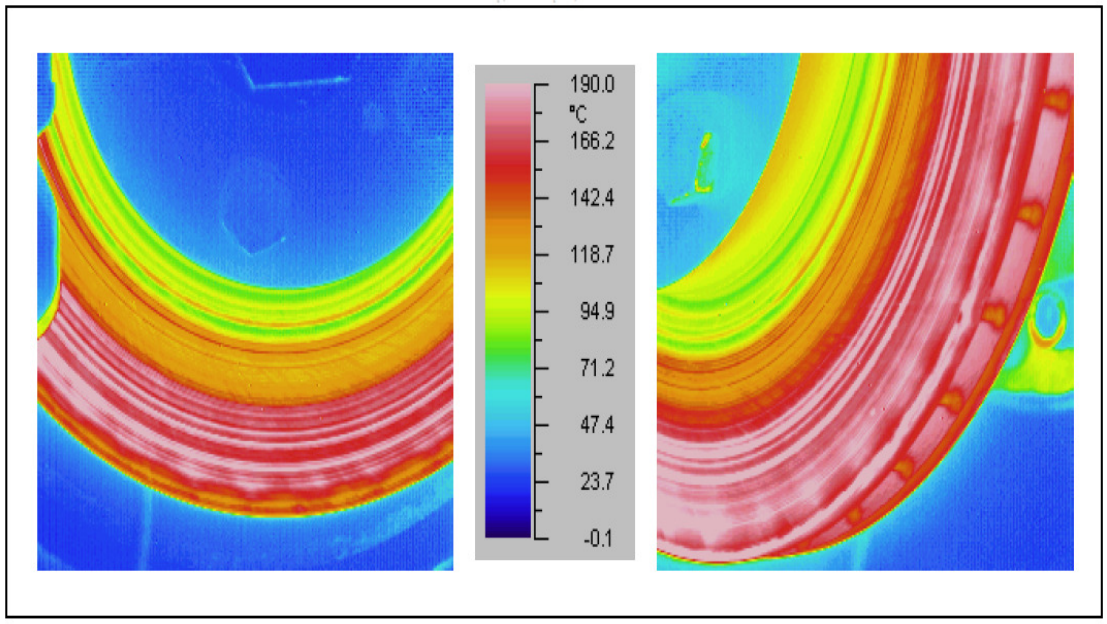

Figura 24-Análise termográfica de rotor de freio a disco.

Fonte: Nagayoshi, Inou e Hara (2004, p.3)

A refrigeração por convecção no rotor do freio a disco até a superfície de saída de ar causada devido ao deslocamento do veículo mostra-se como um fenômeno muito importante, por manter a estabilidade do freio e impactando diretamente na vida útil do material de atrito. Isso representa um fator primordial na administração de frota de veículos comerciais. A operação veicular influência no comportamento do atrito, na resposta do pedal de freio e na durabilidade das pastilhas em longo prazo.

Existem diversas propostas das indústrias para a redução da temperatura dos freios, como a utilização de materiais especiais de compósitos de carbono ao invés

do aço, ou ainda rotores com diâmetros maiores, discos de freio ventilados com aletas internas, tomadas de ar auxiliares para os freios (figura 25), etc.

Figura 25-Ford Mustang com um kit esportivo para freios.

Fonte: Classic design concepts (2013)

Pode-se ver uma interessante ideia apresentada em um material da SAE, conforme apresentado na figura 26. Essa aplicação de aletas sob o chassi não se mostra versátil em baixas velocidades ou se aplicadas em veículos comerciais com um grande balanço frontal do chassi.

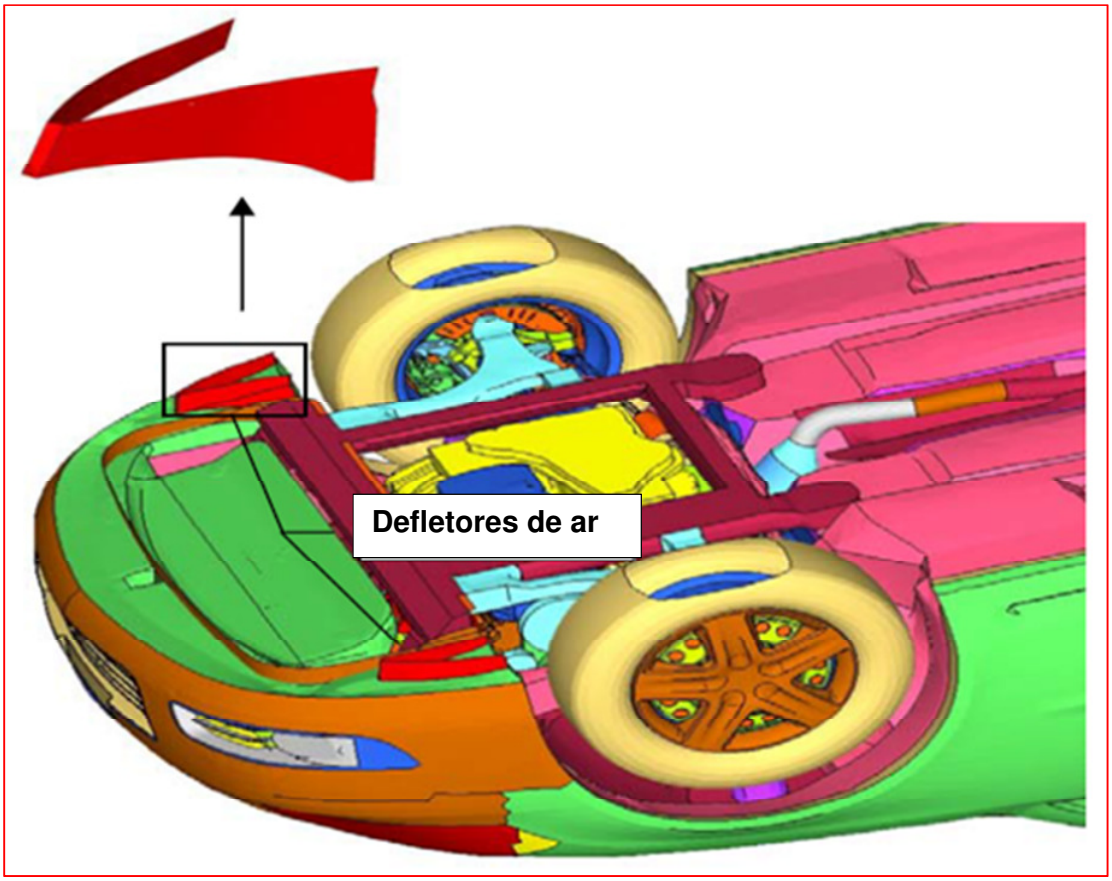

Figura 26-Defletores de ar para freios a disco.

Fonte: Sun (2006, p.7)

Na figura 27 pode-se observar a tecnologia diferenciada de freio a disco utilizado em competições, devido às dimensões dos pneus, os mesmos cobrem os freios e restringem o fluxo de ar para redução da temperatura de frenagem. A equipe Ferrari criou uma tomada de ar que coleta o fluxo de ar durante o movimento do veículo, mantendo os discos ventilados sempre que o veículo se desloca.

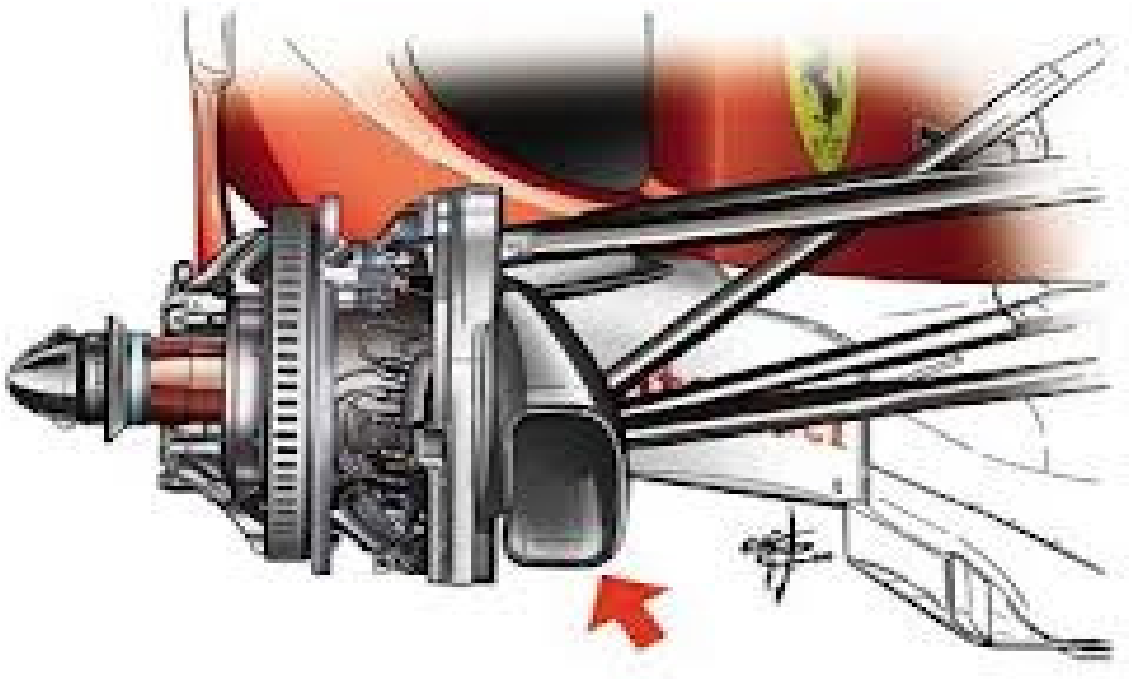

Figura 27-Tomada de ar para freio de veículo Ferrari da Fórmula 1.

Fonte: The escuderia (2013)

As melhores respostas à temperatura do sistema de freio ainda são determinadas empiricamente por meio de testes de rodagem e testes em dinamômetros de freio. Um experimento em pista de teste, com a contínua ativação dos freios, tem os resultados apresentados no gráfico da figura 28. O excesso de temperatura como apresentado no experimento mostrou a evidência de que o coeficiente de atrito varia, assim como a temperatura, que são influenciados pela frequência de utilização dos freios e a velocidade de deslocamento do veículo.

Igosheff et al (2013) mostrara em sua pesquisa, apresentada no Congresso SAE 2013, que o fluxo de ar forçado no rotor de freio a disco pode trazer uma eficiência para o sistema de freio.

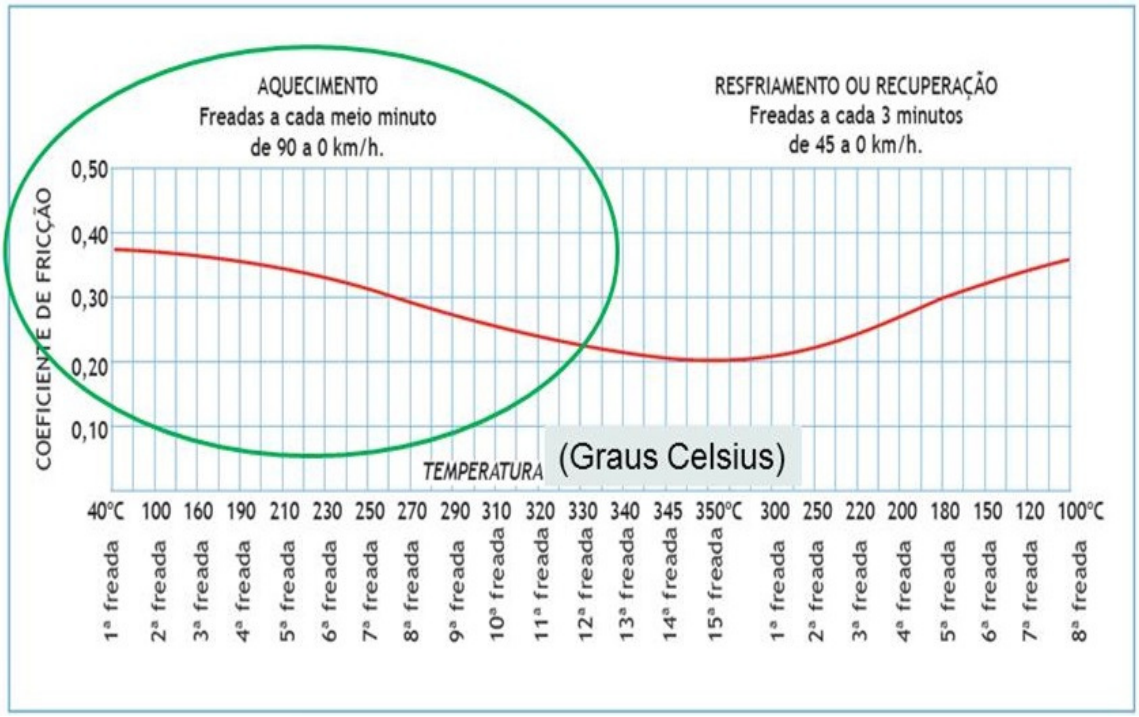

Figura 28-Experimento com o início do Fading com a temperatura ao redor de 200℃.

Fonte Infantini (2006, p.2)

Conforme descreveu o fabricante de freios Fras-Le (2012, p. 5), “O coeficiente de atrito é o fator mais importante em um material de atrito”, já que o seu valor deve manter-se praticamente constante em uma determinada faixa de temperatura. Precisa-se salientar que a qualidade do material de atrito não é necessariamente ter um alto coeficiente de atrito, pois muitas vezes um freio excessivamente eficiente representa tanto perigo quanto não se ter freio, pelo eminente travamento das rodas. A estabilidade do atrito é um fator primordial de eficiência de frenagem, em função da temperatura, velocidade, pressão e outros fatores externos. Não necessariamente a falta de freio é culpa do material de atrito, também podendo haver falhas do sistema hidráulico ou a ar. Todo material convencional de atrito aplicado em freios, quando submetido a trabalho em temperaturas elevadas, por exemplo, até 350℃, apresenta redução drástica no seu coeficiente de atrito.

Essa redução do atrito, entretanto, deve manter-se dentro de limites toleráveis (coeficiente de atrito ao redor de 0,4), de modo que o conjunto ainda

apresente uma boa eficiência, resfriando o freio até a temperatura ambiente, após um ensaio de *fade* e fazendo as medições do coeficiente de atrito, os valores obtidos devem ser similares àqueles coletados antes do resfriamento. Esse fenômeno é chamado de recuperação.

Na figura 29 verificam-se os danos causados em componentes do freio a disco, por contínuo superaquecimento do disco e das pastilhas, em um ônibus rodoviário com uma elevada potência do motor propulsor.

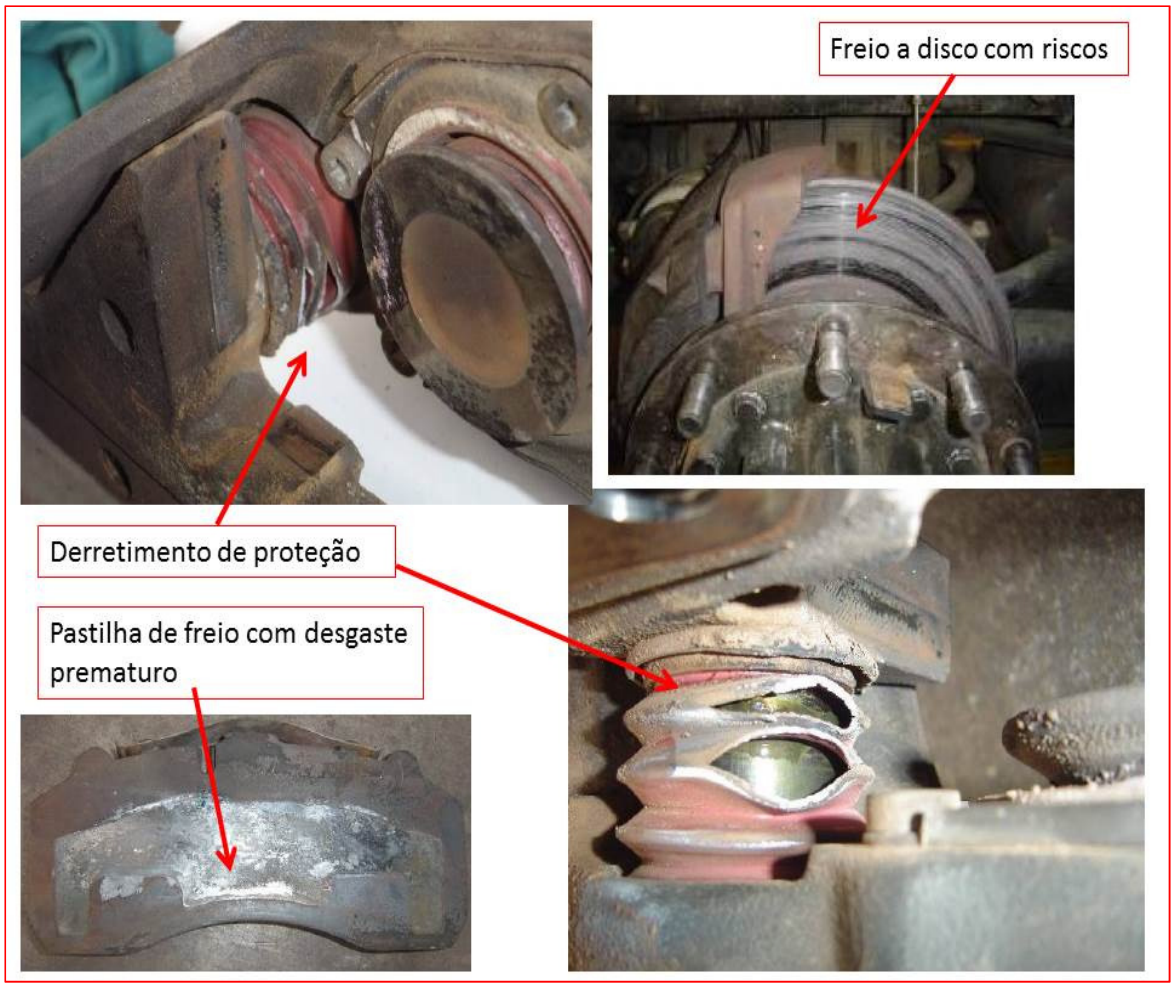

Figura 29-Freio a disco de ônibus rodoviário, com falhas devido ao auperaquecimento.

Fonte: Acervo do autor

Na figura 30 tem-se um tambor de freio de um caminhão acidentado, em que existem diversos riscos e trincas típicas de superaquecimento, analogamente também visíveis na figura 29. O freio desse caminhão pode ter sido exigido além de sua capacidade, que resultou na perda de controle do veículo em uma descida de serra, é bom lembrar que os mesmos comportamentos de aquecimento e *fading*, acontecem em ambos os tipos de freios.

Figura 30-Freio de caminhão com a presença de trincas por superaquecimento.

Fonte: Martello Filho (2012, p.23)

3 PROPOSIÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO PARA O TESTE DE MELHORIA DE EFICIÊNCIA DE SISTEMA DE FREIO DE VEÍCULO AUTOMOTOR

Nesse trabalho não se considera o controle do freio para as condições de parada em pânico ("*panic stop*") ou nas condições para ação do ABS, embora o sistema projetado possa atuar em paralelo, ou seja, ao mesmo tempo.

Após a busca e análise de possíveis soluções para resolver os problemas da pesquisa, concluiu-se por uma solução que não envolva o sistema básico de frenagem no modelo Simulink como apresentado na figura 31, abaixo.

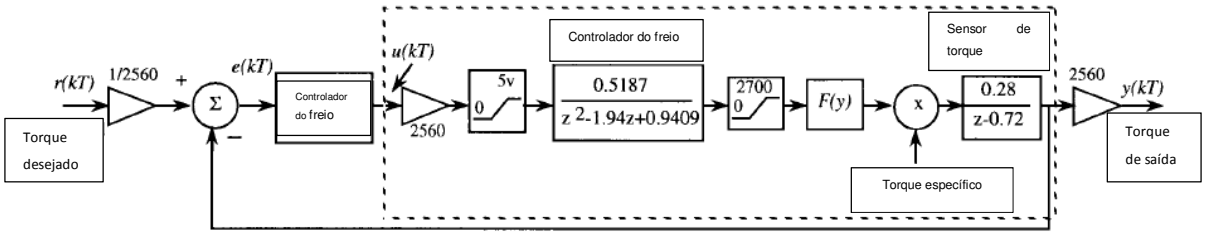

Figura 31-Sistema básico de controle de freio.

Fonte: Lennon (1999)

Nesse modelo uma maior frenagem desejada está diretamente relacionada simplesmente ao aumento de torque aplicado aos freios, pela ação do condutor do veículo ou do ABS. Isso acontece mesmo que haja ação de efeitos perturbadores ou condições ambientais adversas como temperatura e umidade que podem causar oscilações ("*brake grab*") ou falha de frenagem ("*brake fade*"). Isso foi constatado por meio do estudo de possibilidades com vários tipos de controladores, tais como: PID, controladores inteligentes, controladores baseados em modelo de referência nebuloso e controlador adaptativo, conforme Lennon (1999), Kachroo (1993) e Narendra (1994); dentre outros, que são apresentados na figuras 32.

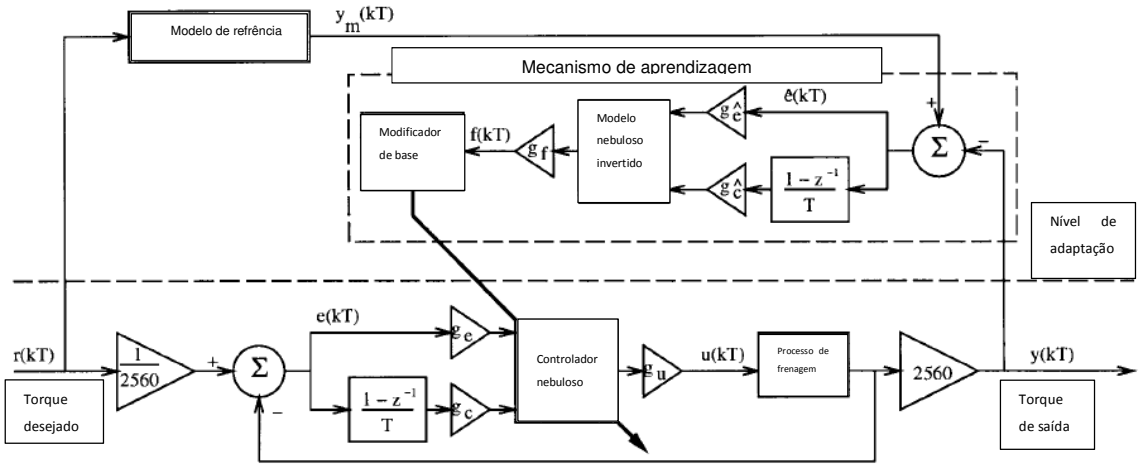

Figura 32-Modelo de controlador nebuloso para freio.

Fonte: Lennon (1999)

Na figura 33 observa-se o controlador baseado em algoritmos genéticos.

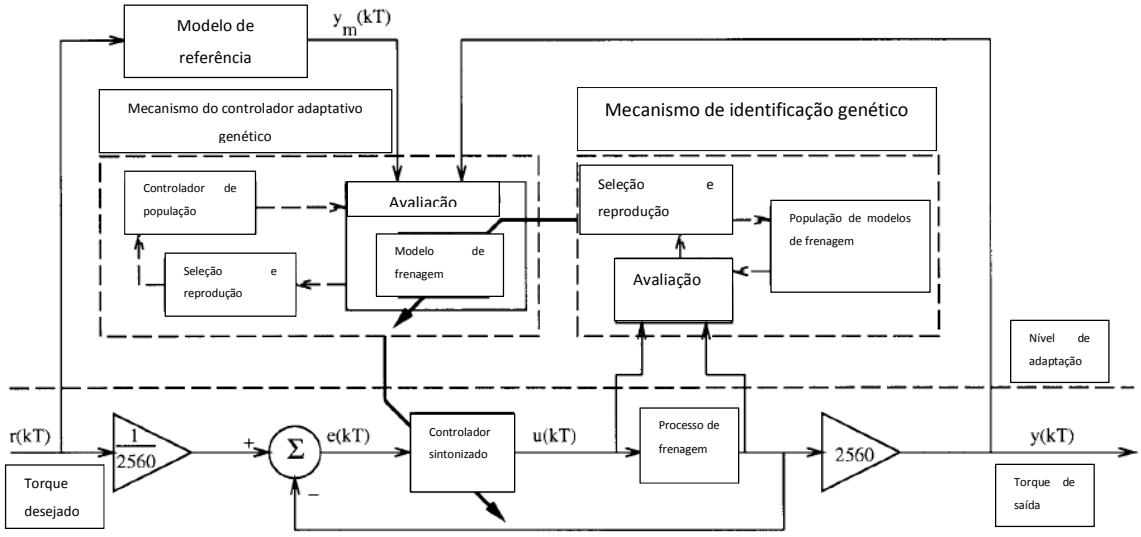

Figura 33-Modelo geral de controlador genético adaptativo para freio.

Fonte: Lennon (1999)

Esses controladores têm como objetivo principal garantir a aplicação de um torque de frenagem mesmo sob condições adversas. Pode-se perceber que além de maior complexidade destes modelos e necessidade da utilização de sensor de torque ainda não presentes nos veículos atuais, esses não se comparavam à solução implantada no trabalho devido à grande perda de eficiência acarretada, por exemplo, pela variação da temperatura em casos extremos. Resumidamente, optou-se por não tentar forçar um torque de frenagem à qualquer custo, pois a ineficiência causada pela redução do coeficiente de atrito e efeitos danosos como *"fading"* deve ser evitado. Por outro lado, optou-se por priorizar as causas reais dos problemas, evitando-se o excesso de temperatura e diminuição da umidade no disco, ao invés de se atacar as consequências; ou seja, procurar aplicar o torque de frenagem independentemente das condições adversas e que poderão danificar o sistema ou causar acidentes. Nessa mesma direção, pode-se constatar que em alguns casos veículos comerciais apresentam freio auxiliar por bloqueio do fluxo de gases de escape, ou retardadores, que restringem o movimento do eixo cardam para desacelerar o veículo. Nesses também tenta-se compensar as consequências de ineficiência dos sistemas de freios mas não se tentam compensar as causas reais ligadas aos problemas de superaquecimento ou umidade.

Dentre as possíveis soluções optou-se por uma solução que atacasse diretamente a causa dos problemas decorrentes da elevação de temperatura ou umidade. Assim, tendo em vista resolver o problema proposto na pesquisa, no sentido de se procurar uma solução para aumentar a segurança dos veículos automotores, a partir da melhoria da eficiência do sistema de frenagem, baseando-se no estudo teórico, foi desenvolvido um protótipo para testes de possíveis soluções. O sistema proposto melhora a eficiência da frenagem através de um controle de temperatura ou eliminação do filme de água no disco do freio, que pode ser integrado à eletrônica embarcada do mesmo. O sistema utiliza uma ventilação forçada nas condições adversas. O controle de temperatura de tambores de freio é mais complexo, por esses serem selados. Tambores possuem o aumento de temperatura exponencial (rápido) e os discos lineares (progressivos).

Os dutos montados à frente dos veículos e sem um controle (como no caso da Ferrari F1 e do Ford Mustang) criam problemas no freio quando o ambiente é

chuvoso, pois a água juntamente com o ar vai facilmente chegar até a superfície do disco e gerar o efeito lubrificante.

O diagrama em blocos do protótipo é apresentado na figura 34 e o mesmo é composto por:

- Disco de freio;
- Sensor NTC de temperatura;
- Controlador;
- Motor elétrico de tração;
- Ventilador centrífugo;
- Rede CAN simulada;
- Sensor de chuva simulado;
- Sistema de tração do rotor do freio;
- Fontes de alimentação.

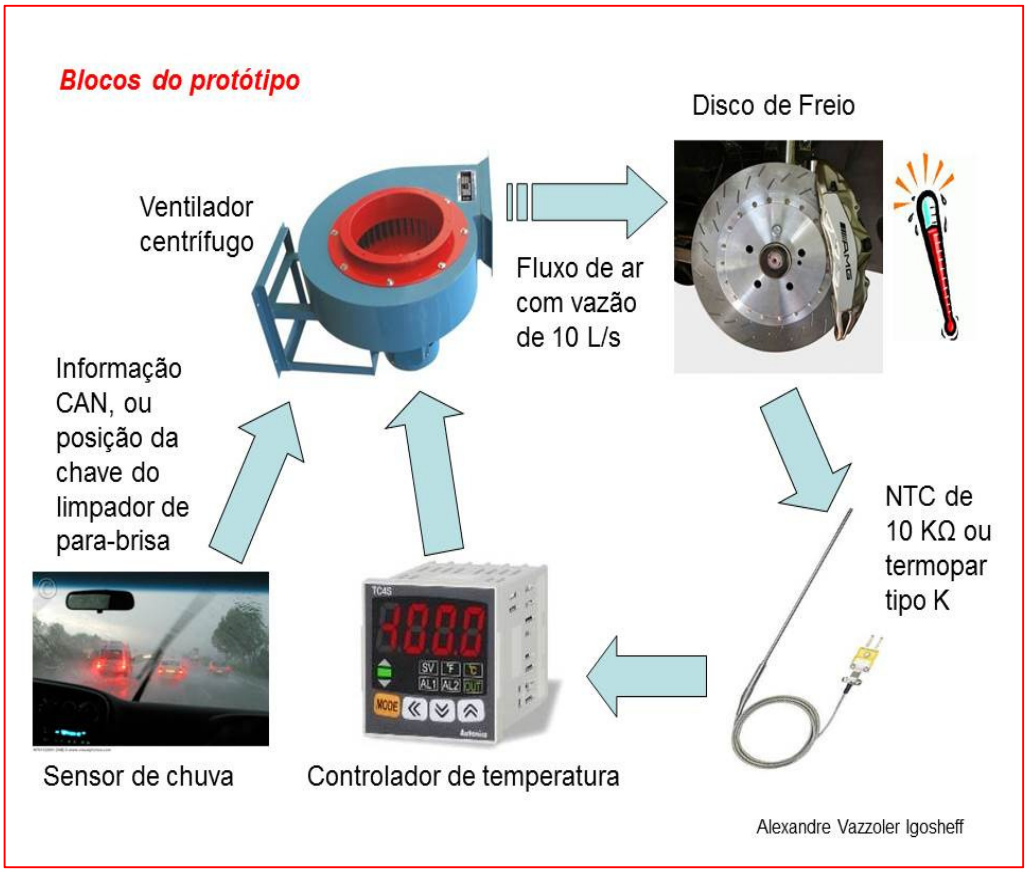

Figura 34-Diagrama de blocos do protótipo de freio com controle de temperatura.

Fonte: Elaborada pelo autor

Na figura 35, veem todos esses equipamentos interligados, compondo assim, o protótipo de freio a disco com controle eletrônico.

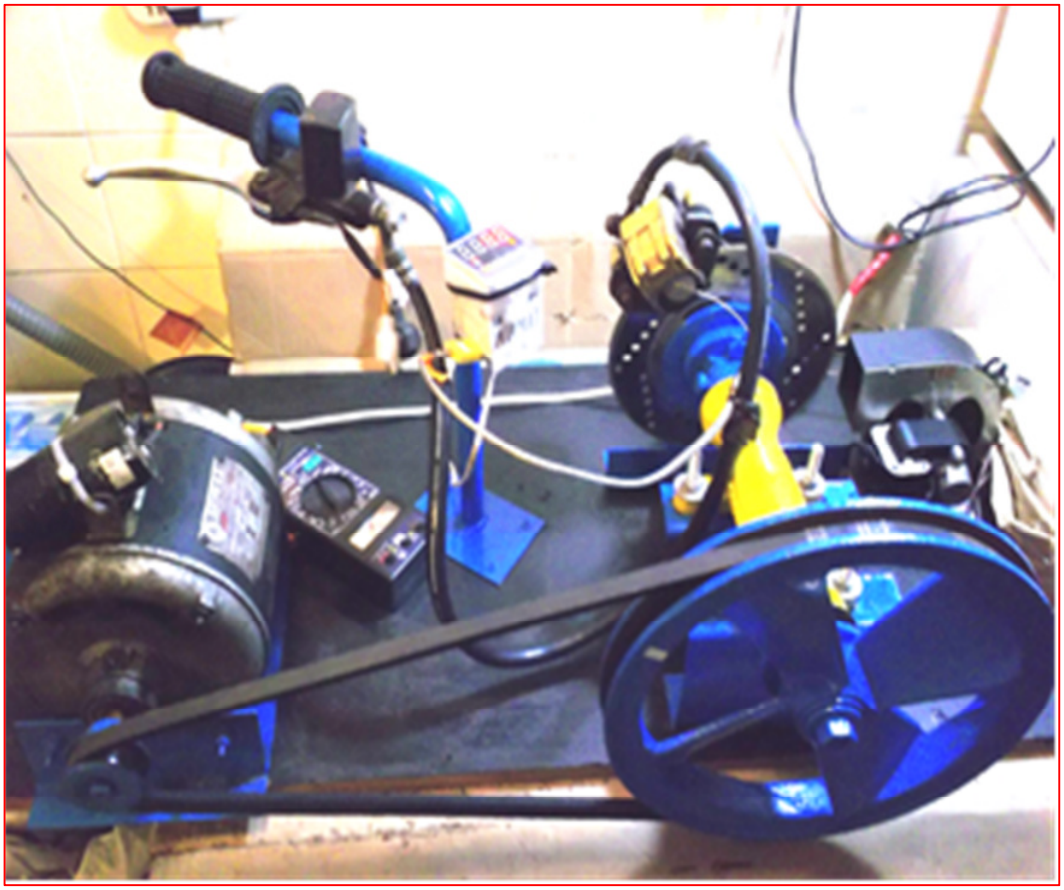

Figura 35-Protótipo de freio com controle de temperatura.

Fonte: Acervo do autor

3.1 Funcionamento básico do sistema

Conforme o diagrama de blocos do protótipo e a figura 34 e a montagem da figura 35, o controle eletrônico para melhoria de desempenho de frenagem monitora as informações de temperatura por meio do sensor NTC e da umidade por meio do sensor de chuva, além de controlar o acionamento do ventilador centrífugo que, agindo diretamente no disco de freio, causa a diminuição de temperatura e da umidade acarretando a melhoria da eficiência de frenagem.

Face ao problema de *fading* do freio, como o apresentado na figura 28, onde o efeito gerado pelo sobreaquecimento (temperaturas acima de 200 ℃, conforme a curva da Fras-Le) reduz o coeficiente de atrito do aço de 0,4 para cerca de 0,2.

Alguns ventiladores centrífugos podem ser conectados por tubos sob o chassi do veículo até as rodas, como apresentado na figura 36. Isto permite levar fluxo de ar com uma grande vazão até cada roda, para uma rápida redução de temperatura dos freios. Os fluxos de ar gerados por um ou mais ventiladores centrífugos também poderão ser usados durante a chuva (conforme verificado anteriormente) eliminando, assim, o filme de água sobre a superfície do rotor do freio a disco, melhorando o atrito e trazendo segurança para a condução em intempéries.

Em 3.1 serão apresentados os detalhamentos das partes constituintes e do funcionamento do protótipo.

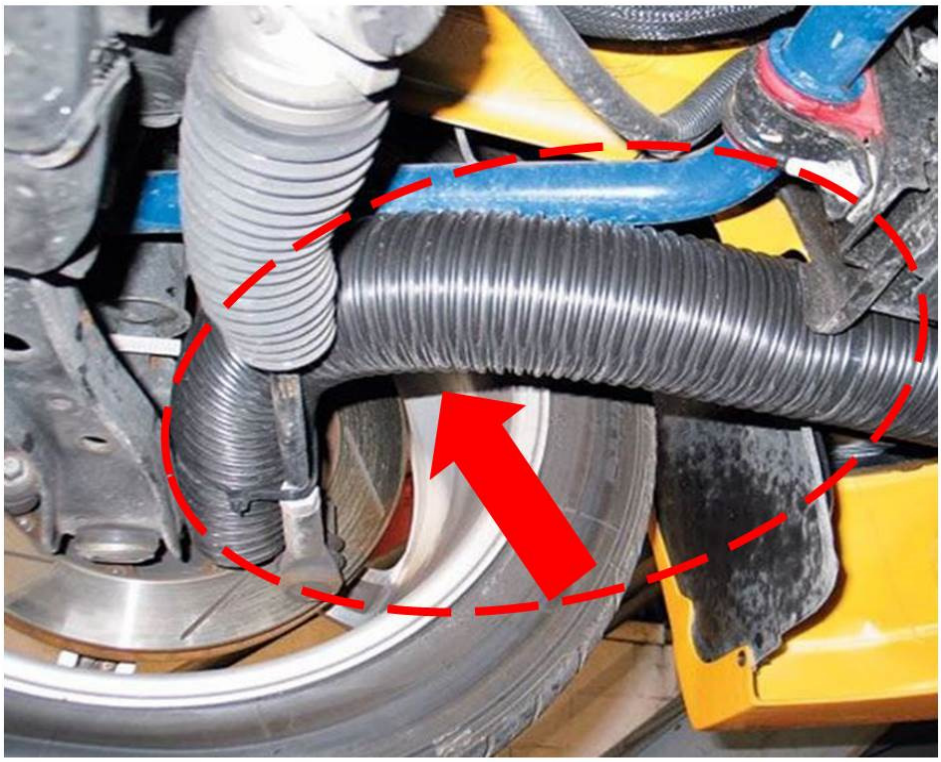

Figura 36-Exemplo de uma montagem de tubulação para a ventilação forçada em freio a disco de automóvel.

Fonte: Acervo do autor

3.2 Equipamentos e Programa de Controle e Registro de Dados

No processo de controle e aquisição/registro de dados, serão descritos em detalhes os equipamentos (*hardware*) e o programa (*programa*) do protótipo de freio a disco com temperatura controlada, a instalação do NI myDAQ™, sensores, atuadores e a aplicação do programa escolhido, o aplicativo LabVIEW™ da National Instruments.

O LabVIEW tem uma linguagem gráfica de programação que usa ícones em vez de linhas de texto para criar aplicações. Em contraste com as linguagens de programação baseadas em texto, onde as instruções determinam a execução de um programa, o LabVIEW usa programação onde o fluxo de dados determina a forma da execução. A Interface homem máquina (IHM) de operação é constituída por um conjunto de ferramentas e objetos, sendo designada pelo seu painel frontal. O programa é efetuado usando representações gráficas de funções, para assim controlar os objetos no painel frontal. O código fica definido em um diagrama de blocos, que se pode associar a um fluxograma. Os programas de LabVIEW são chamados instrumentos virtuais, ou VIs, porque a sua aparência e operação imita instrumentos físicos, tal como osciloscópios e multímetros. Cada VI usa funções que manipulam as entrada se saídas da interface ou outras e exibe essa informação ou a transporta para outros blocos ou sub-VIs. O módulo de controle e aquisição de dados NI myDAQ também é fabricado pela National Instruments e o seu diagrama básico em blocos pode ser visto na figura 37. Esse módulo eletrônico é conectado via USB até um computador onde está instalado e rodando um aplicativo no LabVIEW. O NI myDAQ não é um módulo independente, pois os dados que trafegam pela porta serial passam por um circuito de proteção, que é composto por uma barreira óptica que garante a isolação galvânica do sinal medido com o computador que processa os dados. O NI myDAQ gera as alimentações necessárias para o seu funcionamento a partir dos 5 V da porta USB, criando tensões simétricas de +/- 15 V com limitação de corrente. Na sua estrutura interna existe um microcontrolador que roda um programa de multímetro digital, com conversor analógico/digital, na parte de aquisição e controle de dados ele é composto de microcontrolador, memória, conversor analógico/digital e conversor digital/analógico,

além de amplificadores operacionais para as saídas analógicas e multiplexador digital para as entradas e saídas digitais. No total o myDAQ possui duas entradas analógicas diferenciais, uma saída analógica, uma entrada de áudio, uma saída de áudio, entrada DMM (multímetro digital), entrada de osciloscópio com dois canais, oito entradas/saídas digitais, uma fonte de 5V e outra simétrica de +/- 15V.

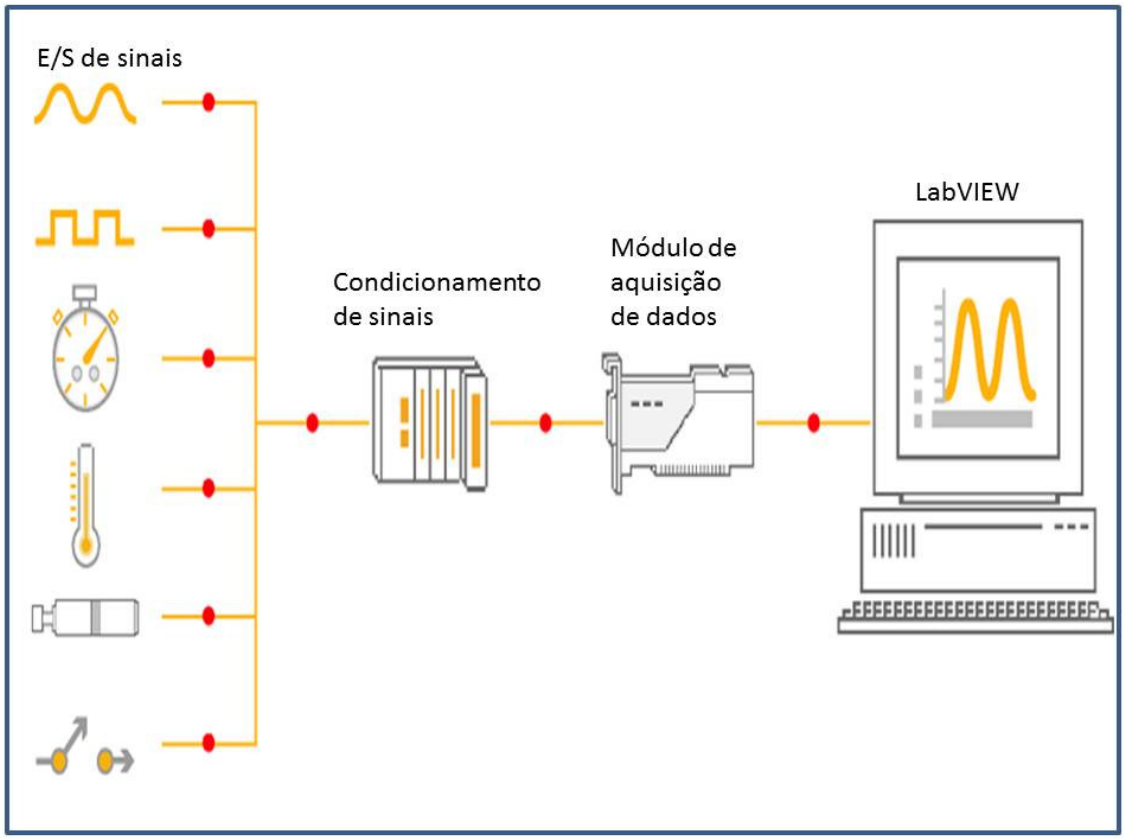

Figura 37-Diagrama de componentes do módulo de aquisição e controle.

Fonte: National Instruments Corporation (2011)

Na figura 38 apresenta-se o NI myDAQ já instalado para controlar o protótipo. Utilizou-se uma entrada do DMM (multímetro digital) com um chicote elétrico que tem um termistor de coeficiente negativo de temperatura, NTC de 10 KΩ na extremidade, conforme montagem da figura 43, a temperatura apresentada no painel do LabVIEW foi aferida com uma pistola de medição de temperatura por infravermelho, InfraThermic modelo DT8380.

Na entrada analógica diferencial AI0 foi conectado um sensor óptico de rotação da Balluff, modelo BOS 18M-PA-1PD-E5-C-S4, mais detalhes nas figuras 39

e 40. Esse sensor utiliza uma tensão de alimentação na faixa entre 10 e 30 Vcc, com uma corrente máxima de consumo de 200 mA. A luz está estabelecida na faixa do infravermelho com um comprimento de onda de 880 nm. Na saída digital D0 do myDAQ, foi conectado um circuito eletrônico de amplificador transistorizado para atracar um relê, que sua vez liga e desliga um ventilador centrifugo, sendo o circuito eletrônico desse amplificador, ativado por uma saída vista na figura 38.

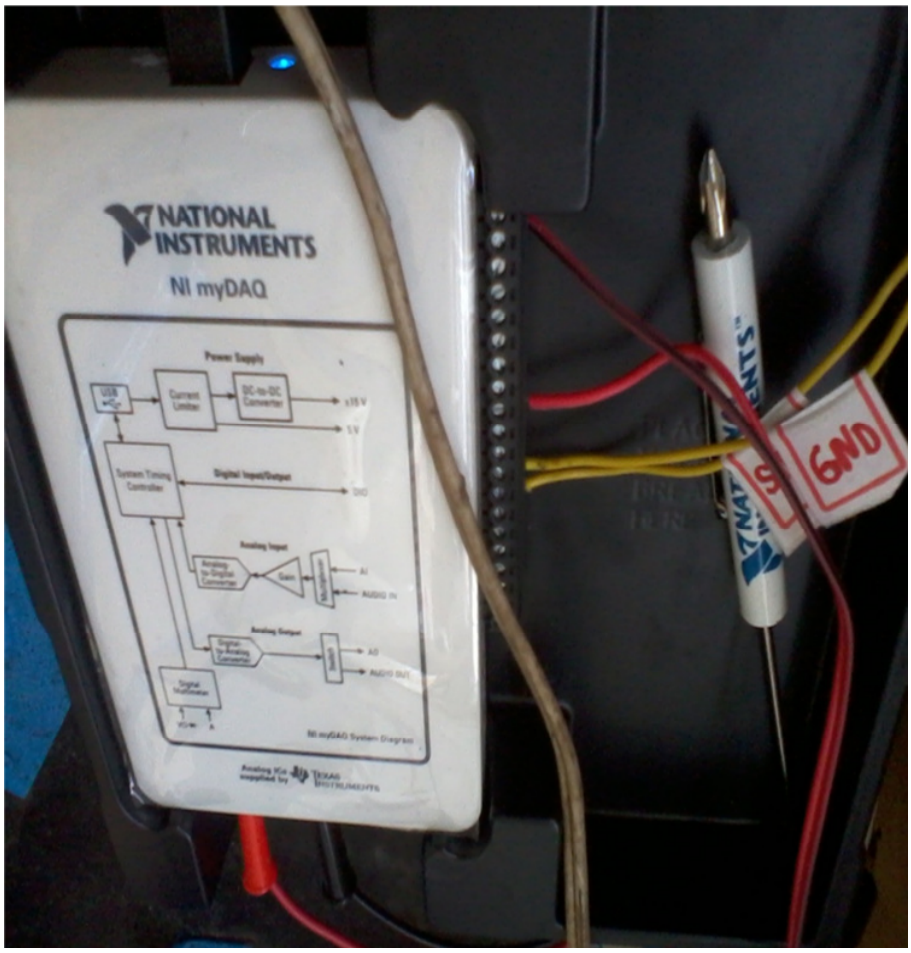

Figura 38-NI myDAQ instalado no protótipo de freio com controle de temperatura.

Fonte: Acervo do autor

Figura 39-Sensor óptico de rotação, do fabricante Balluff.

Fonte: Acervo do autor

O sensor óptico de rotação trabalha com um diodo emissor de luz infravermelha, em uma frequência não visível ao olho humano e um transistor receptor que capta a luz refletida por uma superfície próxima ao sensor, ou seja, no caso a polia do protótipo possui adesivos em seus quatro raios, dessa forma o sensor, em uma volta completa da polia, capta quatro retornos de luz, enviando uma forma de onda quadrada de 10 V de amplitude para uma entrada analógica diferencial do NI myDAQ. O LabVIEW possui um algoritmo que converte cada quatro pulsos em uma rotação, dessa forma faz a conversão no tempo para ter as rotações por minuto, pode-se ver uma parte do programa de conversão. A montagem do sensor óptico no protótipo pode ser vista na figura 40.

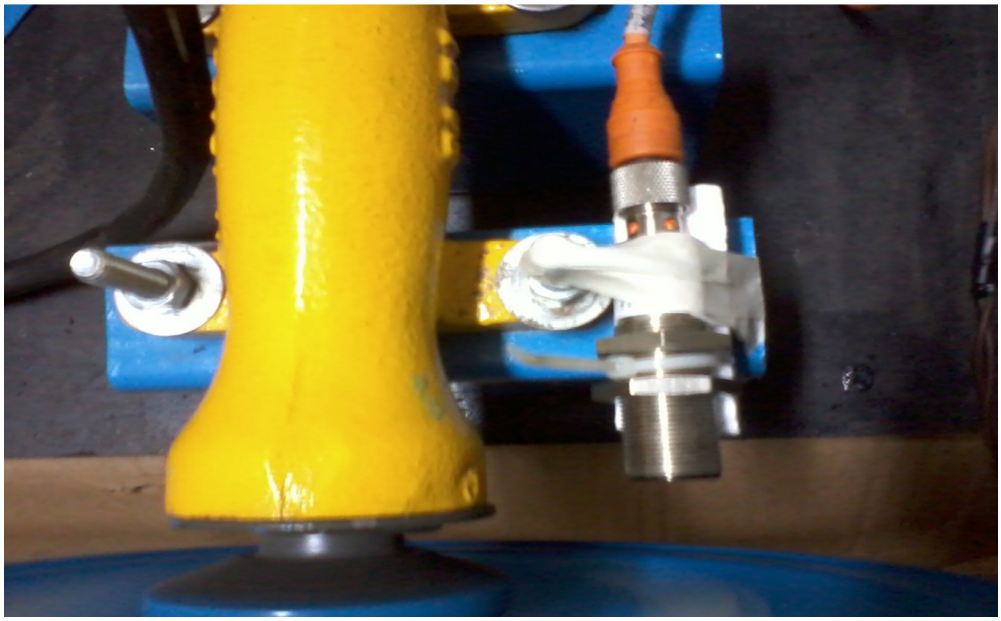

Figura 40-Sensor de rotação montado sobre base de isopor no suporte do eixo de tração.

Fonte: Acervo do autor

Na figura 41 pode-se observar a fitas adesivas montadas em cada raio da polia do eixo de tração, para possibilitar a reflexão da Luz proveniente do sensor Balluff.

Figura 41-Polia do eixo de tração com quatro raios marcados para o sensor de rotação.

Fonte: Acervo do autor

O circuito amplificador, da figura 42, permite atuar uma corrente máxima de 10 A, com tensão de pico de 220 V e cerca de 2000 W de carga, mais do que o suficiente para operar nas típicas tensões automotivas na faixa entre 11 e 28 V de corrente continua.

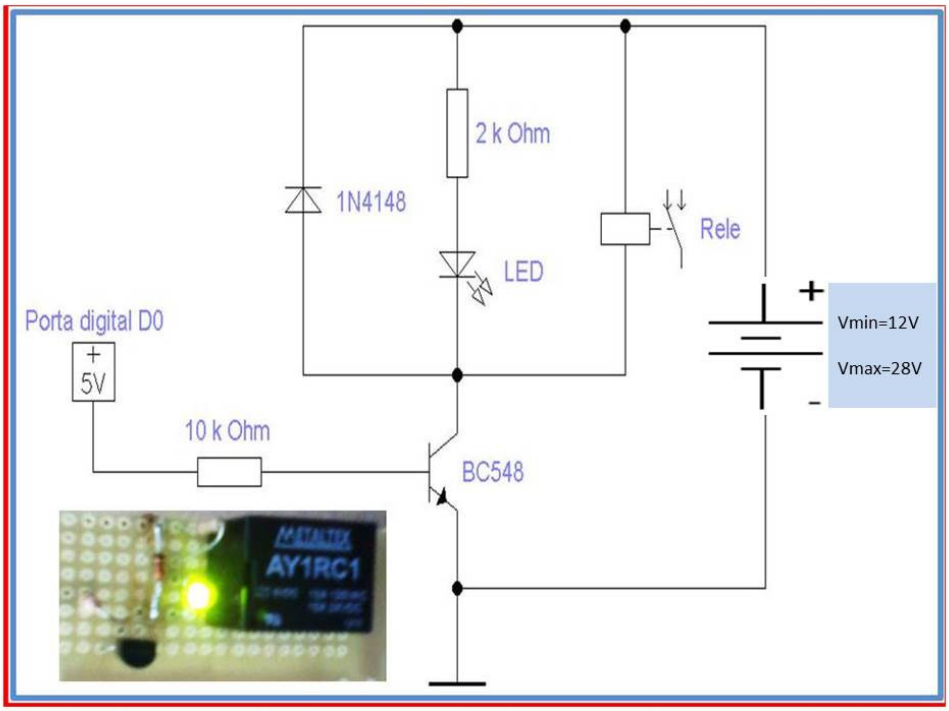

Figura 42-Amplificador transistorizado para ligar e desligar o ventilador centrífugo a partir de saída digital D0 do myDAQ.

Fonte: Elaborado pelo autor

O diodo 1N4148 evita que a tensão inversa da histerese magnética do relê possa danificar o transistor de chaveamento, ou mesmo, retornar para a saída digital do NI myDAQ.

Um diodo LED de cor verde foi instalado em paralelo com o relê, para se poder visualizar quando o ventilador está ativo.

O NTC montado na pinça de freio é apresentado na figura 43, juntamente com um detalhe de conexão elétrica ao myDAQ.

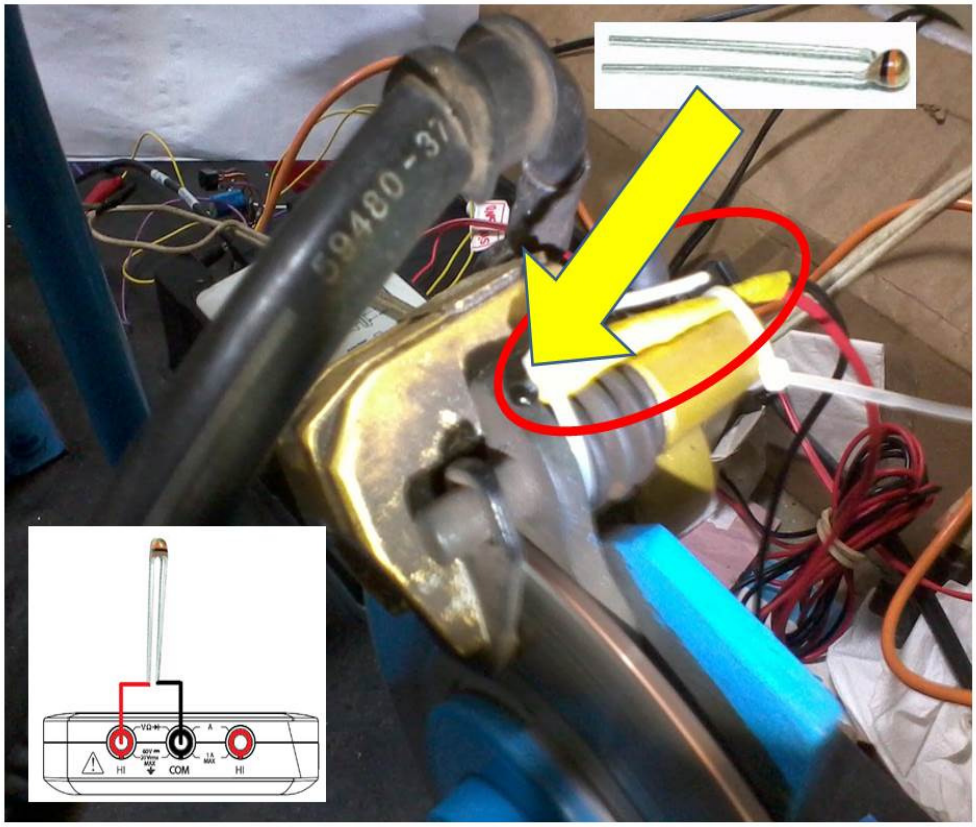

Figura 43-Termistor na pinça de freio do protótipo e detalhe de conexão com o myDAQ.

Fonte: Acervo de autor

O ventilador centrífugo escolhido é de fabricação da Arno, sendo alimentado com 110 V (corrente alternada) e possui uma vazão de ar de 10 L/s (figura 44), que é suficiente para reduzir 5℃ de temperatura do freio em 3 s, esse tempo foi extraído da tabela do experimento na tabela 1. Essa mesma vazão de ar pode ser aplicada em um veículo real, pois deverá reproduzir resultados similares.

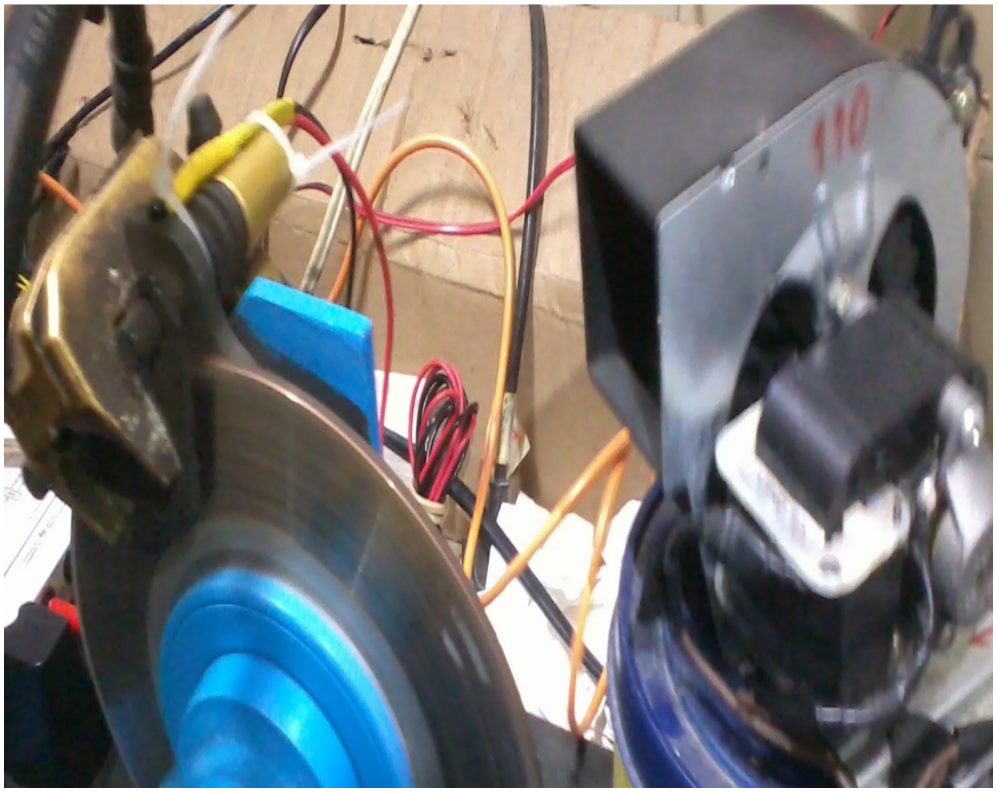

Figura 44-Ventilador centrífugo com vazão de 10 L/s, controlado pelo myDAQ.

Fonte: Acervo do autor

O diagrama elétrico completo aparece na figura 45, onde o controlador de temperatura utilizado no primeiro experimento foi de fabricação da Autonics, modelo TC4S. Com o auxílio de um termopar tipo K, esse módulo captava a temperatura e comandava um contator em sua saída de comando. Um módulo similar com alimentação de 12 V poderia ser utilizado em um automóvel para testes em um veículo real. A figura 44 também contém uma informação muito importante, onde o ventilador joga o fluxo de ar na superfície lateral do disco, seria incorreta a montagem do ventilador de outra maneira, por exemplo, frontal ao disco, o que não iria permitir uma troca eficiente de calor.

A função da remoção de umidade (filme de água) dos discos poderia ser testada também na função automática do aplicativo em LabVIEW, mas isso implicaria na possibilidade da água danificar o protótipo por utilizar madeira em sua estrutura. Ainda instalado em um veículo real, essa função poderia ser implementada com muita facilidade. O comando poderia ser automático via sensor

de chuva e comunicação pela rede CAN na simulação, ou ainda manual, via tensão de ativação dos limpadores de para-brisa pelo motorista atuando no interruptor combinado (alavanca de ativação dos limpadores).

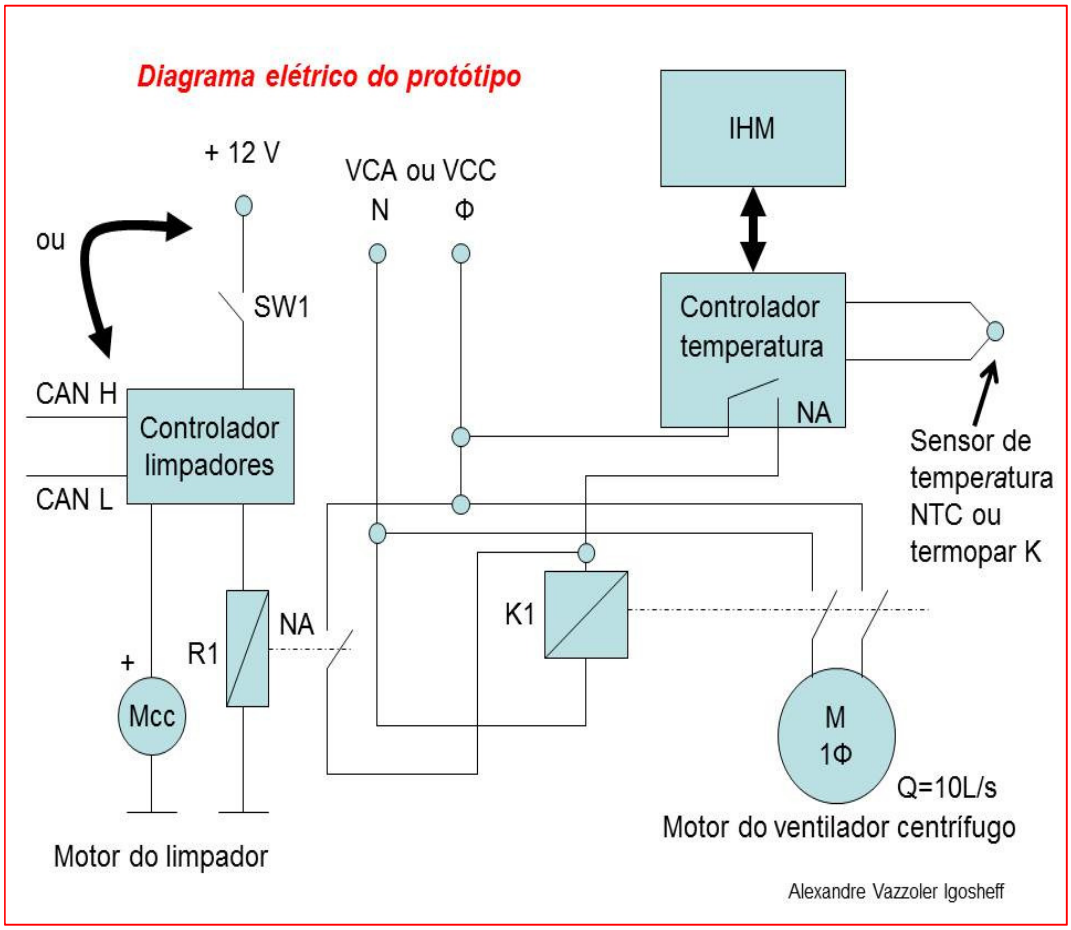

Figura 45-Diagrama elétrico do protótipo de freio com controle de temperatura.

Fonte: Elaborada pelo autor

Os blocos da figuras 46, 47 e 48 mostram de uma forma simbólica, os principais componentes do controle eletrônico de temperatura de freio a disco. A imagem ganhou animação no pictórico do painel de controle do LabVIEW, onde pode-se saber o momento em que o ventilador é ligado e a temperatura real do freio.

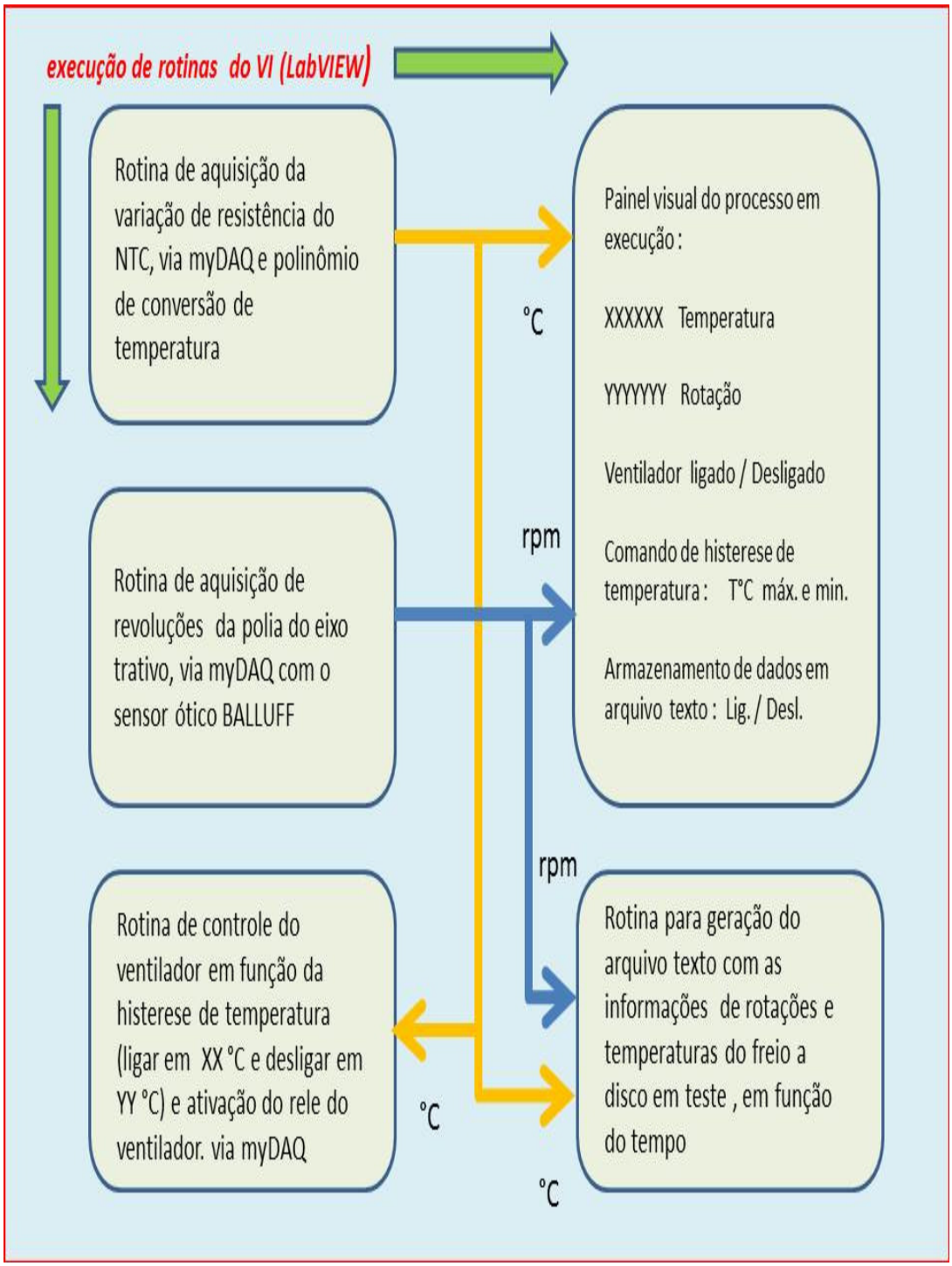

Figura 46-Diagrama em blocos do programa LabVIEW utilizado no protótipo.

Fonte: Elaborada pelo autor

A figura 47 apresenta a interface gráfica ou IHM, onde é possível verificar as variações de rotação do eixo de tração, temperatura da pinça de freio e os seus respectivos gráficos em função do tempo de teste. Nesta interface também é possível verificar se o sistema está em modo automático, controlando a temperatura de forma que não exceda o limite superior ou inferior (faixa) e ainda ativar ou desativar o registro de dados.

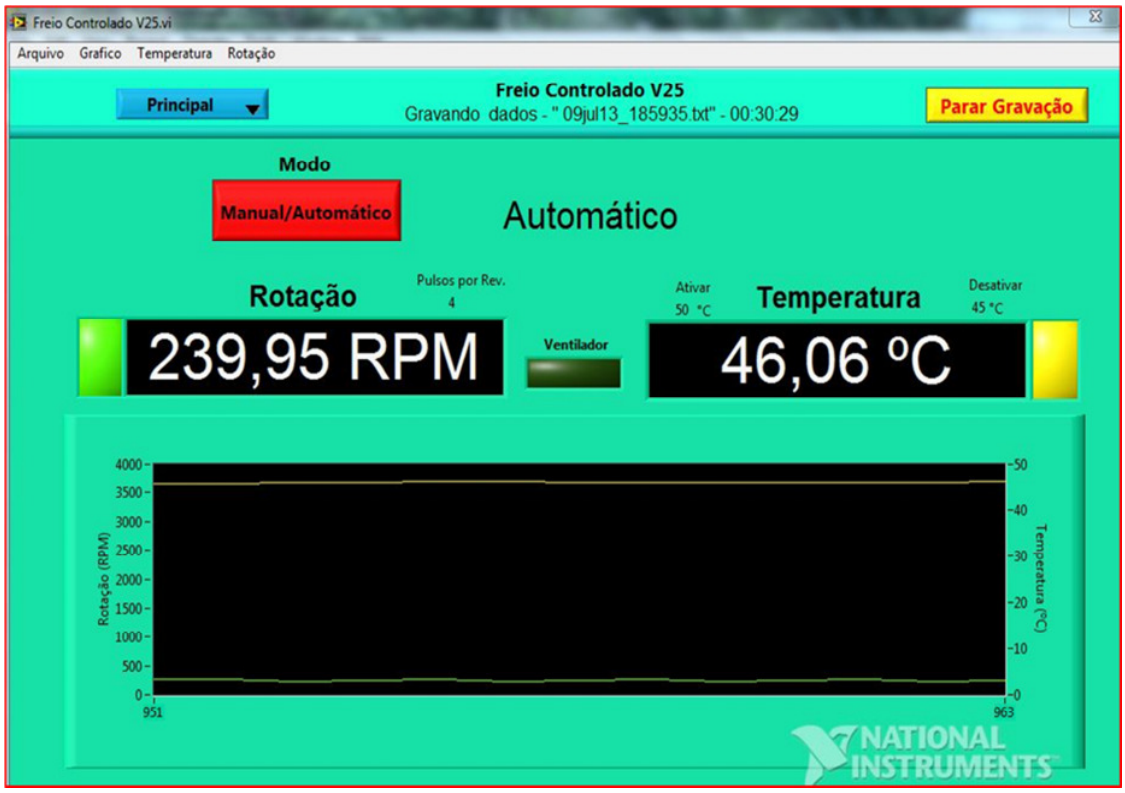

Figura 47-Painel de controle do VI do protótipo de freio a disco com controle de temperatura.

Fonte: Elaborada pelo autor

Na figura 48 está o algoritmo do polinômio de Steinhart-Hart, que permite se obter nos termistores do tipo NTC, uma relação entre a temperatura e a sua resistência interna. Este algoritmo é uma sub-rotina do programa do LabVIEW utilizado no protótipo de freio a disco.

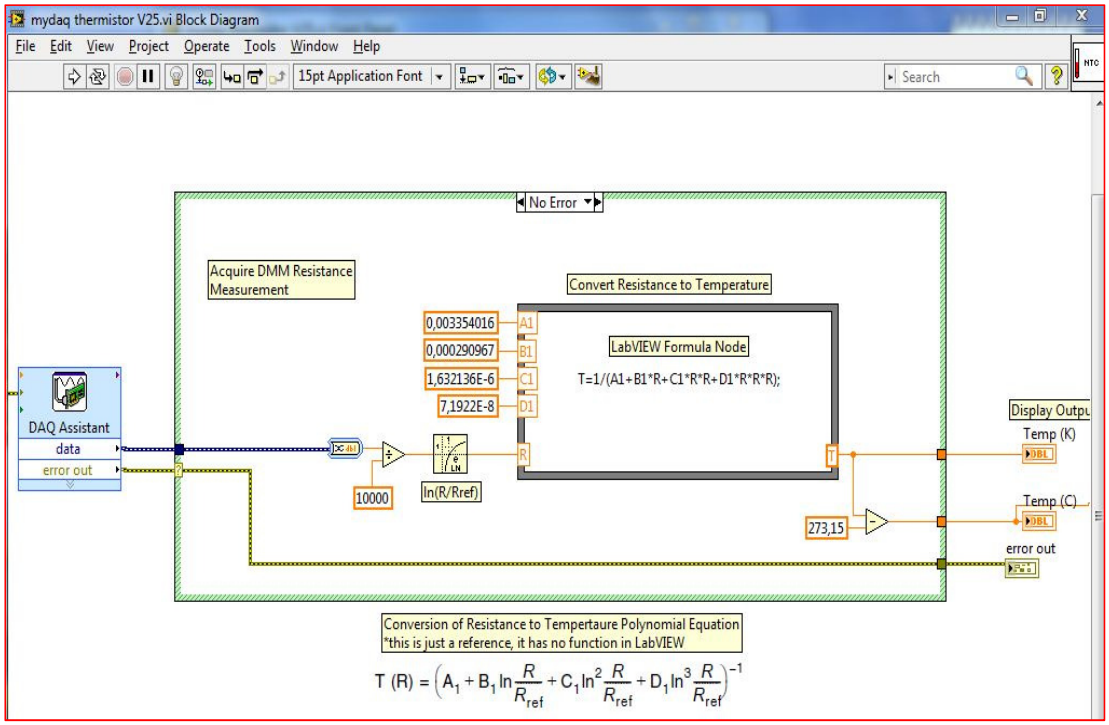

Figura 48-Rotina do LabVIEW para aquisição de temperatura à partir de um termistor de 10 kΩ, montado na pinça de freio e conectado ao myDAQ, utilizando o polinômio de Steinhart-Hart.

Fonte: National Instruments (2010, p.3)

Uma função de grande importância no projeto foi a inclusão de um registrador de dados no LabVIEW, que ao comando do usuário, cria um arquivo do tipo texto, nomeado com a data e hora do início de aquisição de dados, não tendo limitação em tamanho, podendo coletar os dados de tempo, temperatura e rotação por horas. Na figura 49 vê-se parte da rotina implementada.

Os gráficos utilizados nesse trabalho vieram do arquivo tipo texto aberto diretamente no MS Excel, que criou diversas planilhas, como no exemplo da tabela 1 e gráficos do experimento como na figura 58.

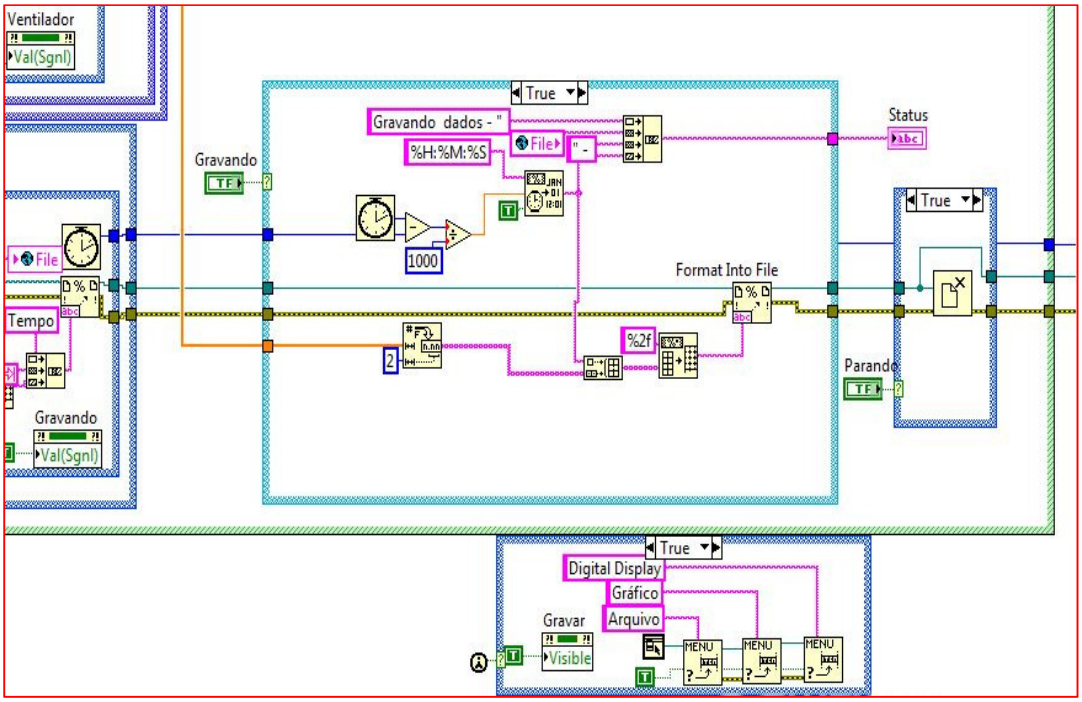

Figura 49-Rotina do registrador de dados para a criação de arquivos texto, com as informações de tempo, temperatura e rotação.

Fonte: Elaborada pelo autor

A rotina de conversão de pulsos para revoluções da figura 50 se mostrou eficaz, porém, uma oscilação de rotação aparece no gráfico da figura 57. Isso pode ser devido à alta sensibilidade do sensor Balluff de rotação e as diferenças de velocidades de conversões analógico para digital, o que acaba por gerar a oscilação da rotação. O fato é que a rotação média no gráfico tem a mesma rotação aferida por um tacômetro digital óptico modelo ICEL TC-5015-420, com medição na mesma polia do eixo de tração do freio. É importante ainda salientar que o NTC está conectado na entrada DMM e o sensor de rotação está conectado na entrada analógica A0 do NI myDAQ. Dessa forma tem-se uma velocidade de conversão de sinal da entrada DMM muito menor do que as velocidades das portas analógicas.

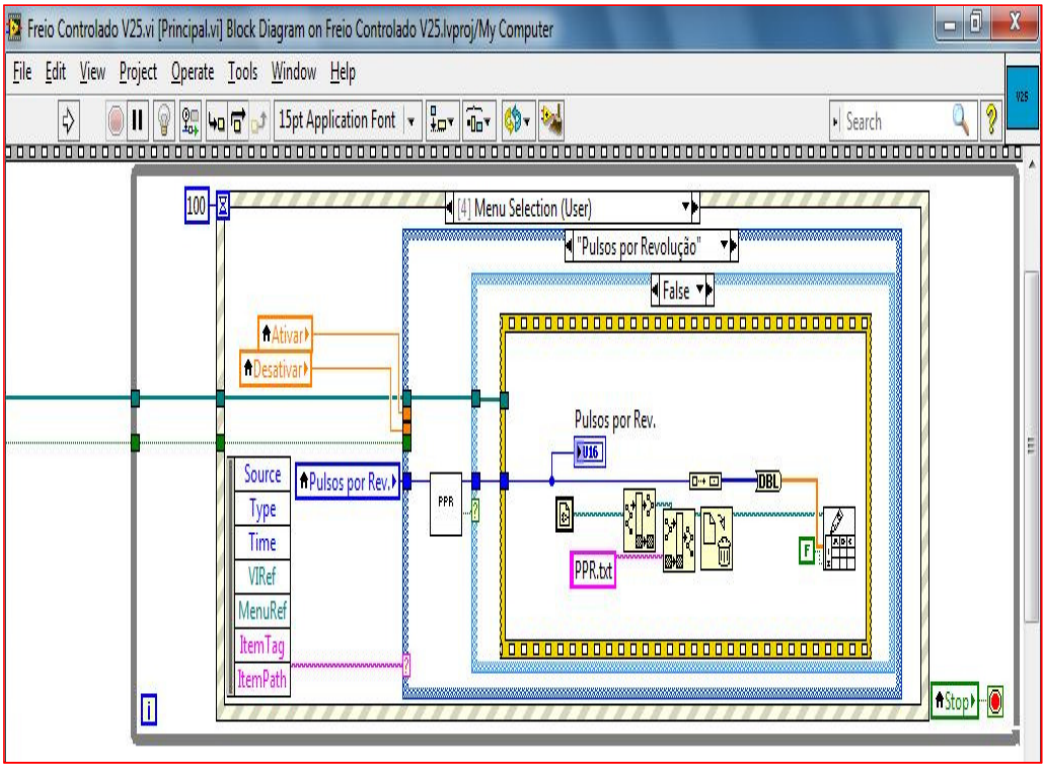

Figura 50-Rotina de conversão de pulsos elétricos por rotação da polia do eixo.

Fonte: Elaborada pelo autor

Sobre a parte mecânica, foi utilizado o freio a disco originalmente aplicado em uma moto *scooter* chamada Suzuki Burgman, este disco possui 200 mm de diâmetro, 8 mm de espessura, com material em ferro fundido. O freio foi ajustado para sempre ter uma pequena pressão de atuação e torque de frenagem, para possibilitar as medições e de forma a não travar o motor elétrico ARNO de corrente alternada monofásica, com 1/3 de hp e rotação livre de 1750 rpm no seu eixo. O freio a disco dessa moto *scooter* é superdimensionado para o protótipo, pois com muita facilidade bloqueia o eixo de tração, lembrando que apenas com um motor elétrico muito potente o experimento poderia atuar na faixa de temperatura em que o *fading* acontece.

Para o propósito do trabalho, que foi mostrar a rápida queda de temperatura devido ao controle eletrônico, o protótipo pode ser o primeiro passo para uma aplicação em um veículo real.

O filme de água, como exemplo na figura 51, presente nos discos de freio durante a chuva, possui um efeito lubrificante, que através do uso de ventilador controlado essa umidade pode ser eliminada, da mesma forma como secam-se as mãos com sopradores elétricos, simplesmente removendo-se a umidade com um fluxo contínuo de ar.

Figura 51-Disco de freio com presença de água em sua superfície.

Fonte: Acervo do autor

O sensor de chuva dos veículos modernos é baseado na refração e reflexão de raios infravermelhos em um para-brisa, alternando a quantidade de luz que chega ao sensor. Devido à maior ou à menor quantidade de gotas de água. Conforme a figura 52, esse sensor está integrado em um módulo eletrônico de controle, que envia os dados de intensidade ou inexistência de chuva via rede CAN, para o módulo eletrônico que comanda os limpadores de para-brisa.

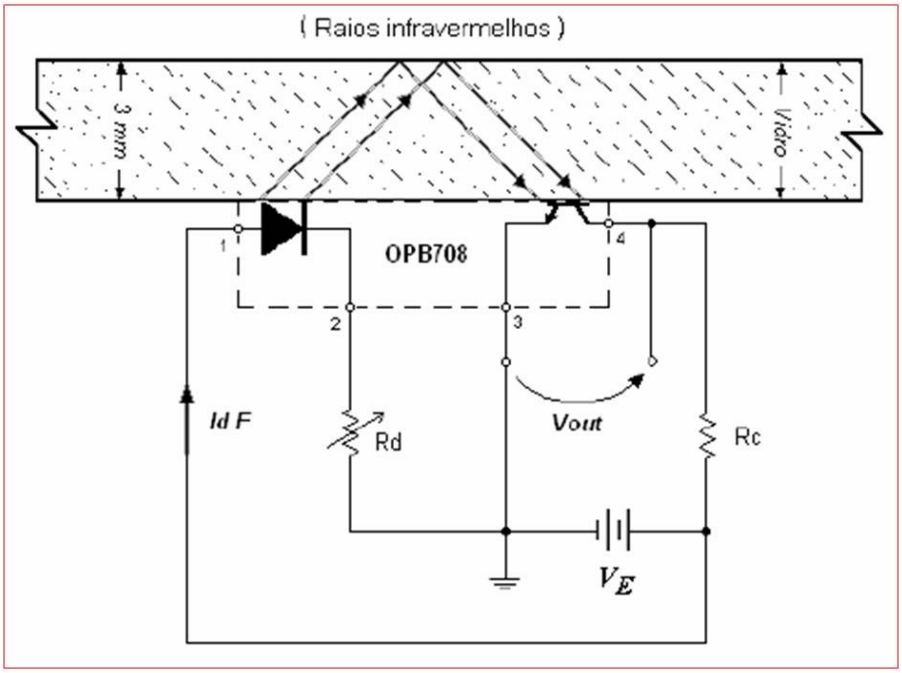

Figura 52-Sensor infravermelho de chuva.

Fonte: Ribeiro e Munin (2006, p.229)

Pode-se obter essa informação da rede e enviar para um microcontrolador via porta serial e em seguida enviar os dados de comando processados via transceptor CAN, como apresentado na figura 53, para uma unidade *driver* dos ventiladores centrífugos e assim ativar os mesmos no momento em que a água aparece no para-brisa do veículo dessa forma removendo a água dos rotores dos freios a disco, evitando assim a redução do coeficiente de atrito pelo efeito lubrificante da água e aumentando a eficiência do freio pela melhoria da resposta dinâmica nas frações de segundos que fazem a diferença em frenagens bruscas. Em um veículo que não possui rede de comunicação CAN, pode-se também adicionar essa função de soprador de água ao freio, simplesmente fazendo com que os ventiladores centrífugos possam ser ativados em sincronismo com a ativação manual pelo motorista do interruptor que aciona os limpadores de para-brisa.

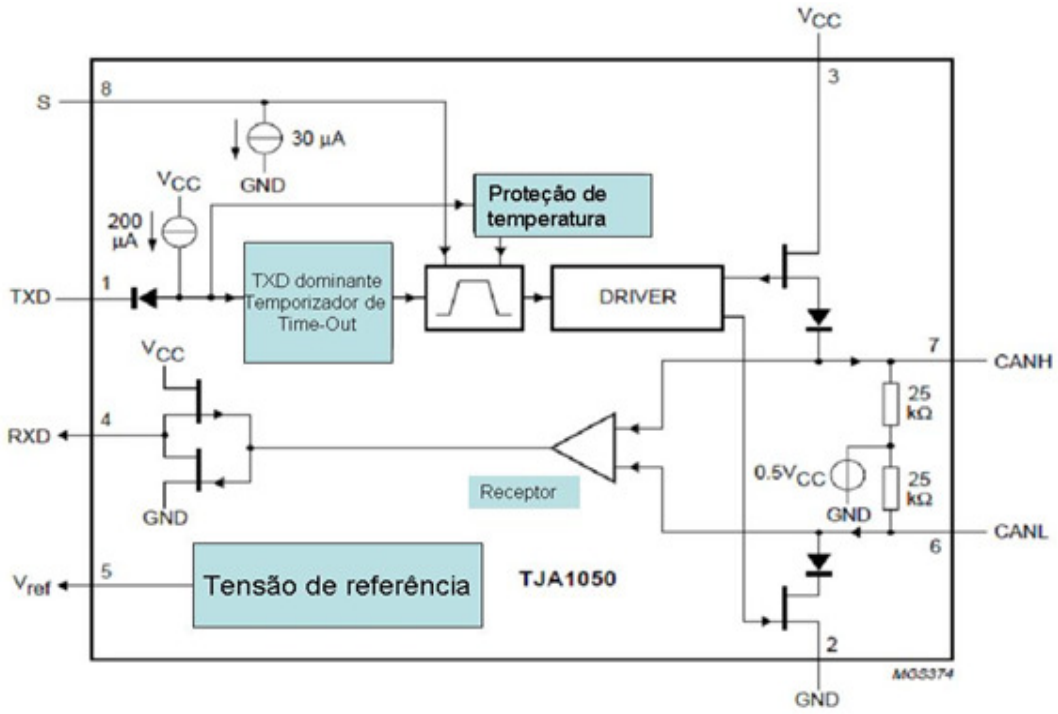

Figura 53-Transceptor CAN de alta velocidade da Philips, modelo TJA 1050.

Fonte: Elaborado com base em Philips (2003, p.3)

A montagem experimental de um elemento de Peltier na pinça de freio foi feita para mostrar a versatilidade de aplicações de sistemas eletrônicos para a redução de temperatura, um ensaio mostrou que a temperatura da pinça de freio caiu de 27℃ para 17℃, de forma muito similar, Hsueh (2012) utilizara um elemento Peltier para reduzir a temperatura de freio a tambor em um automóvel, ele comprovara utilizando um dinamômetro que o veículo obteve uma eficiência maior do freio, devido ao menor aquecimento do mesmo, conforme se pode ver na figura 54. O experimento foi baseado em radiadores montados nas lonas de freio, que tinham um circuito de água associado ao elemento Peltier.

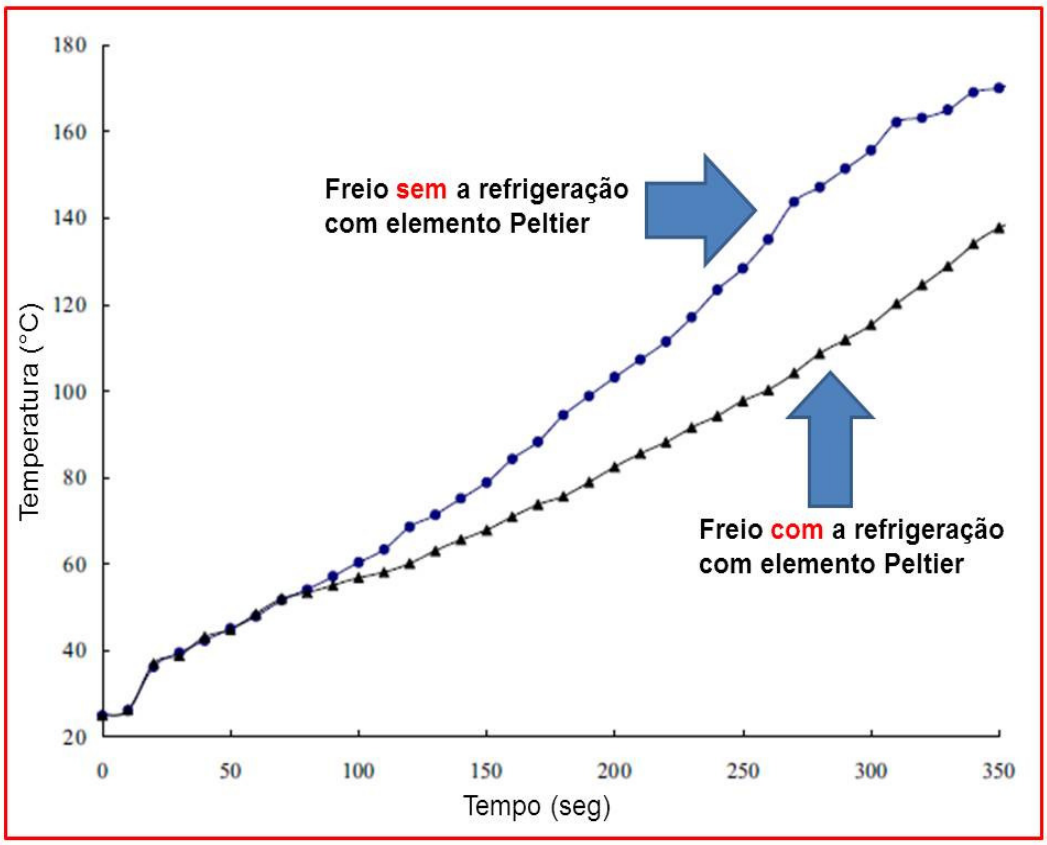

Figura 54-Curva de freio com e sem refrigeração líquida por Peltier.

Fonte: Hsueh (2012)

Na figura 55 um elemento de Peltier está inserido sobre a pinça de freio do protótipo, mostrando a possibilidade de se explorar essa tecnologia para a redução de temperatura do freio, porém, essa aplicação tem o inconveniente de não permitir a remoção do filme de água. O elemento Peltier precisa ser montado com um dissipador de calor, pois se o calor não for removido adequadamente do elemento semicondutor, o mesmo não gerará o frio e poderá ser destruído. Nesse mesmo sentido, foi feito um experimento de resfriamento da superfície da pinça do freio com um elemento Peltier de 12 V e 60 W. O trabalho apresentado no simpósio de automação industrial SAI 2013, conforme Igosheff et al (2013), mostrara um elemento Peltier congelando a base de um artefato de metal, para a redução de temperatura em sistema de arrefecimento. Maiores experimentações são necessárias para a comprovação da utilização desse elemento para a redução da temperatura dos freios à disco, como mostrado na figura 55.

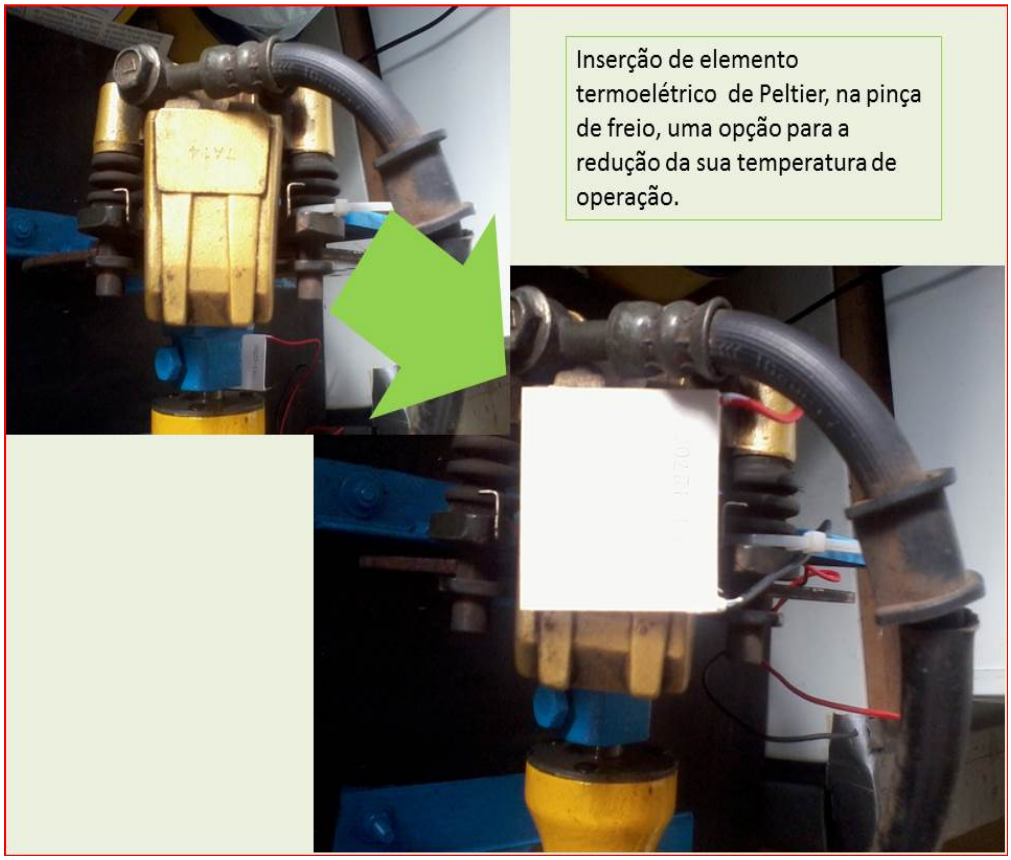

Figura 55-Pastilha de um elemento Peltier colocada sobre a pinça de freio.

Fonte: Acervo do autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Pode-se verificar na figura 56 o resultado da primeira análise de temperatura do freio do protótipo, ainda sem a aplicação de um registrador de dados ou *data logger*, onde se verifica que a rotação se mantém relativamente estável nas temperaturas em que o protótipo estava operando, mesmo quando o ventilador entra em operação. Nesse experimento o freio estava acionado, mas sem o travamento do eixo de tração.

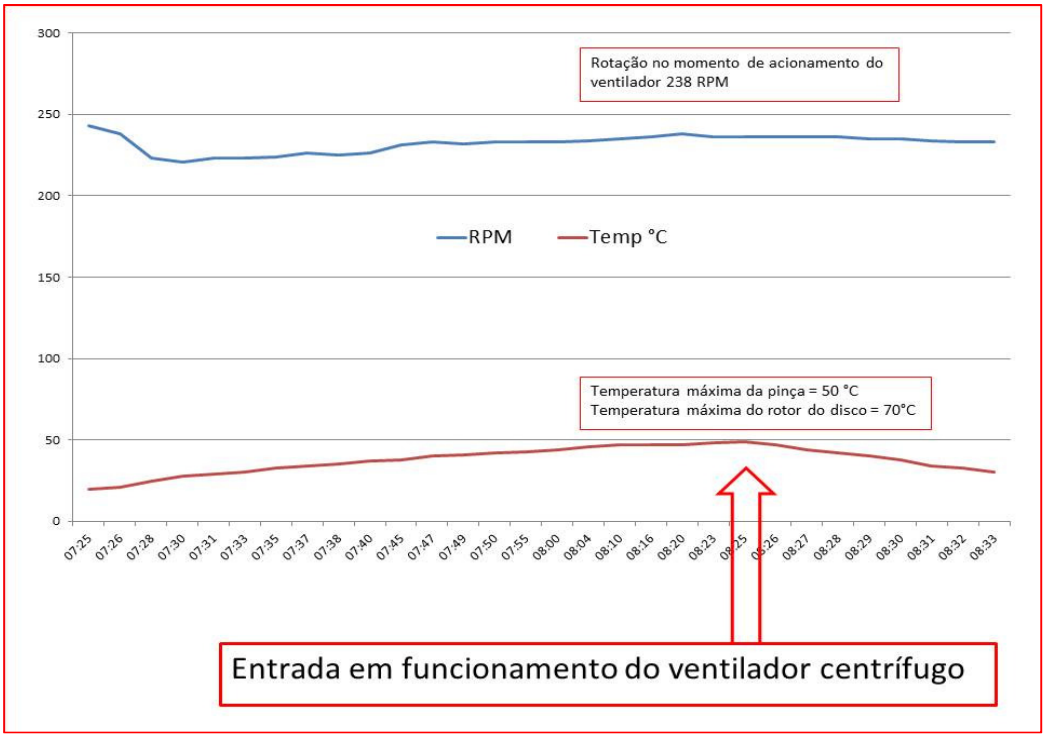

Figura 56- Gráficos de rotação e temperatura do protótipo no primeiro teste de funcionamento.

Fonte: Elaborado pelo autor

O sistema eletrônico de aquisição de dados e de controle de temperatura do freio a disco se mostrou bastante eficiente por produzir grande quantidade de informação e por reduzir rapidamente a temperatura do freio, conforme o gráfico de temperaturas dos testes nas figuras 57 e 58.

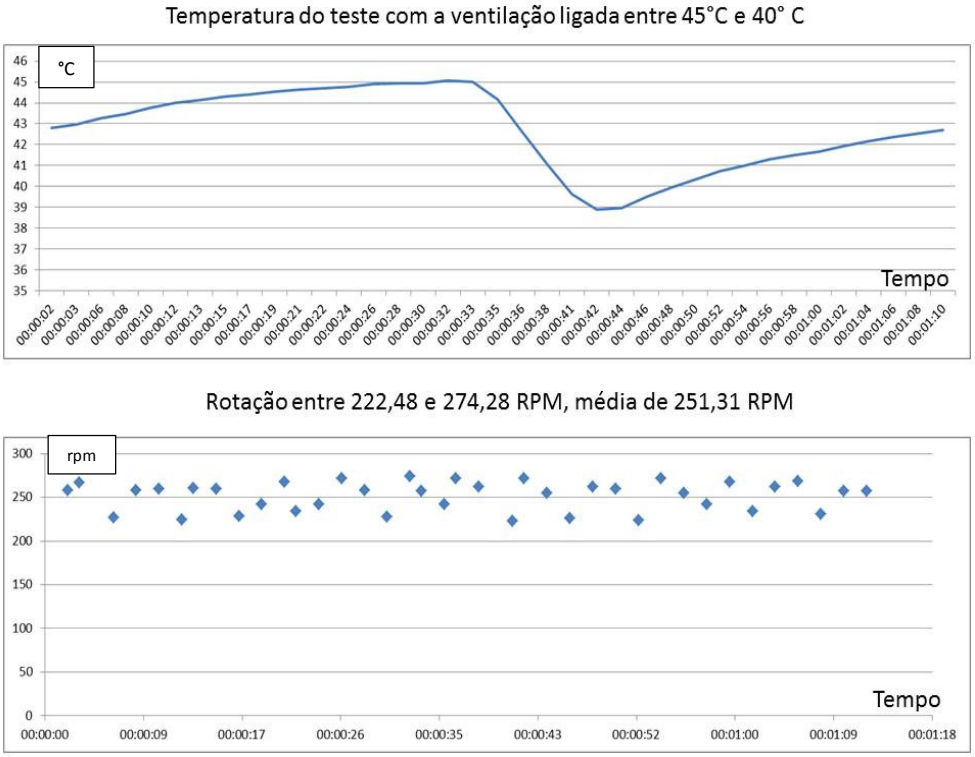

Figura 57-Gráficos gerados a partir de dados do registrador do LabVIEW, durante a execução da rotina de controle de temperatura do protótipo de freio a disco.

Fonte: Elaborado pelo autor

Esses resultados foram publicado nos anais do Congresso SAE 2013, com o número 2013-36-0415. Para o controle de temperatura do freio no protótipo, figura 32, não se utilizou aquele do tipo PID, mas sim, um controlador do tipo liga/desliga, já que diferentemente de um processo onde uma temperatura deverá ser mantida constante o tempo todo, deve-se então considerar uma temperatura máxima que não deverá ser ultrapassada em hipótese alguma. Vale a pena ressaltar que deverá ser levada em consideração a presença de uma histerese no sistema, ou seja, não se deve ligar o ventilador ao atingir a temperatura máxima e em seguida desligar o mesmo, voltando a ligar imediatamente após atingir novamente a temperatura máxima, a resposta será oscilatória e prejudicial aos componentes eletromecânicos do sistema. Pode-se visualizar no gráfico da figura 58, a resposta do controle de temperatura do protótipo, onde o ventilador centrífugo com vazão de 10 L/s liga quando a pinça do freio atinge 45℃ (65℃ no disco) e desliga quando a mesma

atinge 40℃ (60℃ no disco), apresentando uma forma de onda do tipo dente de serra, onde existe um tempo médio de subida de 3 min e um tempo médio de descida de 15 s.

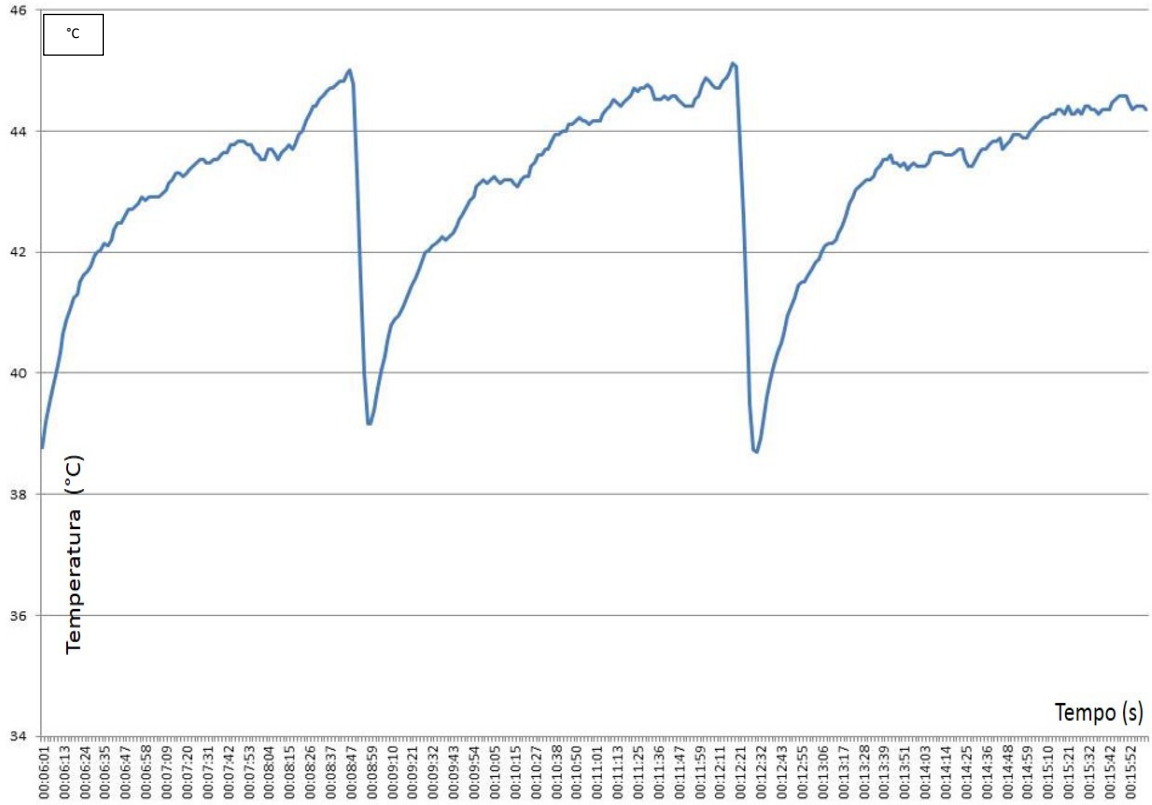

Figura 58-Controlador de temperatura aplicado ao protótipo, com dados de julho de 2013.

Fonte: Elaborado pelo autor

O protótipo construído, apresentado na figura 35, possui uma limitação para atingir temperaturas elevadas, de maneira que se verificou uma temperatura máxima de 80℃ na superfície do disco utilizado, medição feita com uma pistola de medição de temperatura por infravermelho. Essa temperatura ainda está bastante distante da temperatura onde o aço do freio com o coeficiente de atrito de 0,4 começa a entrar em processo de inoperância, reduzindo o poder de frenagem por proporcional redução do coeficiente de atrito. A tabela 1 mostra uma fração dos dados coletados com o uso do módulo de aquisição e controle NI myDAQ, com uma aplicação

rodando em computador externo no LabVIEW 2011 e que possibilitou gerar no Excel os gráficos da figura 55.

Tempo	Rotação(RPM)	Tempo	Temperatura(°C)
00:00:02	258,18	00:00:02	42,81
00:00:03	266,51	00:00:03	42,97
00:00:06	226,85	00:00:06	43,25
00:00:08	258,45	00:00:08	43,48
00:00:10	259,43	00:00:10	43,77
00:00:12	224,82	00:00:12	44
00:00:13	260,42	00:00:13	44,12
00:00:15	259,42	00:00:15	44,29
00:00:17	228,65	00:00:17	44,41
00:00:19	242	00:00:19	44,53
00:00:21	267,66	00:00:21	44,65
00:00:22	234,23	00:00:22	44,71
00:00:24	241,99	00:00:24	44,77
00:00:26	271,69	00:00:26	44,89
00:00:28	257,91	00:00:28	44,95
00:00:30	227,68	00:00:30	44,95
00:00:32	274,28	00:00:32	45,07
00:00:33	257,11	00:00:33	45,01
00:00:35	241,99	00:00:35	44,17
00:00:36	271,7	00:00:36	42,59
00:00:38	261,78	00:00:38	41,05
00:00:41	222,48	00:00:41	39,64
00:00:42	271,66	00:00:42	38,88
00:00:44	254,83	00:00:44	38,97
00:00:46	225,7	00:00:46	39,5
00:00:48	261,7	00:00:48	39,94
00:00:50	259,42	00:00:50	40,34
00:00:52	223,41	00:00:52	40,74
00:00:54	271,66	00:00:54	40,99
00:00:56	255,01	00:00:56	41,3
00:00:58	241,99	00:00:58	41,51
00:01:00	267,77	00:01:00	41,67
00:01:02	234,22	00:01:02	41,94
00:01:04	262,23	00:01:04	42,15
00:01:06	268,34	00:01:06	42,37
00:01:08	230,46	00:01:08	42,53
00:01:10	256,94	00:01:10	42,7
00:01:12	257,11	00:01:12	42,92
00:01:14	239,97	00:01:14	43,09
00:01:16	271,7	00:01:16	43,14
00:01:18	234,22	00:01:18	43,31

Tabela 1-Fração de dados registrados.

Fonte: Elaborada pelo autor

O levantamento de quantas vezes o sistema sobrepõe a temperatura segura de operação do freio pode ser utilizada de diversas maneiras. Existem módulos eletrônicos de manutenção veicular que utilizam essa informação para calcular quando o veículo deverá parar para uma revisão no sistema de freio, evitando surpresas desagradáveis. Uma sinalização contínua dessa informação no painel de instrumentos poderá causar uma saturação de informações e que normalmente as montadoras não utilizam. O sistema pode verificar que não consegue reduzir a temperatura, ou que isso está com periodicidade anormal, que aí sim justificaria uma advertência no painel de instrumentos. Da mesma maneira na fase de desenvolvimento dos freios, esse sistema poderia fazer um levantamento do número de vezes que a unidade de controle do freio entra em operação e a periodicidade de sobre temperatura, essa informação também poderia ser utilizada para o planejamento de serviço e revisão pelo concessionário.

Para o teste de remoção do filme de água que foi realizado, verificou-se que o sistema de ventilação forçada praticamente elimina toda a umidade quando acionado pelo modo manual na simulação com o LabVIEW. A mesma ação ocorreria caso um sensor de chuva acusasse a presença de água no modo automático. Isso poderia ser integrado na rede CAN do veículo.

Já o elemento Peltier, alternativamente, foi testado em uma montagem experimental com dissipador de calor e ventoinha, onde, desde o momento em que foi alimentado com uma fonte de 12 V, a temperatura superficial passou da ambiente, que no momento do teste era de 27℃, até uma temperatura estável de 17℃. O elemento Peltier tem uma possibilidade promissora de alternativa tecnológica para a redução de temperatura para os freios.

5 CONCLUSÃO

Observando-se a montagem do sistema mecânico, o desenvolvimento da aplicação com o LabVIEW e a análise dos resultados no protótipo de freio a disco com controle eletrônico, foi possível verificar que a aplicação de um ventilador centrífugo para o resfriamento forçado e a remoção do filme de água no freio a disco mostrou-se muito eficaz.

A queda de temperatura apresentou-se rápida e eficiente para a operação do mesmo, onde tal efeito será extremamente eficaz, como por exemplo, em um caminhão carregado descendo uma serra, onde as temperaturas do freio podem facilmente ultrapassar 400°C, mas com uma ação rápida de ventiladores centrífugos controlados para a redução de temperatura, tornaria essa operação muito segura e sem quaisquer riscos para os ocupantes do veículo, ou mesmo, para os demais veículos e pedestres nas proximidades.

Assim, pode-se concluir que é possível uma melhoria na eficiência de freios a disco, mantendo a sua temperatura dentro de uma faixa adequada e a remoção do filme de água nos dias de chuva, com o auxílio de uma unidade eletrônica para o controle. Esse sistema poderia facilmente se integrar à rede de módulos eletrônicos embarcados de qualquer veículo automotor e contribuiria como recurso tecnológico com a facilidade de implementação de alarme para o condutor, além da possibilidade de um histórico com registros de dados do modo de operação veicular, que poderia ser utilizado para efeitos de garantia ou no próprio desenvolvimento do produto. Esse recurso pode ser implementado em veículos com sistemas de freio convencionais, assim como, em veículos que possuam a tecnologia do ABS.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Como proposta para a continuação desse estudo, sugere-se a aplicação desse sistema de controle em um veículo real para extrapolar as suas possibilidades, inclusive a ação automática dos ventiladores na umidade durante a chuva.

Uma sugestão de continuidade de estudos nesse assunto deve ser o projeto de um sistema de borboletas instaladas em tubos de transporte de ar para os discos de freio em um veículo a combustão, onde a aplicação de uma pequena turbina instalada internamente no tubo de saída de gases da combustão, seria capaz de girar um eixo de tração de um ventilador centrífugo mecânico. Com isto não se precisa gastar Watts de potência elétrica do alternador do veículo com os motores elétricos dos ventiladores centrífugos. O sistema de controle poderia apenas atuar em solenoides das borboletas nas tubulações do fluxo de ar para resfriar o freio a disco ou, dependendo da temperatura do freio, direcionar o fluxo de ar para a atmosfera.

O elemento Peltier é outra tecnologia que deveria ser mais explorada em outra pesquisa sobre redução de temperatura de freios. Ele poderia ser aplicado diretamente na pinça de freio, porém, baseado em experimento como o de Hsueh (2012), um elemento Peltier também poderia resfriar a água de um circuito composto por tubos de Tecalon, passando por pequenos radiadores nos freios e reduzir a temperatura dos mesmos.

O campeão da Fórmula 3 Sul-Americana classe Light no ano de 2005, Paulo J. Meyer, se mostrou bastante interestado em instalar o sistema proposto nesse trabalho, em um carro de competição, pois é onde a temperatura se torna uma grande vilã para se lograr a vitória.

REFERÊNCIAS

ANJOS, Eduardo G.A.F. **A evolução da eletrônica embarcada na indústria automobilística brasileira.** São Caetano do Sul: Instituto Mauá de Tecnologia, 2011

ARIAS-PAZ, Manuel. **Manual de automóveis**. São Paulo: Mestre Jou, 1970.

ARTHOMOBILES.FR.**Un journée enbord de piste**. 8 nov. 2008. Disponible: < http://www.arthomobiles.fr/>. Accès:15 jui. 2011.

ÁVILA, Paulo Urbano. **Relatório de experimentos com freios de veículos comerciais**. São Paulo: Mercedes-Benz, 2012.

ÁVILA, Paulo Urbano; LOMBARDI JR., Arley de Barros. **Termometria**: conceitos e aplicações. São Paulo: Editora Érica, 2010.

BALLUFF. **Sensores ópticos**. São Paulo, 2013

BINDER. **Thermoelectric cooling technology.** Germany: 2013

BOSCH, Robert. **Gasoline systems**. 2010. Available in: <http://www.bosch-presse.de/presseforum/details.htm?txtID=6244&locale=en>. Acesso em: 20 jul.2013.

CANALE, Antônio Carlos. **Automobilística, dinâmica e desempenho**. São Paulo: Érica, 1989.

CLASSIC DESIGN CONCEPTS. **Mustang brake cooling duct kit.** Disponível em: <http://shop.classicdesignconcepts.com/brake-duct-cooling-kit/> . Acesso em 09 de Novembro de 2013.

DAIMLERCHRYSLER.**Trucks - Diagnostic technicians -Elektric**.5 th. Germany: Global Training, 2004.

DAIMLERCHRYSLER. **Módulos eletrônicos – Teoria**. Brasil: Global Training, 2005.

DEMERS, Joseph R., **Development of the fade stop brake cooler**, Los Angeles, June 24th, 2005.

FRANÇA, Fernando A**. Instrumentação e medidas: grandezas mecânicas**, UNICAMP, Campinas, 2007.

FRAS-LE. Características dos materiais de atrito. In: **Manual técnico linha pesada**. 2012 P. 5-6. Disponível em: < http://www.fras-le.com.br/pt/products/manuals/ >. Acesso em: Agosto de 2013

FREIAR. **Veículo em piso molhado tem a resposta do freio retardada em frações de segundos, devido ao filme de água nos discos de freio.** Disponível em: <www.freiar.com.br >. Acesso em: 30 jul. 2013.

GUIMARÃES, Alexandre de Almeida. **Eletrônica embarcada automotiva**. São Paulo: Érica, 2007.

HSUEH, M.H. **The cooling device of drum brake system by using thermoelectric cooling module.** Taipei, Taiwan: Technology and Science Institute of Northern Taiwan, IEEE, 2012

SZYMANSKI, Thiago. **20 frases inspiradoras de Streve Jobs**.6 out. 2011. Disponível em: <http://www.tecmundo.com.br/steve-jobs/14052-20-frases-inspiradoras-de-steve-jobs.htm >. Acesso em: 20 ago. 2012.

IGOSHEFF, Alexandre Vazzoler, et al. **Sistema didático de arrefecimento automotivo para simulação de altas e baixas temperaturas (SIDAR)**, São Paulo, SAI 2013.

IGOSHEFF, Alexandre Vazzoler; SINOHARA, João. Freio a disco com controle eletrônico de temperatura. **SAE Technical Paper,** São Paulo, n. 36-0415, 2013

INFANTINI, Mauricio B. et al. Overheating of drum brakes in downhills. **SAE Technical Paper**, Washington, n. 01-2560, 2006.

KACHROO, P. **Nonlinear control strategies and vehicle traction control**, Ph.D. dissertation, Univ, California, Berkeley, USA, 1993.

LENNON, William K.; PASSINO, Kevin M. **Intelligent Control for Brake Systems**. IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol.7, No. 2, USA, March 1999.

LIMPERT, Rudolf. **Brake design and safety**. 2. ed. Washington: Society of Automotive Engineers International, 1999.

LOH, Wei-Yi et al. Dynamic modeling of brake friction coefficients. **SAE Technical Paper**, Washington, n. 01-2753, 2000.

MARTELLO FILHO. Ventura Raphael. **Acidentes causados por superaquecimento de freios de caminhão**. 19 abr. 2012. Disponível em:< http://pt.scribd.com/doc/90061842/Fading-Ventura-Rapahel>. Acesso em: 20 ago. 2012.

MERCEDES-BENZ USA, LLC.**512 HO Networking (CooksonI).**6 may. 2003. Available in< http://www.mercedessechstore.com/pdfs/512_Maybach/512%20HO%20 Networking%20(CooksonI)%2006-05-03.pdf >. access in:30 july. 2013.

NAGAYOSHI, Teruyuki; INOUE, Mitsuhiro; HARA, Yasuhiro. Groan caused by generation of striped pattern of transfer film on a ventilated rotor, **SAE Technical Paper**,Washington, n. 01-2788, 2004.

NARENDRA K.S., BALAKRISHNAN J., **Improving transient response of adaptative control systems using multiple models and switching**, IEEE Trans. Automatic Control, Vol.30, 1994

NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION. **Measure Temperature using 10kΩ Thermistor, myDAQ, and LabVIEW**. July. 2010. Available in:< http://zone.ni.com/devzone/cda/epd/p/id/6408>. access in: 20 ago. 2012.

_____. **NI myDAQ. user guide and specifications**. Jan. 2011. Available in: < http://mil.ufl.edu/3111/docs/myDAQ/myDAQ_user_guide_and_specs.pdf >. access in: 20 ago. 2012.

NICE, Karim. **Como funcionam os freios a disco**. Disponível em:<http://carros.hsw.uol.com.br/freios-a-disco1.htm >. Acesso em: 30 jul. 2013.

PHILIPS. **Integrated circuits**: data sheet - TJA 1050. 23 oct. 2006, Available in: < http://www.nxp.com/documents/data_sheet/TJA1050.pdf >. Acesso em: 20 ago. 2012.

PROJECT-MU. **Passagem de ar pelo interior de um disco de freio ventilado.** Disponível em: <www.project-mu.com.au> Acesso em 03/10/2013

RASZL, Guilherme. **Teorias sobre freios**. São Bernardo do Campo Editora FEI, 1995.

RIBEIRO, Edvaldo Rodolfo do Amaral; MUNIN, Egberto. Automatização de limpadores de para-brisa pelo princípio da reflexão óptica. INIC ENCONTRO LATINO AMERICANO DE INICIAÇÃO CIENTIFICA, 10., São José dos Campos-SP, 2006.; **Trabalhos apresentados...** São José dos Campos: Univap, 2006. p. 228-231.

SANTOS, Max Mauro Dias. **Redes de comunicação automotiva**. São Paulo: Érica, 2010.

SCHUETZ, Thomas. Cooling analysis of a passenger car disc brake. **SAE Technical Paper**, Washington, n. 01-3049, 2009.

SHIGLEY, Joseph E. et al. **Projeto de engenharia mecânica**. 7. ed. São Paulo: Bookman, 2008.

SUN, Hongguang. Sensitivity study on brake cooling performance. **SAE Technical Paper**, Washington, n. 01-0694, 2006.

YU, Cheng-Ching. **Autotuning of PID controllers**.2 ed., Taiwan: Springer, 2006.

VOLKSWAGEN do Brasil. **Engenharia de *powertrain–Gol Total Flex***. Janeiro 2010. Apostila.

VOLKSWAGEN AG. **Data Exchange On The CAN Bus I.** Outubro 2011. Apostila.

APÊNDICE A - LINHA DE TEMPO DA ELETRÔNICA EMBARCADA

1902 – Fornecimento do primeiro magneto de alta tensão e da primeira vela de ignição.

1925 – A primeira proposta de ignição por bateria.

1939 – Primeiro sistema de injeção de gasolina é testado em um avião alemão pela Robert Bosch.

1951 – Apresentação da injeção mecânica de gasolina em exposição de automóveis de Frankfurt.

1967 – Primeira norma sobre gases de escape surge nos EUA e a introdução do primeiro sistema de injeção eletrônica D-Jetronic (Bosch) com regulação por pressão no coletor de admissão.

1973 – Crise energética e a redução do consumo de gasolina torna-se o objetivo de desenvolvimento mais importante. A Bosch introduz os sistemas de injeção L-Jetroni e K-Jetronic (figura 60).

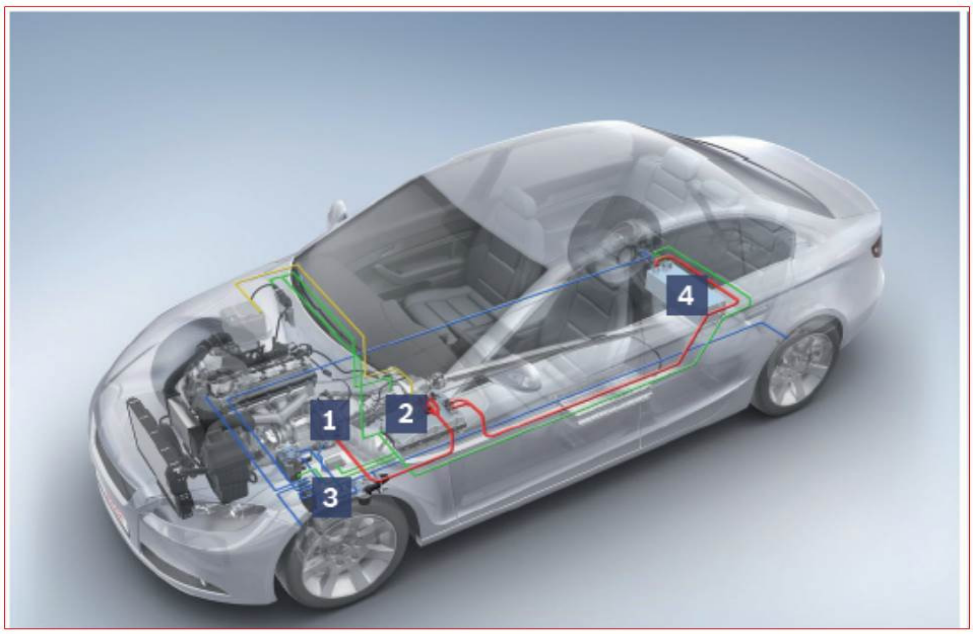

Figura 59-Início da eletrônica embarcada.

Fonte: Bosch (2010)

1979 – Introdução no mercado mundial do Motronic, esse sistema mostrou-se único devido ao processamento digital de muitas funções do motor. Combina o L-Jetronice a ignição eletrônica mapeada. Também foi o primeiro microprocestador em um automóvel.

1981 – Introdução no mercado mundial do LH-Jetronic, em vez de um medidor de fluxo de ar de borboleta, o sistema básico L-Jetronic foi equipado com um medidor de massa de ar de fio quente.

1982 – Introdução no mercado mundial do KE-Jetronic, o K-Jetronic ampliado por um circuito de regulagem eletrônico e sonda Lambda, foi utilizado pela primeira vez como KE-Jetronicem um veículo de série.

1984- Invenção do sistema anti-bloqueio das rodas ABS pelas empresas Mercedes-Benz e Robert Bosch.

1987 – Introdução no mercado mundial do Mono-Jetronic, que é um sistema de injeção central especialmente econômico, que possibilitou inclusive que veículos menores fossem equipados com injeção eletrônica.

1988 – Introdução no mercado do Mono-Motronic, como desenvolvimento posterior de Mono-Jetronic, chegou-se ao Mono-Motronic com uma ignição eletrônica mapeada, assim como a aplicação de uma nova família de microprocestador. Também nesse período o mercado alemão recebe o sistema de injeção ME 7.5.10 baseado em torque e o primeiro sistema de injeção eletrônica de combustível aparece em um veículo brasileiro (Volkswagen GOL – GTI com LE-Jetronic e EZK).

1989 – Criação do acelerador eletrônico EGAS. Os sistemas com EGAS detectam o desejo do motorista através de um sensor localizado no pedal do acelerador. A unidade de comando Motronic avalia o sinal do sensor e regula a borboleta acionada por um motor, levando em conta outros dados do veículo e do motor.

1991- Invenção do sistema anti-patinação das rodas ASR (*Automatic Slip Regulation*).

1993 – Sistema sem retorno de combustível e novos desenvolvimentos de *hardware* e *programa*. Primeiro motor com turbo compressor com injeção de combustível no Brasil (FIAT Tempra Turbo – M 1.5.2). Início comercial de aplicação

das redes de comunicação embarcadas, o automóvel Mercedes-Benz Classe S (projeto W140) é o primeiro veículo do mundo a utilizar a rede CAN.

1995-Invenção do sistema eletrônico de tração *Electronic Traction System* (ETS) pela Mercedes-Benz.

1996 - Invenção do programa eletrônico de estabilidade do veículo ESP *Electronic Stability Program* (ESP) pela Mercedes-Benz e Robert Bosch.

1997 – Utilização crescente de módulos de aspiração, que são conjuntos pré-montados, compostos pelo coletor de admissão incluindo as válvulas de injeção, corpo de borboleta, regulação de pressão, etc. Aplicação de unidades de controle em transmissão automática, suspensão, freio, conforto, segurança ativa e passiva, etc.

1998 - Invenção do sistema assistente de frenagem *Brake Assist System* (BAS) pela Mercedes-Benz.

1999 – Surgem os sistemas de injeção direta de combustível em motores a gasolina. Aplicação em larga escala da rede CAN em automóveis.

2000 – Introdução no mercado mundial da injeção direta de combustível Motronic MED 7. O sistema Motronic MED 7 com controle baseado em torque consegue o mais baixo consumo com a mais alta dinâmica possível. Os automóveis começam a ter integração do carro com equipamentos de informática e telefonia, redes de áudio e vídeo permitem videoconferências com o veículo em deslocamento e a diagnose veicular remota em caso de avarias ou emergências.

2003 – Lançamento no Brasil do sistema SFS/Flex-Fuel (figura 61), baseado em torque (ME 7.5.10). Na Alemanha a Mercerdes-Benz lança o primeiro veículo com freios controlados por eletrônica, chamado de *Sensotronic Brake Control* (SBC).

2004 – Apresentação do protótipo da tecnologia *Tri Fuel* com motor turbo (*Turbo Tri Fuel*).

2005 – Apresentação no Brasil da nova tecnologia de partida a frio com sistema de aquecimento do combustível na galeria.

2009 – Veículos brasileiros com integração entre a rede interna embarcada e recursos de informática, navegação, telefonia e áudio.

Figura 60-Módulo de gestão do motor flexível (bicombustível) de automóvel Volkswagen.

Fonte: Volkswagen do Brasil (2010, p.9)

SIMULAÇÃO DE FRENAGEM DE EMERGÊNCIA COM MODELO NO MATLAB SIMULINK™

Na figura 62 pode-se ver uma das rotinas do modelo matemático de veículo concebido por Canale (2012), que simula um caminhão completo em funcionamento, a simulação se inicia com o seu motor ligado registrando rotações e um movimento em deslocamento acelerado com velocidade crescente, após alguns ciclos de simulações desacelera em uma frenagem de emergência, isto faz a parada total do veículo.

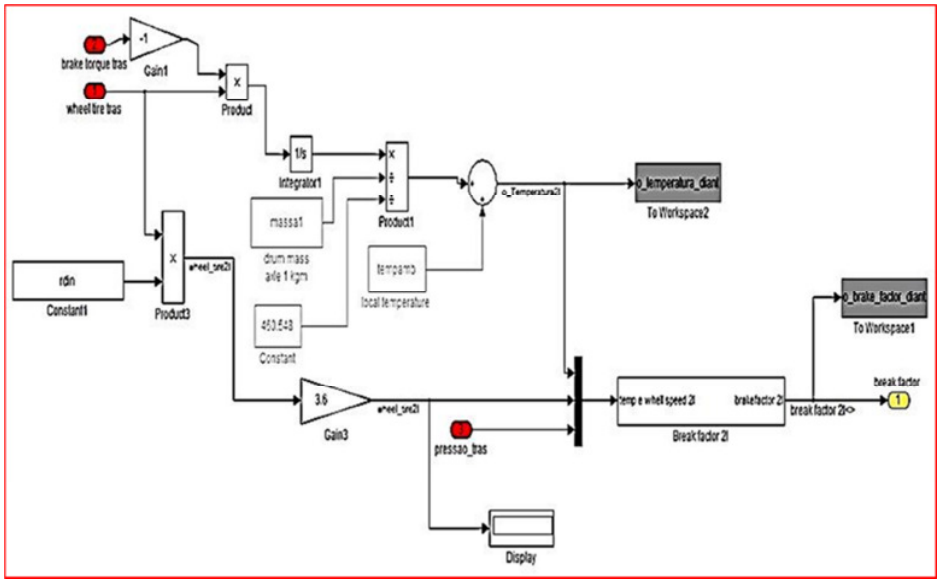

Figura 61-Blocos de Simulink do modelo de freio de caminhão.

Fonte: Elaborado pelo autor com base em modelo criado pelo Prof. Antonio Carlos Canale, 2012

Essa aplicação complexa permitiu com uma das funções do programa Matlab, plotar um gráfico de aumento da temperatura do freio em emergência, conforme mostra a figura 63.

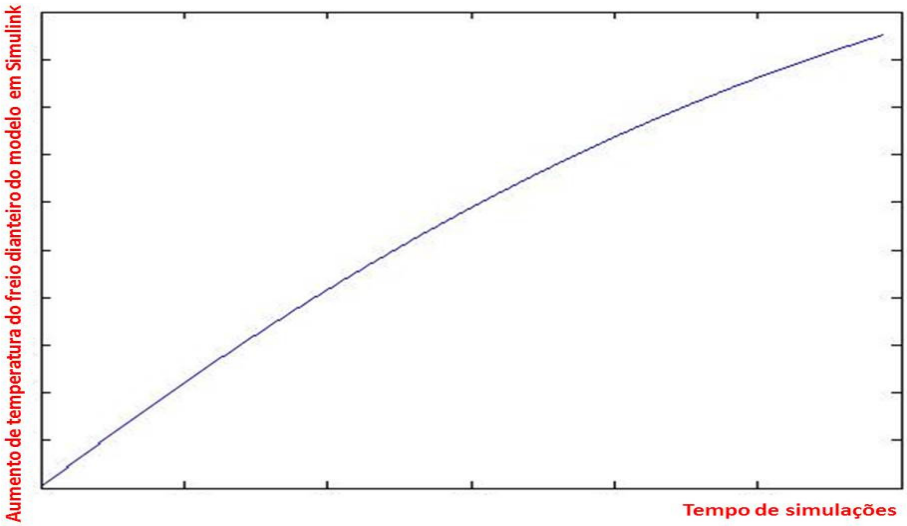

Figura 62-Curva de aumento de temperatura do modelo do Simulink.

Fonte: Elaborado pelo autor