



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE DO AVANÇO TECNOLÓGICO DO SISTEMA DE FREIO
AUTOMOTIVO**

ELDER UMBELINO SOUZA

**João Pessoa – PB
2024**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE DO AVANÇO TECNOLÓGICO DO SISTEMA DE FREIO
AUTOMOTIVO**

ELDER UMBELINO SOUZA

Monografia de graduação apresentada ao Centro de Tecnologia, da Universidade Federal da Paraíba, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof.Dr. Siderley Fernandes Albuquerque.

**João Pessoa – PB
2024**

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S729a Souza, Elder Umbelino.

Análise do avanço tecnológico do sistema de freio
automotivo / Elder Umbelino Souza. - João Pessoa, 2024.
37 f. : il.

Orientação: Siderley Fernandes Albuquerque.
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. Sistema de Freio. 2. ABS. 3. Inteligência
Artificial. I. Albuquerque, Siderley Fernandes. II.
Título.

UFPB/BSCT

CDU 621(043.2)

ELDER UMBELINO SOUZA

**ANÁLISE DO AVANÇO TECNOLÓGICO DO SISTEMA DE FREIO
AUTOMOTIVO**

Trabalho de Conclusão de Curso que apresento a Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Siderley Fernandes Albuquerque.

DATA DE APROVAÇÃO 23 / 10 / 2024

BANCA EXAMINADORA

Siderley Fernandes Albuquerque

Prof. Dr. Siderley Fernandes Albuquerque (Orientador)

Halane M. Braga Fernandes Brito

**Prof. Dr^a. Halane Maria Braga Fernandes Brito
(Avaliador)**

Koji Daniel C. Mishina

**Prof. Dr. Koji Daniel Vasconcelos Mishina
(Avaliador)**

Dedico aos meus pais, Elenilson de Lima Souza e Maria das Graças Umbelino, a maior conquista da minha vida, até agora.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me abençoado com saúde, coragem, paciência e discernimento para encarar o grande desafio que foi a graduação em engenharia mecânica.

Agradeço imensamente aos meus pais, pelo amor e incentivo que me deram, por não deixar que nada me faltasse, enquanto, estudava fora de casa.

À toda minha família, por todo apoio durante minha graduação, em especial aos meus avós e minha namorada Renata Souza, pelo apoio, sem vocês essa trajetória teria sido bem mais difícil.

Aos meus amigos da graduação Engenharia Mecânica, Atilyo Lima, Caio Andrade, Charles Abrantes, Denis Santana, Matheus Frazão, Talita Cardoso, Vinicius Abrantes, sou imensamente grato pelas experiências compartilhadas, pelas trocas de ideias e pelo apoio durante os momentos desafiadores. Juntos, enfrentamos provas, projetos e noites em claro, e cada um de vocês contribuiu para que essa caminhada fosse ainda mais especial.

Ao meu orientador, Professor Doutor Siderley Fernandes Albuquerque, pela atenção e paciência, sem as quais este trabalho não seria possível.

Resumo

Este trabalho tem como metodologia de pesquisa a revisão bibliográfica que teve como principais bases de pesquisa livros e artigos da internet, tem como objetivo explorar a evolução e o desenvolvimento dos sistemas de freios automotivos, fornecendo uma compreensão abrangente de seu funcionamento e dos diversos tipos disponíveis. Ao longo da história, os sistemas de freio têm passado por inovações significativas, refletindo não apenas avanços tecnológicos, mas também a crescente preocupação com a segurança veicular e a eficiência dos automóveis. A pesquisa inicia-se com uma revisão histórica, destacando as primeiras soluções de frenagem, que incluíam sistemas simples de fricção, e avança para o desenvolvimento dos freios a tambor e a disco, que se tornaram padrão na indústria automotiva. Como também é enfatizado o sistema ABS e como ele atua de forma a garantir maior confiabilidade e segurança do funcionamento do sistema de freio e as inovações tecnológicas do seguimento que são o sistema de freio regenerativo e a implantação de inteligência artificial nos sistemas de freio. Como resultado o trabalho visa não apenas esclarecer os conceitos fundamentais e o funcionamento dos sistemas de freios, como também oferece como um recurso de pesquisa para estudantes, engenheiros e profissionais da indústria automotiva.

Palavras chave: Sistema de Freio; ABS; Inteligência Artificial.

Abstract

This work employs a bibliographic review methodology, primarily based on books and articles, with the objective of exploring the evolution and development of automotive brake systems, providing a comprehensive understanding of their functioning and the various types available. Throughout history, brake systems have undergone significant innovations, reflecting not only technological advancements but also the growing concern for vehicle safety and automotive efficiency. The research begins with a historical review, highlighting the earliest braking solutions, which included simple friction systems, and progresses to the development of drum and disc brakes, which have become standard in the automotive industry. The study also emphasizes the ABS system and how it functions to ensure greater reliability and safety in the operation of the braking system, as well as technological innovations such as regenerative braking systems and the implementation of artificial intelligence in braking systems. As a result, the work aims not only to clarify the fundamental concepts and functioning of brake systems but also to serve as a research resource for students, engineers, and professionals in the automotive industry.

Keywords: Brake System; ABS; Artificial Intelligence.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
2. OBJETIVO GERAL	11
3. JUSTIFICATIVA	11
4. SURGIMENTO DO SISTEMA DE FREIO.....	12
5. VISÃO GERAL DO SISTEMA DE FREIO AUTOMOTIVO	15
6. TIPOS DE SISTEMAS DE FREIO AUTOMOTIVO	18
6.1 SISTEMA DE FREIO A TAMBOR.....	18
6.1.1 TIPOS DE FREIO A TAMBOR	17
6.1.2 FREIO SIMPLEX	19
6.1.3 FREIO DUPLEX	21
6.1.4 FREIO DUO-DUPLEX	22
6.1.5 FREIO SERVO	23
6.1.6 FREIO DUO-SERVO	24
6.2 SISTEMA DE FREIO A DISCO	25
6.2.1 FREIO DE PINÇA FIXA.....	26
6.2.2 FREIO DE PINÇA FLUTUANTE	27
6.3 SISTEMA DE FREIO ABS.....	28
6.3.1 SENSORES DE VELOCIDADE DA RODA.....	29
6.3.2 UNIDADE DE CONTROLE ELETRÔNICA (ECU)	29
6.3.3 MODULADOR HIDRÁULICO.....	29
6.4 SISTEMA DE FREIO REGENERATIVO.....	31
7. INTELIGENCIA ARTIFICIAL APLICADA A SISTEMAS DE FREIO.....	33
8. CONCLUSÃO	35
REFERÊNCIAS	36

Lista de figuras

Figura 01: Freio de sapara externa de madeira	12
Figura 02: Freio de fricção na roda traseira	13
Figura 03: Freio de sapata externa de carruagem	13
Figura 04: Sistema de freio automotivo	16
Figura 05: Esquemático freio a tambor	18
Figura 06: Sapatas de pivô fixo	19
Figura 07: Sapatas deslizantes	20
Figura 08: Esquemático Freio Simplex.....	21
Figura 09: Esquemático Freio duplex.....	21
Figura 10: Esquemático Freio duo-duplex.....	22
Figura 11: Esquemático Freio servo.....	23
Figura 12: Esquemático Freio duo servo.....	24
Figura 13: Freio a disco	25
Figura 14: Freio de pinça fixa.....	26
Figura 15: Freio de pinça flutuante.....	27
Figura 16: Sistema de freio ABS	28
Figura 17: Modulador Hidráulico com Válvulas Solenóides 2/2.....	30
Figura 18: Funcionamento dos freios regenerativos	31
Figura 19: Esquemático sistema de freio Sensify	34

1 INTRODUÇÃO

A evolução dos sistemas de freios automotivos é um tema de grande relevância no contexto da engenharia e da segurança veicular. O presente trabalho de revisão bibliográfica visa analisar as transformações que esses sistemas sofreram ao longo do tempo, destacando inovações e avanços tecnológicos que impactam diretamente a eficiência e a segurança dos veículos. A escolha deste tema está intrinsicamente relacionada à participação da equipe do subsistema de freio do projeto de extensão Fórmula UFPB durante a graduação, o que despertou o interesse em compreender mais profundamente as diversas tecnologias empregadas e suas aplicações práticas.

A pesquisa usou como base livros artigos e sites específicos sobre o tema, que discutem desde os primeiros sistemas de frenagem, caracterizados por métodos simples de fricção, até os modernos sistemas de freios a disco, ABS, e as mais recentes inovações, como os freios regenerativos e a implementação de inteligência artificial nos sistemas de frenagem. O trabalho será organizado em seções que abordam a história dos sistemas de freio, suas evoluções técnicas, e as implicações de cada avanço em termos de segurança e eficiência.

Na primeira seção é abordado o objetivo geral da pesquisa, na segunda seção é apresentada a justificativa para a escolha do tema e elaboração da pesquisa, na quarta seção será apresentada uma revisão histórica, traçando o desenvolvimento dos sistemas de freios desde os tipos mais rudimentares até os modelos contemporâneos. Em seguida, a análise de uma visão geral do sistema de freio automotivo e como que se categoriza, na sexta seção serão abordados os principais tipos de freios, os freios a tambor e a disco, além de discutir o funcionamento do sistema ABS e sua importância para a segurança, como também o sistema de freios regenerativos e seu funcionamento. Por fim, na sétima seção o material abordará as inovações mais recentes os sistemas de freio que é a aplicação de inteligência artificial nos sistemas de freio, e como estas estão moldando o futuro dos sistemas de freios automotivos, oferecendo uma base para futuras pesquisas e projetos na área.

2 OBJETIVO GERAL

O trabalho de pesquisa tem como objetivo explorar o surgimento e evolução dos sistemas de freios até os dias de hoje, mostrando suas características distintas, aprimorações com o passar do tempo. E servir de material para pesquisas, projetos e para pessoas que queiram saber as bases, classificações, tipos, como também os avanços tecnológicos do sistema de freio automotivo.

3 JUSTIFICATIVA

A escolha do tema para a elaboração deste estudo baseia-se na minha experiência prática e acadêmica, particularmente por ter participado do projeto de extensão Fórmula UFPB, onde atuei como membro da equipe do subsistema de freios.

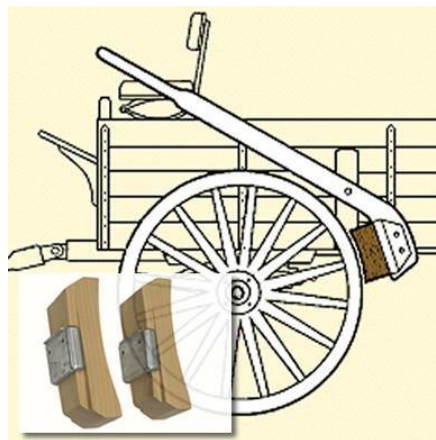
O projeto Fórmula UFPB, projeto que é incentivado pela SAE (Sociedade de Engenheiros Automotivos) consiste na construção e melhoria de um carro de corrida, possibilitou-me uma visão próxima da relevância dos sistemas de frenagem para a segurança e o rendimento do carro. Ao longo das atividades, consegui colocar em prática os conceitos teóricos adquiridos durante a graduação e, simultaneamente, experimentar as inovações tecnológicas que afetam diretamente a eficiência e a confiabilidade dos freios. Esta vivência não só reforçou meu interesse pelo campo, como também despertou em mim a consciência da relevância da investigação e do estudo.

O conhecimento sobre os tipos, e funcionamento como também a evolução dos sistemas de freio é um tema relevante, pois é um sistema que impacta diretamente na segurança e performance dos veículos.

4 SURGIMENTO DO SISTEMA DE FREIO

A primeira utilização da roda é datada de 5.000 a.C. Geralmente, o gado era usado como animais de tração; mais tarde, cavalos e burros também foram utilizados. A invenção da roda tornou necessária a invenção do freio. Afinal, uma carruagem puxada por cavalos descendo uma ladeira precisava ser desacelerada, não apenas para manter sua velocidade dentro de limites controláveis, mas também para evitar colidir com a parte traseira dos cavalos. Isso provavelmente era feito com varas de madeira apoiadas no chão ou nos discos das rodas como ilustra a figura 01. A partir de cerca de 700 a.C., as rodas passaram a ter pneus de ferro para evitar o desgaste prematuro da borda da roda (Bosch, 2014).

Figura 01: Freio de sapara externa de madeira



Fonte: Sanka Freios

A partir de 1690, os cocheiros usavam um "calço" para frear suas carruagens. Ao descer uma ladeira, eles utilizavam a alça para empurrar ele sob um pneu, que então ficava imobilizado e deslizava sobre o calço. Em 1817, no início da era industrial, o Barão Karl Drais percorreu de Karlsruhe, no sul da Alemanha, até Kehl, provando a um público atônito que era possível andar em duas rodas sem cair. Como certamente teve dificuldade para parar ao descer, seu último modelo, de 1820, apresentava um freio de fricção na roda traseira como mostra a figura 02 (Bosch, 2014).

Figura 02: Freio de fricção na roda traseira

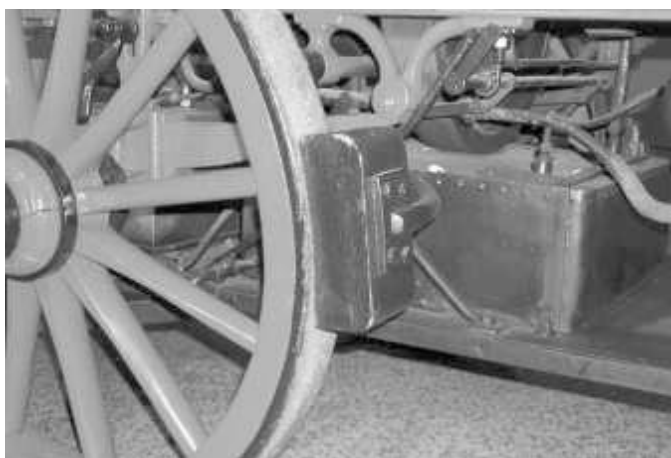


Fonte: (Bosch, 2014)

Os primeiros veículos motorizados utilizavam rodas de madeira com pneus de aço ou borracha, ou rodas de aço com raios revestidas de borracha. Para a frenagem, alavancas (como nas carruagens puxadas por cavalos) empurravam sapatas de freio ou freios de sapata externa com revestimentos de fricção contra as superfícies de rodagem das rodas traseiras como a figura 03 ilustra (bosch, 2014).

Os primeiros freios automotivos eram simples adaptações dos freios usados nas carruagens na virada do século, onde uma alavanca e uma sapata externa atuavam diretamente no pneu. Posteriormente surgiram os freios de cinta de aço externa envolvendo o cubo da roda ou tambor. Na década de 1920, com os automóveis ganhando mais potência e velocidade, os freios passaram a ter acionamento hidráulico (Nakata,2019).

Figura 03: Freio de sapata externa de carruagem



Fonte: (Bosch, 2014)

À medida que os pneus de borracha sólida se estabeleceram rapidamente para veículos motorizados (começando com o automóvel triangular Benz em 1886 e o carro de rodas de aço Daimler de 1889) e logo foram substituídos por pneus de borracha inflados para um passeio mais confortável, a era do freio de sapata em automóveis já havia chegado ao fim. A partir de então, começaram a ser utilizados freios de banda (bandas de freio de aço flexíveis que freavam diretamente ou por meio de várias sapatas de freio rebocadas na parte interna) ou freios de sapata externa (sapatas de freio rígidas de ferro fundido ou aço com revestimentos de freio). Esses freios operados por pedal funcionavam com tambores de freio externos, normalmente instalados na parte da frente no eixo de transmissão intermediário ou na área do eixo traseiro (Bosch, 2014).

5 VISÃO GERAL DO SISTEMA DE FREIO AUTOMOTIVO

Um veículo é conectado à estrada pelas forças de tração produzidas pelos pneus. Quaisquer forças de frenagem, direção ou aceleração devem ser geradas pela pequena área da banda de rodagem do pneu em contato com a superfície da estrada. Somente forças iguais ou menores que o produto da força normal e do coeficiente de atrito pneu-estrada podem ser transmitidas pelas bandas de rodagem e rodas do pneu. Mesmo o sistema de frenagem ideal não pode utilizar mais tração do que a fornecida pelos pneus e pela estrada (Limpert, 1999).

A operação segura de um veículo motorizado requer ajuste contínuo de sua velocidade às mudanças nas condições de tráfego. Os freios e os pneus, juntamente com o sistema de direção, são os componentes mais importantes de prevenção de acidentes críticos para a segurança de um veículo motorizado. Eles devem funcionar com segurança em uma variedade de condições operacionais, incluindo estradas escorregadias, molhadas e secas; quando um veículo está levemente ou totalmente carregado; ao frear em linha reta ou em uma curva; com lonas de freio novas ou gastas; com freios molhados ou secos; quando aplicados pelo motorista novato ou experiente; ao frear em estradas lisas ou irregulares; ou ao puxar reboque (Limpert, 1999).

De acordo com Limpert (1999), usos gerais dos freios podem ser formulados em termos de três funções básicas que o sistema de freio deve fornecer:

1. Desacelerar o veículo, incluindo a parada.
2. Manter a velocidade do veículo durante a operação em declive.
3. Manter um veículo parado em uma rampa.

As funções básicas de um sistema de freio são diminuir a velocidade do veículo, manter sua velocidade durante a operação em declive e manter o veículo parado após sua parada completa (Limpert, 1999).

Essas funções básicas devem ser executadas durante a operação normal dos freios e, em menor grau de eficácia da frenagem, durante uma falha do sistema de freio. Consequentemente, os freios podem ser classificados como freios de serviço, usados para frenagem normal, freios secundários ou de emergência, usados durante

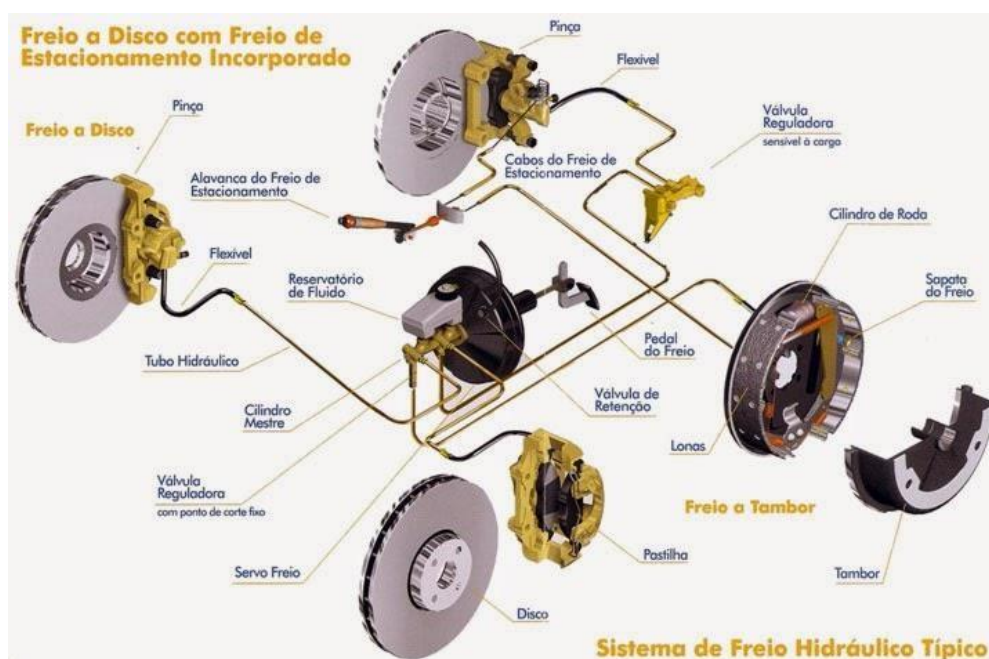
a frenagem parcial (Limpert, 1999).

Segundo Limpert (1999), todos os sistemas de freio podem ser divididos em quatro subsistemas básicos discutidos a seguir:

1. Fonte de energia: Inclui os componentes de um sistema de freio que produzem, armazenam e disponibilizam a energia necessária para a frenagem. O subsistema de fonte de energia termina onde a modulação controlada pelo motorista do fornecimento de energia começa.
2. Sistema de aplicação: Inclui todos os componentes que são usados para modular o nível de frenagem. O subsistema de aplicação termina onde a energia necessária para aplicar os freios entra no sistema de transmissão de energia.
3. Sistema de transmissão de energia: Inclui todos os componentes pelos quais a energia necessária para aplicar os freios viaja do sistema de aplicação para os freios das rodas.
4. Freios de roda ou fundação: Estes são os componentes onde as forças são produzidas que se opõem ao movimento existente ou pretendidas do veículo.

A figura 04, ilustra os componentes de um sistema de freio automotivo:

Figura 04: Sistema de freio automotivo



Fonte: (Canal Da Peça)

Segundo Limpert (1999), os sistemas de freio podem ser agrupados de acordo com o meio pelo qual a sapata/tambor que aplica energia é transmitida da fonte de energia para o usuário de energia ou freio de roda, como segue:

1. Freios mecânicos envolvem projetos onde apenas dispositivos mecânicos como hastes, alavancas, cabos ou cames são usados para transmitir energia para a roda ou freios de fundação. Em muitos casos, freios de estacionamento são freios mecânicos.
2. Freios hidráulicos usam um fluido como meio para transmitir energia para os freios de roda.
3. Freios pneumáticos, utilizam de ar para transmitir energia para os freios de fundação. Em aplicações automotivas, o ar é pressurizado. Freios a vácuo são usados em trens como meio para transmitir energia para os freios de roda.
4. Freios elétricos usam corrente elétrica como meio para transmitir energia para os freios de roda.
5. Freios mistos usam dois ou mais meios pelos quais a energia pode ser transmitida para os freios. Por exemplo, freios a ar usam ar comprimido para transmitir energia do reservatório que armazena ar comprimido para a câmara de freio perto do freio de fundação, e meios mecânicos como haste de pressão, eixo, came e rolos para transmitir energia da câmara de freio para as sapatas de freio.

6 TIPOS DE SISTEMAS DE FREIO AUTOMOTIVO

6.1 SISTEMA DE FREIO A TAMBOR

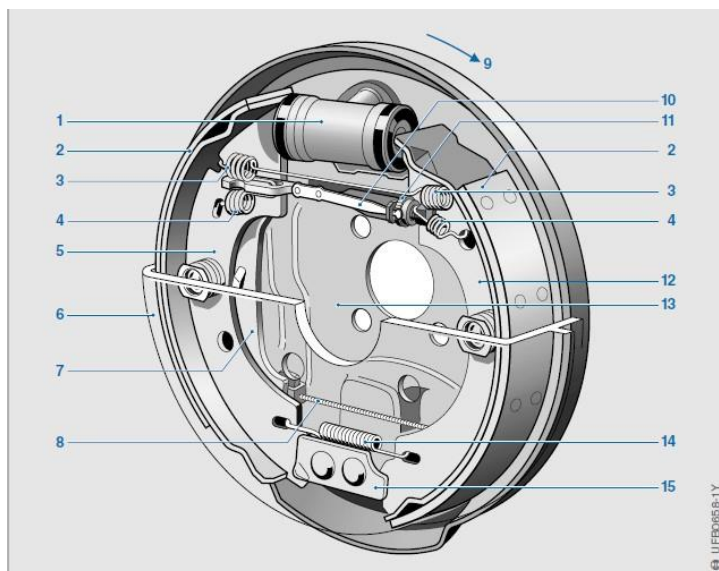
"O freio a tambor funciona por meio do atrito, neste caso, o contato se dá entre a lona e a parede interna do tambor de freio" (Dias, 2015). "Em seu estado de repouso, as lonas não têm contato com o tambor, já que as molas de retorno mantêm as sapatas afastadas do tambor" (Dias, 2015). Assim, as sapatas estão exercendo pressão sobre o mecanismo de auto-ajuste, mais especificamente sobre o parafuso e a porca de ajuste. Isso possibilita a manutenção desses dois componentes contra a manga de auto-ajuste" (Dias, 2015).

Ao acionarmos o pedal do freio, a linha de fluido de freio é pressurizada até as rodas, que transmitem essa pressão devido à natureza incompressível do fluido. Essa pressão atua sobre o pistão do cilindro de freio, gerando uma força de compressão que empurra as duas sapatas contra a superfície interna do tambor. Como a lona (fixada na sapata) e o tambor apresentam um alto coeficiente de atrito, a força de atrito resultante diminui a velocidade da roda conectada ao tambor de freio (Dias, 2015).

A figura 05 ilustra o freio a tambor e seus componentes:

Figura 05: Esquemático freio a tambor

1. Cilindro de roda
2. Revestimento de fricção
3. Mola de retorno (sapata de freio)
4. Mola de retorno (mecanismo de autoajuste)
5. Sapata traseira
6. Tambor de freio
7. Alavanca de freio de mão
8. Cabo do freio de mão
9. Direção de rotação do tambor
10. Tira bimetálica (mecanismo de auto ajuste)
11. Roda de ajuste (com alavanca de cotovelo)
12. Sapata dianteira
13. Placa âncora
14. Mola de retorno (sapata de freio)
15. Suporte de apoio



Fonte: (Bosch, 2014)

A autoenergização é um benefício mecânico que se manifesta no funcionamento dos sistemas de freio a tambor, facilitando o esforço do motorista ao acionar o sistema de frenagem. Esse efeito ocorre quando o sistema é ativado, e a pressão gerada pelo cilindro mestre é transmitida aos cilindros de roda. Esses cilindros empurram as sapatas contra a superfície interna do tambor, que, por sua vez, exerce uma força de reação sobre as sapatas (Dias, 2015).

Contudo, os momentos gerados por essas forças não são iguais, já que as sapatas estão situadas em direções opostas (Dias, 2015). Ao acionar o sistema, ocorre a autoenergização na sapata primária e a autodesenergização na sapata secundária. Isso ocorre porque a força de frenagem exercida pelo pistão do cilindro de roda produz um momento que tende a fazê-la girar na direção contrária ao movimento da roda (Dias, 2015).

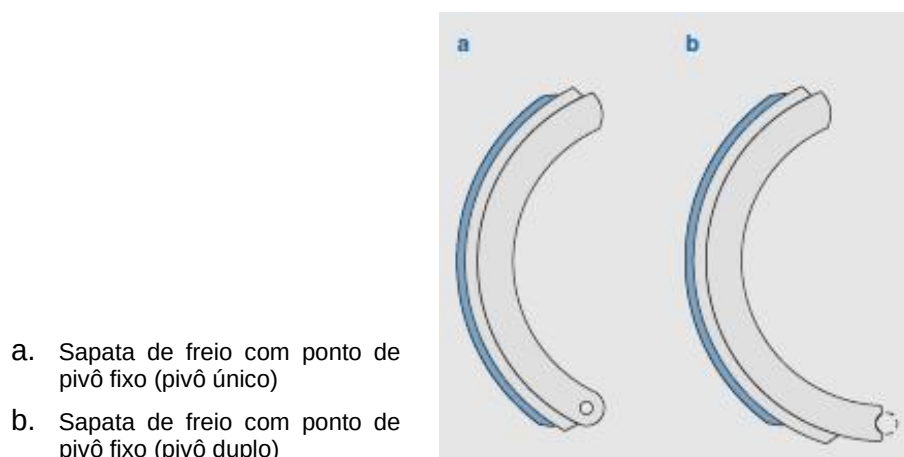
6.1.1 TIPOS DE FREIO A TAMBOR

Segundo Bosch (2014), distinguem-se dois tipos diferentes de freio a tambor de acordo com a forma como as sapatas de freio são montadas e pivotadas:

- Freios a tambor com sapatas de freio de pivô fixo.
- Freios a tambor com sapatas deslizantes com âncoras paralelas ou inclinadas.

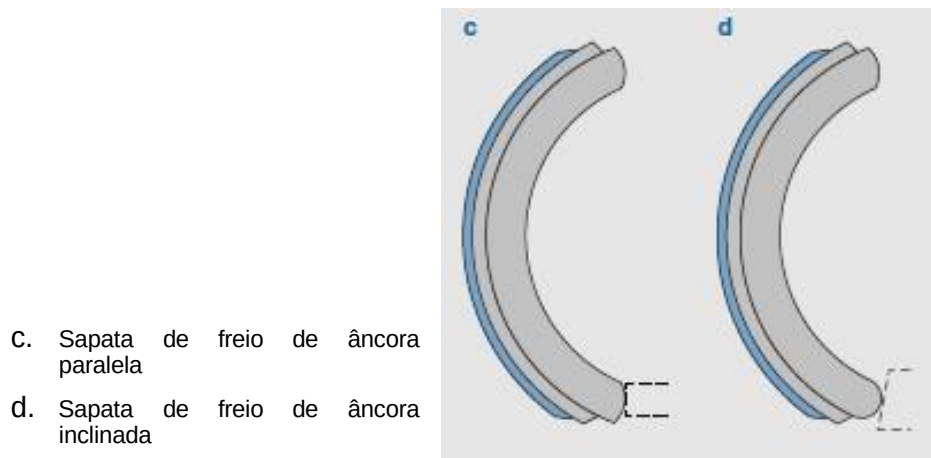
A seguir as figuras 06 e 07 ilustram os tipos de sapatas, sapatas de pivo e sapatas deslizantes.

Figura 06: Sapatas de pivô fixo



Fonte: (Bosch, 2014)

Figura 07: Sapatas deslizantes



- c. Sapata de freio de âncora paralela
- d. Sapata de freio de âncora inclinada

Fonte: (Bosch, 2014)

As sapatas de freio de pivô fixo podem desgastar-se de forma desigual, pois não são auto-centralizáveis como as sapatas deslizantes. Além disso, tendem a apresentar um comportamento de auto-desenergização na sapata traseira (ou seja, diminuem a força de frenagem aplicada, ao contrário da auto-energizante). Guias de sapata deslizante são utilizadas em freios simplex, duplex, duo-duplex, servo e duo-servo. A maioria dos freios a tambor instalados em carros modernos é do tipo sapata deslizante, que não possui propriedades de auto-inibição (Bosch, 2014).

6.1.2 FREIO SIMPLEX

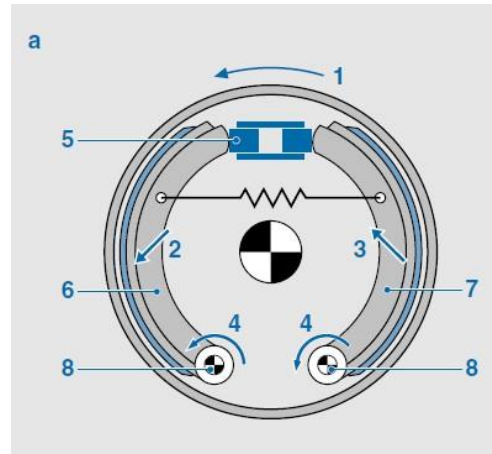
“Esse tipo de freio utiliza um cilindro de roda de dupla ação, que contém dois pistões que se movem em direções opostas, acionando ambas as sapatas de freio” (Dias, 2015).

Neste tipo de freio a tambor, apenas a sapata primária experimenta autoenergização, resultando em uma força de frenagem inibida na sapata secundária. No entanto, quando o veículo se move em marcha à ré, essa dinâmica se inverte. Assim, a sapata secundária passa a ser autoenergizada, enquanto a força da sapata primária é reduzida. Um freio do tipo simplex apresenta um fator de autoenergização que varia entre 2 e 4 vezes a força aplicada nas sapatas (Dias, 2015).

A figura 08 ilustra o freio simplex e seus componentes:

Figura 08: Esquemático Freio Simplex

1. Direção de rotação do tambor (ao avançar)
2. Efeito auto-energizante
3. Efeito auto-inibidor
4. Torque
5. Cilindro de roda de dupla ação
6. Sapata dianteira
7. Sapata traseira
8. Ponto de ancoragem (ponto de pivô)



Fonte: (Bosch, 2014)

6.1.3 FREIO DUPLEX

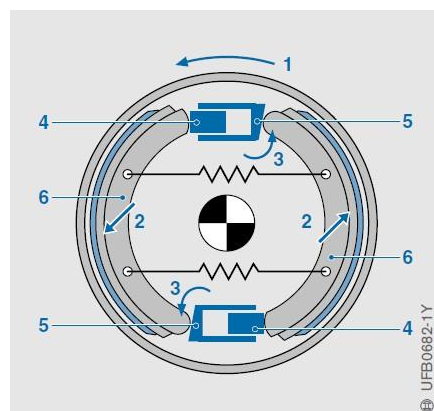
“O freio duplex recebe esse nome porque utiliza dois cilindros de roda, mas de ação simples que atuam de forma que pressionem as sapatas sobre a parede interna do tambor” (Dias, 2015).

Esses cilindros são posicionados de forma a acionar as sapatas nas extremidades opostas. O suporte das sapatas é do tipo deslizante, com as sapatas apoiadas na parede traseira dos cilindros de roda de ação simples. Dessa maneira, o freio a tambor do tipo duplex consegue gerar uma força de frenagem maior em comparação ao sistema simplex. Além disso, a distribuição de pressão e o desgaste não são tão uniformes, resultando em menores níveis de ruído e vibração. O arranjo duplex pode gerar uma força de frenagem até seis vezes superior à força de aplicação (Dias, 2015).

A figura 09 a seguir ilustra o freio duplex e seus componentes.

Figura 09: Esquemático Freio duplex

1. Direção de rotação do tambor (ao avançar)
2. Efeito de auto-energização
3. Torques
4. Cilindro da roda
5. Pontos de ancoragem
6. Sapatas de freio



Fonte: (Bosch, 2014)

6.1.4 FREIO DUO-DUPLEX

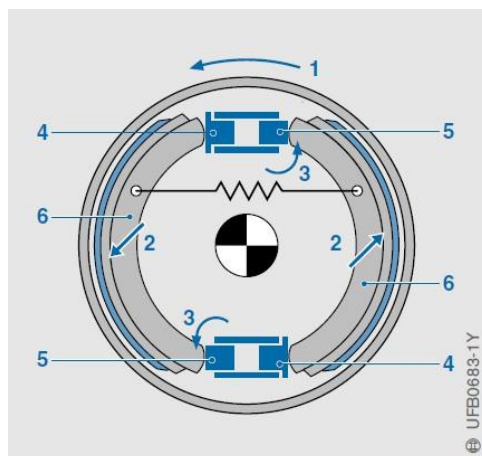
“Esta é uma variação do sistema duplex mencionado anteriormente, mas que utiliza dois cilindros de roda de ação dupla” (Dias, 2015). “O objetivo é fazer com que os pontos de suporte das sapatas também atuem como pontos de acionamento, permitindo que as sapatas sejam ativadas em ambas as extremidades (Dias, 2015).

Neste sistema, não há pivotamento, mas sim um contato deslizante nos suportes das sapatas, que também funcionam como pistão do cilindro de roda de dupla ação. Dessa forma, é possível ter não apenas duas sapatas autoenergizadas, mas também uma pressão de contato mais eficiente. Um dos principais benefícios desse sistema é o desgaste uniforme entre as sapatas. O freio a tambor do tipo duo-duplex pode gerar uma força de frenagem superior a seis vezes a força aplicada nas sapatas. No entanto, essa relação de forças não se mantém constante ao longo de sua vida útil devido ao fenômeno de fading das lonas, que ocorre quando a temperatura excede o limite máximo que as lonas de freio podem suportar (Dias, 2015).

A figura 10 a seguir ilustra o freio duo-duplex e seus componentes.

Figura 10: Esquemático Freio duo-duplex

1. Direção de rotação do tambor (ao avançar)
2. Efeito de auto-energização
3. Torques
4. Cilindro da roda
5. Pontos de ancoragem
6. Sapatas de freio



Fonte: (Bosch, 2014)

6.1.5 FREIO SERVO

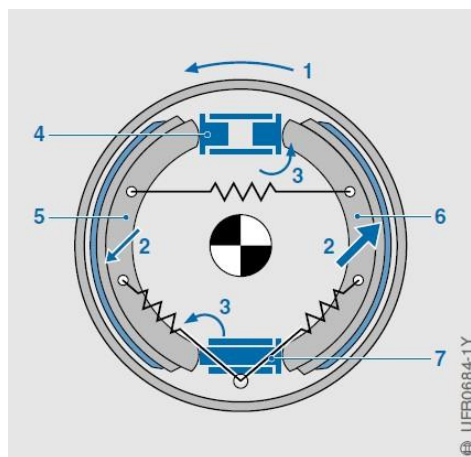
“O freio a tambor do tipo servo é uma variação que utiliza um cilindro de dupla ação para ativar as duas sapatas” (Dias, 2015).

As sapatas são presas a um pino de pressão, constituindo um sistema conhecido como flutuante. O sistema também incorpora molas extras para reconduzir as sapatas ao seu posicionamento inicial. A operação deste sistema é similar à de um sistema simplex, mas o pino de pressão se desloca, transferindo parte da força de frenagem da sapata principal para a sapata secundária. Essa mudança não ocorre de maneira inversa quando o carro se move para trás e é freado. Neste cenário, o freio funciona como um simplex convencional, já que o pino de pressão apenas direciona a força em um sentido. Portanto, a autoenergia gerada na sapata principal é transmitida para a sapata secundária através do pino de pressão, empurrando-a contra o tambor. Assim, ambas as sapatas se autoenergizam. Este sistema pode produzir uma força de frenagem seis vezes maior que a força aplicada (Dias, 2015).

A figura 11 a seguir ilustra o freio servo e seus componentes.

Figura 11: Esquemático Freio servo

1. Direção de rotação do tambor (ao avançar)
2. Efeito de auto-energização
3. Torques
4. Cilindro da roda
5. Sapata primária
6. Sapata secundária
7. Pino de pressão



Fonte: (Bosch, 2014)

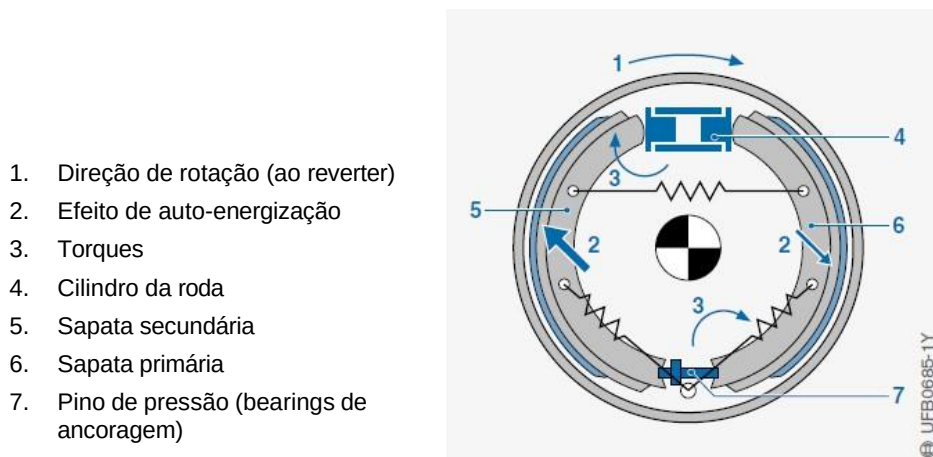
6.1.6 FREIO DUO-SERVO

“O sistema de freio a tambor do tipo duo-servo possui os mesmos componentes que o sistema servo, mas o pino de pressão é projetado para transmitir força em ambas as direções” (Dias, 2015).

Isso possibilita que ambas as sapatas sejam auto energizadas, independentemente de o veículo estar se deslocando para frente ou para trás. O sistema duo-servo também é capaz de produzir uma força de frenagem que supera em seis vezes a força exercida pelo cilindro de roda. Contudo, essa habilidade de gerar grandes forças de frenagem é um dos motivos que levaram à descontinuação deste sistema. As elevadas forças e momentos produzidos por este tipo de freio provocam elevadas demandas térmicas e alterações na auto energização, demandando um sistema de frenagem concebido para aguentar grandes cargas. Os freios de tambor duplo foram frequentemente empregados em veículos utilitários de porte médio e leve, particularmente no eixo traseiro (Dias, 2015).

A figura 12 ilustra o freio duo- servo e seus componentes.

Figura 12: Esquemático Freio duo servo



Fonte: (Bosch, 2014)

6.2 SISTEMA DE FREIO A DISCO

O sistema de freio a disco é amplamente utilizado em veículos como carros, motos e bicicletas. Ele é composto por um rotor, que é um disco metálico achatado fixado ao cubo da roda, e uma pinça, que pode incluir um ou mais conjuntos de pastilhas de freio. Normalmente, esse tipo de freio é instalado nas rodas dianteiras do veículo. Ao acionar o sistema através do pedal, o fluido de freio é direcionado para a pinça, onde exerce pressão sobre os pistões, que empurram as pastilhas contra o rotor. Essa pressão gera atrito entre as pastilhas e o disco, resultando em uma força de frenagem que reduz a velocidade de rotação da roda e, por consequência, desacelera o veículo (Cobreq, 2024).

Durante o processo de frenagem utilizando o sistema de freio a disco, ocorre a geração de calor resultante do atrito entre as pastilhas e o rotor. Para prevenir o superaquecimento e a consequente perda de eficiência do sistema de frenagem, esses componentes são frequentemente projetados com aletas ou perfurações, que facilitam a dissipação do calor. Esse design contribui para a manutenção da estabilidade do sistema de freio, mesmo durante períodos prolongados de uso (Cobreq, 2024).

Abaixo a figura 13 ilustra o sistema de freio a disco com disco ventilado:

Figura 13: Freio a disco



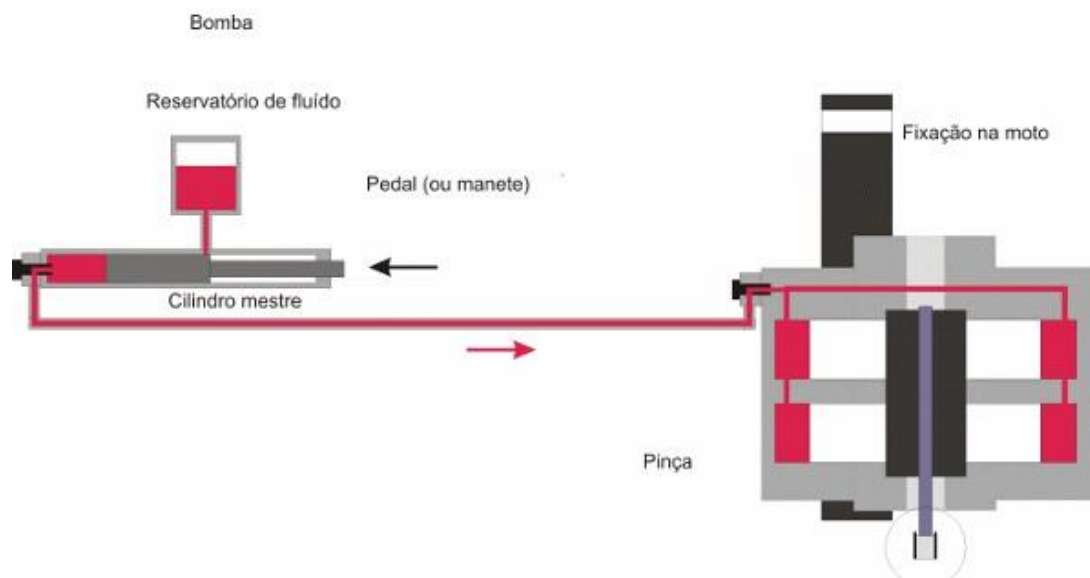
Fonte: (Superfreios)

6.2.1 FREIO DE PINÇA FIXA

A pinça, fixada solidamente ao flange, possui dois ou quatro pistões que empurram as pastilhas para fora. Os freios a disco de pinça fixa apresentam um desgaste mais equilibrado das pastilhas internas e externas, com menos desvio nas pastilhas do que os designs de pinça flutuante. Eles não exigem ancoragem ou punho integral para suporte das sapatas. Anexam-se com fixadores padrão, não possuem mangas, grommets ou molas de fixação, e requerem menos peças de serviço (Limpert, 1999).

Abaixo a figura 14 ilustra o funcionamento do sistema de freio a disco de pinça fixa desde o acionamento até a atuação do sistema:

Figura 14: Freio de pinça fixa



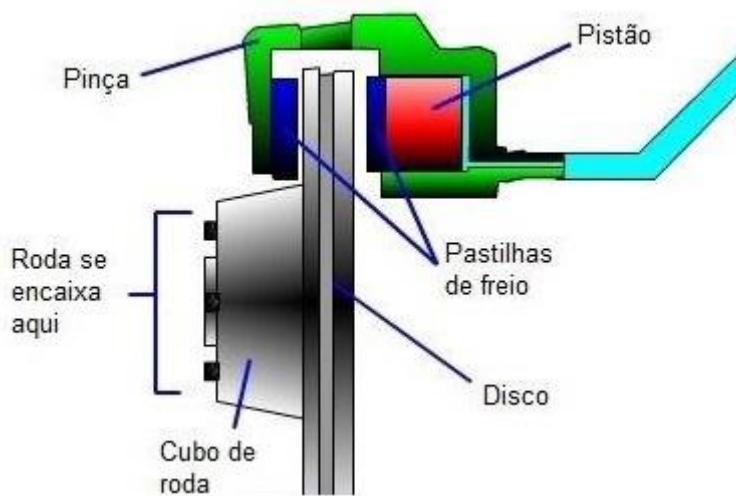
Fonte: (Motonline, 2012)

6.2.2 FREIO DE PINÇA FLUTUANTE

Em um freio a disco de pinça flutuante e um ou dois pistões são usados apenas no lado interno do disco de freio. A pressão hidráulica que empurra o pistão e a pastilha em direção ao rotor também força a carcaça do pistão (cilindro da roda) na direção oposta para aplicar a pastilha externa contra o rotor. Os freios de pinça flutuante oferecem várias vantagens em relação aos designs de pinça fixa. Eles são mais fáceis de instalar na roda, já que não possuem um pistão no lado externo. Eles têm uma temperatura de operação do fluido de freio mais baixa do que a pinça fixa e, portanto, um menor potencial de vaporização do fluido de freio. Além disso, apresentam menos pontos de vazamento e são mais fáceis de sangrar durante a manutenção (Limpert, 1999).

Abaixo a figura 15 ilustra os componentes do sistema de freio a disco de pinça flutuante:

Figura 15: Freio de pinça flutuante



Fonte: (Researchgate)

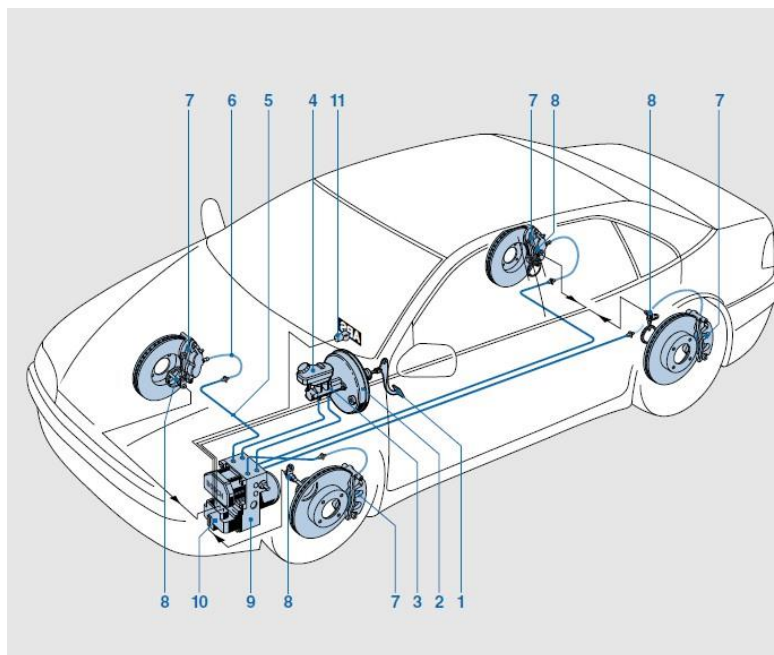
6.3 SISTEMA DE FREIO (ABS)

Em condições de condução perigosas, é possível que as rodas de um veículo travem durante a frenagem. As causas podem incluir superfícies de estrada molhadas ou escorregadias, além de reações abruptas por parte do motorista (perigo inesperado). Como resultado, o veículo pode se tornar incontrolável, podendo deslizar ou sair da estrada. O sistema de freios antibloqueio (ABS) detecta se uma ou mais rodas estão prestes a travar durante a frenagem e, se isso acontecer, garante que a pressão dos freios permaneça constante ou seja reduzida. Assim, ele impede que as rodas travem, mantendo o veículo dirigível. Como consequência, o veículo pode ser freado ou parado de forma rápida e segura (Bosch, 2014).

O sistema de freio ABS (Antilock Braking System) é composto por vários componentes que trabalham em conjunto para evitar o bloqueio das rodas durante a frenagem. A figura 16 ilustra os principais componentes do sistema ABS:

Figura 16: Sistema de freio ABS

1. Pedal de freio
2. Apoio de freio
3. Cilindro mestre
4. Reservatório
5. Linha de freio
6. Mangueira de freio
7. Freio da roda (com cilindro de freio da roda)
8. Sensor de velocidade da roda
9. Modulador hidráulico
10. Unidade de controle ABS (neste caso, unidade acoplada fixada ao modulador hidráulico)
11. Lâmpada de aviso do ABS



Fonte: (Bosch, 2014)

6.3.1 SENSORES DE VELOCIDADE DA RODA

Os sensores de velocidade da roda são componentes essenciais para o sistema de controle do ABS. Eles medem a velocidade de rotação das rodas e enviam sinais elétricos para a unidade de controle (Bosch, 2014).

Um carro pode ter três ou quatro sensores de velocidade, dependendo da versão do sistema ABS instalada. Esses sinais de velocidade são utilizados para calcular o grau de deslizamento entre as rodas e a superfície da estrada, permitindo detectar se alguma das rodas está prestes a travar (Bosch, 2014).

Esse processo é fundamental para garantir a eficácia do sistema ABS, ajudando a manter o controle do veículo em situações de frenagem (Bosch, 2014).

6.3.2 UNIDADE DE CONTROLE ELETRÔNICA (ECU)

A ECU é responsável por processar as informações recebidas dos sensores de velocidade das rodas, utilizando procedimentos matemáticos definidos (algoritmos de controle). Os resultados dessas cálculos são a base para os sinais de controle enviados ao modulador hidráulico (Bosch, 2014).

Essa função é crucial, pois permite que o sistema ABS ajuste a pressão dos freios em tempo real, prevenindo o bloqueio das rodas e mantendo a estabilidade do veículo durante a frenagem (Bosch, 2014).

6.3.3 MODULADOR HIDRÁULICO

O modulador hidráulico é composto por uma série de válvulas solenóides que podem abrir ou fechar os circuitos hidráulicos entre o cilindro mestre e os freios. Além disso, ele pode conectar os freios à bomba de retorno (Bosch, 2014).

São utilizadas válvulas solenóides com duas conexões hidráulicas e duas posições de válvula (válvulas solenóides 2/2). A válvula de entrada, situada entre o cilindro mestre e o freio, controla a aplicação da pressão, enquanto a válvula de saída, entre o freio e a bomba de retorno, controla a liberação da pressão. Existe um par dessas válvulas solenóides para cada freio. Esse sistema permite ajustes precisos na pressão dos freios, contribuindo para o funcionamento eficaz do ABS (Bosch, 2014).

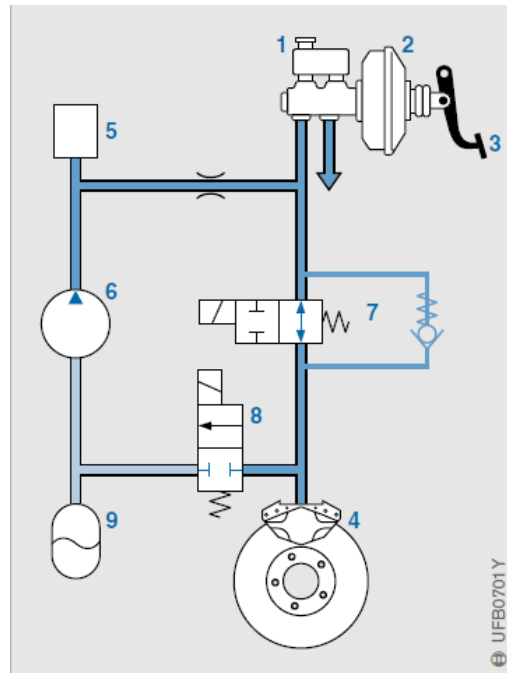
A figura 17 abaixo ilustra o esquemático do sistema ABS com válvulas solenóides citado no texto:

Figura 17: Modulador Hidráulico com Válvulas Solenóides 2/2

1. Cilindro mestre com reservatório
2. Apoio de freio
3. Pedal de freio
4. Freio da roda com cilindro de freio da roda
5. Modulador hidráulico com câmara de amortecimento
6. Bomba de retorno
7. Válvula de entrada
8. Válvula de saída
9. Acumulador de fluido de freio

Válvula de entrada: mostrada na posição aberta

Válvula de saída: mostrada na posição fechada



Fonte: (Bosch, 2014)

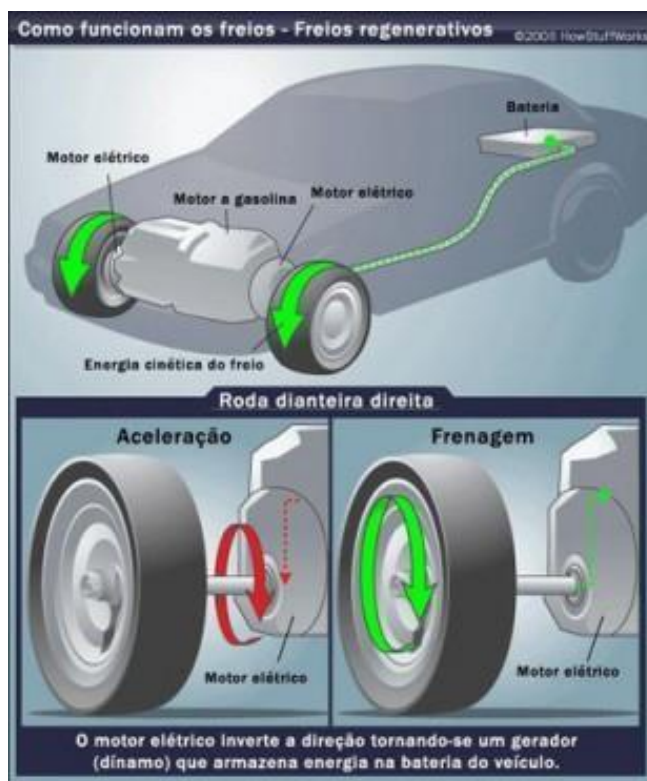
6.4 SISTEMA DE FREIO REGENERATIVO

Quando um veículo ou uma máquina industrial utiliza seus freios, a energia cinética é convertida em calor devido ao atrito entre o mecanismo de freio e o eixo em movimento. O calor gerado é normalmente dissipado no ambiente, resultando em um desperdício de energia (Junior; Abreu, 2019).

Para reduzir esse desperdício, foram desenvolvidos sistemas de freio regenerativo, conhecidos pela sigla KERS (Kinetic Energy Recovery Systems, em inglês). Esses sistemas operam por meio de um processo que armazena parte da energia cinética gerada pela máquina em um sistema de armazenamento de energia de curto prazo e/ou a devolve à fonte. Durante a fase de aceleração, o motor transfere energia para o eixo da máquina, e o freio permanece desacoplado. Ao desligar o motor e acionar o freio, a energia cinética é armazenada no sistema, ficando disponível para auxiliar na aceleração no ciclo seguinte (Junior; Abreu, 2019).

A figura 18 ilustra o funcionamento dos freios regenerativos:

Figura 18: Funcionamento dos freios regenerativos



Fonte: (Seridó Autopeças, 2012)

Os freios regenerativos não apenas auxiliam na redução da velocidade e na parada do veículo, mas também desempenham a função de recuperar parte da carga das baterias em veículos elétricos e híbridos durante as frenagens. Embora essa tecnologia seja mais comum em automóveis modernos, seu conceito é relativamente simples (Mobi Auto, 2024).

Em essência, o motor elétrico que impulsiona o veículo pode atuar como um gerador de eletricidade, funcionando como uma espécie de alternador que fornece energia às baterias, aumentando assim a autonomia do veículo. Isso significa que, sempre que o motorista diminui a pressão no pedal do acelerador ou aciona os freios, o motor elétrico começa a recarregar as baterias (Mobi Auto, 2024).

7 INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL EM SISTEMAS DE FREIOS AUTOMOTIVOS

A inteligência artificial está desempenhando um papel crescente na evolução dos sistemas de freios automotivos. Através da integração de sensores avançados e algoritmos de aprendizado de máquina, os sistemas de freios podem se tornar mais eficientes e responsivos. A seguir estão algumas maneiras como a IA está sendo aplicada:

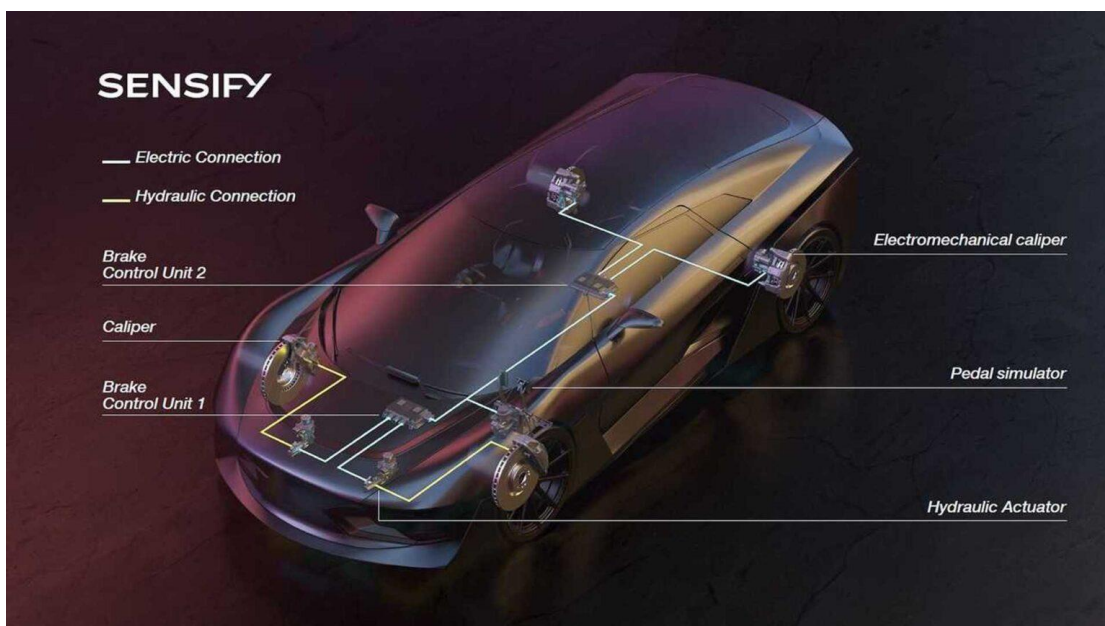
- **Detecção de Perigos:** Sistemas equipados com IA podem analisar dados de sensores em tempo real para identificar situações de perigo e ativar os freios automaticamente, melhorando a segurança.
- **Otimização de Desempenho:** Algoritmos podem ajustar dinamicamente a pressão de frenagem com base em condições de estrada, velocidade do veículo e comportamento do motorista, garantindo uma frenagem mais suave e eficiente.
- **Manutenção Preditiva:** A IA pode prever quando os componentes do sistema de freio precisam de manutenção, ajudando a evitar falhas e aumentando a durabilidade do sistema.

Um exemplo da aplicação da inteligência artificial nos sistemas de freio é o sistema Sensify, desenvolvido pela Brembo, uma fabricante italiana de componentes automotivos, especialmente freios. Esse sistema de freio automotivo é integrado com inteligência artificial e oferece vantagens significativas em comparação com os sistemas de freio convencionais, sendo aplicável tanto em veículos elétricos quanto em veículos a combustão (Conexão Automotiva, 2021).

O funcionamento do sistema envolve o controle independente da pressão de frenagem aplicada em cada roda, utilizando um atuador hidráulico em cada uma delas. Esse atuador é acionado por meio de um controle eletrônico que monitora continuamente parâmetros como atrito da superfície da estrada, peso do veículo, distribuição de carga, velocidade e ângulo de direção (Conexão Automotiva, 2021).

Há um par de ECUs controla os atuadores, com um gerenciando as rodas do eixo dianteiro, enquanto o outro controla os traseiros. Os comandos emitidos pelas ECUs são separados uns dos outros, mas ainda estão vinculados por motivos de segurança. A inteligência artificial do sistema age para evitar o travamento do freio, e os sistemas antiderrapantes e de controle de tração podem ser incorporados para fornecer um conjunto totalmente integrado de ajudas ao motorista, na figura 19 abaixo ilustra os componentes do sistema de freio Sensify (Conexão Automotiva, 2021).

Figura 19: Esquemático sistema de freio Sensify



Fonte: (Conexão Automotiva, 2021)

8 CONCLUSÃO

A análise da evolução do freio automotivo ao longo das décadas revela não apenas avanços técnicos significativos, mas também um reflexo das demandas por segurança e eficiência no setor automotivo. Desde os sistemas de freio a tambor até as tecnologias mais modernas, como os freios a disco e os sistemas de frenagem antibloqueio (ABS), cada inovação trouxe melhorias substanciais em termos de desempenho e confiabilidade.

Os diferentes tipos de freios discutidos neste trabalho demonstram a diversidade de soluções disponíveis, cada uma com suas características, vantagens e desvantagens, adequando-se a variados contextos de uso e exigências dos consumidores. A evolução contínua dessas tecnologias, impulsionada por pesquisas e desenvolvimento, destaca a importância de se acompanhar as tendências do mercado e as inovações que prometem aumentar ainda mais a segurança nas estradas.

Em suma, o progresso dos sistemas de frenagem não apenas melhorou a experiência de condução, mas também estabeleceu novos padrões de segurança que são essenciais em um mundo onde a mobilidade e a proteção dos usuários são prioridades. Assim, a pesquisa apresentada neste trabalho não só contribui para a compreensão histórica e técnica dos freios automotivos, mas também ressalta a necessidade de uma constante atualização e inovação neste campo vital da engenharia automobilística.

REFERÊNCIAS

ANDERSON L. DIAS. **Funcionamento e detalhes do sistema de freios a tambor.** Disponível em: <<https://carrosinfoco.com.br/2015/01/funcionamento-e-detalhes-do-sistema-de-freios-a-tambor/#:~:text=Freio%20servo&text=Cr%C3%A9dito%20foto:%20BOSCH%2C%20Brakes%2C,for%C3%A7a%20de%20aplica%C3%A7%C3%A3o%20%5B1%5D>> Acesso em: 19 Set. 2024.

BOSCH, **Brakes, Brake Control and Driver Assistance System: Function, Regulation and Components.** Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014.

CANAL DA PEÇA. **Como Adaptar o Freio a Disco nas Rodas Traseiras do VW Polo?** Disponível em: < <https://www.canaldapeca.com.br/blog/como-adaptar-freio-a-disco-rodas-polo/>> Acesso em: 19 Set. 2024.

CONEXÃO AUTOMOTIVA . **Brembo revela detalhes do seu sistema de freios Sensify, que terá inteligência artificial.** Disponível em: <<https://www.conexaoautomotivabr.com/2021/10/brembo-revela-detalhes-do-seu-sistema.html>> Acesso em: 14 Out. 2024.

COBREQ. **Freio a disco ou freio a tambor: qual a diferença?** Disponível em: <<https://cobreq.com.br/freio-a-disco/#:~:text=O%20freio%20a%20disco%20%C3%A9,%C3%A9%20colocado%20nas%20rodas%20dianteiras.>> Acesso em: 10 Out. 2024.

JUNIOR,E.C.;ABREU,J.S. **Frenagem Regenerativa: Um Estudo Sobre Seu Funcionamento E Diferentes Aplicações.** JOÃO MONLEVADE: FACULDADE DOCTUM DE JOÃO MONLEVADE, 2019.

LIMPERT, R. **Brake design and safety**, Society of Automotive Engineers International, United States of America, 1999.

MOBI AUTO. **Freio regenerativo de carro elétrico: entenda o que é e como funciona.** Disponível em: <<https://www.mobiauto.com.br/revista/freio-regenerativo-de-carro-eletrico-entenda-o-que-e-e-como-funciona/1687>> Acesso em: 14 Out. 2024.

MOTONLINE. **Freios, sistema mais importante da sua moto.** Disponível em: <<https://www.motonline.com.br/noticia/freios-o-sistema-mais-importante-da-sua-moto/>>Acesso em: 14 Out. 2024.

NAKATA. **Manual NAKATA para sistemas de freios.** Disponível em:

<<http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TMEC078/Aulas/extras/Manual%20sistema%20de%20freios%20-%20Nakata.pdf>> Acesso em: 19 Set. 2024.

RESEARCHGATE. **Sistema de freio a disco tipo pinça flutuante.** Disponível em:

< https://www.researchgate.net/figure/Figura-5-Sistema-de-freio-a-disco-tipo-pinca-flutuante_fig4_330856503 > Acesso em: 10 Out. 2024.

SANKA FREIOS. **Evolução dos Sistemas de Freio.** Disponível em:

<<http://www.freiossorocaba.com.br/dicas-do-kuka/27-evolucao-dos-sistemas-de-freio>> Acesso em: 19 Set. 2024.

SERIDÓ AUTOPEÇAS. **Sistema de Frenagem Regenerativa.** Disponível em:

<<https://seridoautopecas.blogspot.com/2012/06/sistema-de-frenagem-regenerativa.html>> Acesso em: 14 Out. 2024.

SUPERFREIOS. **Sistema de freio a disco. Você sabe como funciona?**

Disponível em: < <https://www.superfreios.com.br/sistema-de-freio-a-disco-voce-sabe-como-funciona/> > Acesso em: 16 Out. 2024.