



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
CAMPUS TERESINA CENTRAL
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

FLÁVIO AUGUSTO SOARES ALVES VIEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE UMA BANCADA PARA ANÁLISE E SIMULAÇÃO DA
ACELERAÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS UTILIZANDO MOTOR DE INDUÇÃO
TRIFÁSICO**

TERESINA – PI

2025

FLÁVIO AUGUSTO SOARES ALVES VIEIRA

DESENVOLVIMENTO DE UMA BANCADA PARA ANÁLISE E SIMULAÇÃO DA
ACELERAÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS UTILIZANDO MOTOR DE INDUÇÃO
TRIFÁSICO

Projeto de Trabalho de Conclusão de Curso
(monografia) apresentado como exigência parcial
para obtenção do diploma do Curso de
Bacharelado em Engenharia Mecânica do Instituto
Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do
Piauí, Campus Teresina Central.

Orientador: Prof. Dr. Mário Viana Medeiros Filho

TERESINA – PI

2025

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, pois tudo o que faço é para glorificá-Lo. Sua presença foi essencial em cada etapa desta caminhada, me dando força, sabedoria e coragem para superar os desafios.

Aos meus pais, Valdir e Edinalva, minha gratidão eterna. Vocês nunca pouparam esforços por mim, sempre me apoiando incondicionalmente.

À minha namorada, Juliana, que sempre esteve ao meu lado com amor, carinho e apoio. Sua força e resiliência me inspiraram a enfrentar as dificuldades com coragem e determinação. Sem você, essa jornada teria sido muito mais difícil.

Agradeço ao meu orientador, professor Doutor Mário, que com sua paciência, conhecimento e orientações fundamentais, foi um verdadeiro guia durante todo o desenvolvimento deste TCC. Sua dedicação e apoio fizeram toda a diferença.

Ao técnico João Paulo, do Laboratório de Energias Renováveis, meu sincero agradecimento. Sua ajuda foi indispensável neste projeto, com ideias, dicas valiosas e um comprometimento que fez toda a diferença na realização deste trabalho.

A todos vocês, meu muito obrigado por fazerem parte desta conquista!

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	JUSTIFICATIVA.....	11
3	OBJETIVOS.....	12
3.1	OBJETIVO GERAL.....	12
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
4	REFERENCIAL TEÓRICO.....	12
4.1	SISTEMA DE TRAÇÃO EM VEÍCULOS	12
4.2	VEÍCULOS COM MOTOR A COMBUSTÃO INTERNA	13
4.2.1	Powertrain em um veículo a combustão interna	14
4.2.2	Desempenho e eficiência.....	14
4.3	VEÍCULOS ELÉTRICOS (EV'S)	15
4.4	TIPOS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS E SUAS TECNOLOGIAS	16
4.4.1	Veículos elétricos a bateria (BEV)	16
4.4.2	Veículos elétricos híbridos (HEV)	18
4.4.3	Veículo híbrido plug-in (PHEV)	18
4.4.4	Veículos elétricos movidos a célula de hidrogênio (FCEV).....	19
4.4.5	Veículos híbridos de longo alcance (E-REV)	19
4.5	MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICO	20
4.5.1	Componentes principais.....	20
4.5.2	Princípio de funcionamento	22
4.6	INVERSOR DE FREQUÊNCIA.....	23
4.7	CONTROLE ESCALAR V/f	25
4.8	VCI COMPARADO A UM VE: CURVAS DE TORQUE E POTÊNCIA	27
5	MATERIAIS E MÉTODOS	29
5.1	MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO ROTOR TIPO GAIOLA DE ESQUILO ...	29
5.2	INVERSOR DE FREQUÊNCIA.....	30

5.3	BANCADA DE SIMULAÇÃO	32
5.3.1	Montagem da placa da bancada	32
5.3.2	Sistema de controle	33
5.4	PARAMETRIZAÇÃO DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA CFW500	34
5.4.1	HMI e Programação básica.....	34
5.4.2	Parametrização do inversor de frequência	35
5.5	DESENVOLVIMENTO DA PROGRAMAÇÃO LADDER NO WLP	37
5.5.1	Lógica de programação	39
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	41
6.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	41
6.2	BANCADA DESENVOLVIDA.....	42
6.3	MONITORAÇÃO ONLINE DA BANCADA EM FUNCIONAMENTO	43
6.4	AJUSTE DE GANHO NA ENTRADA ANALÓGICA AI1	44
6.5	GUIA DE PARAMETRIZAÇÃO DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA CFW500	46
7	CONCLUSÃO	47
8	PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	47
	REFERÊNCIAS.....	49

RESUMO

Este trabalho propõe o desenvolvimento de uma bancada didática para análise e simulação da aceleração de veículos elétricos utilizando um motor de indução trifásico e um inversor de frequência. A carência de ferramentas práticas no Instituto Federal do Piauí (IFPI) motiva a criação dessa bancada, que busca auxiliar no ensino e pesquisa sobre sistemas de propulsão elétrica, abordando conceitos fundamentais como controle de motores e tecnologias de inversores. A proposta inclui o desenvolvimento de um sistema de controle, testes de desempenho e documentação para possível replicação. Os resultados obtidos demonstram a influência da parametrização do inversor no comportamento do motor, evidenciando a relação entre o ganho ajustado da entrada de um sinal analógico e a resposta da velocidade em função da tensão aplicada. Desta forma este trabalho contribui para a modernização do ensino e formação de profissionais capacitados no campo da eletromobilidade.

Palavras-chave: veículos elétricos; motor de indução trifásico; inversor de frequência; bancada didática; ensino de engenharia.

ABSTRACT

This work proposes the development of a didactic bench for the analysis and simulation of electric vehicle acceleration using a three-phase induction motor and a frequency inverter. The lack of practical tools at the Federal Institute of Piauí (IFPI) motivates the creation of this bench, which aims to support teaching and research on electric propulsion systems by addressing fundamental concepts such as motor control and inverter technologies. The proposal includes the development of a control system, performance tests, and documentation for potential replication. The results obtained demonstrate the influence of inverter parameterization on motor behavior, highlighting the relationship between the adjusted gain of the analog signal input and the speed response as a function of the applied voltage. Thus, this work contributes to the modernization of education and the training of qualified professionals in the field of electromobility.

Keywords: electric vehicles; three-phase induction motor; frequency inverter; didactic test bench; engineering education.

1 INTRODUÇÃO

A crescente eletrificação do setor automotivo tem impulsionado avanços significativos em tecnologias de propulsão elétrica, gerando a necessidade de soluções práticas para o ensino e pesquisa no campo da eletromobilidade. Nesse contexto, o desenvolvimento de bancadas didáticas se apresenta como uma ferramenta essencial para abordar os desafios pedagógicos e promover uma formação técnica alinhada às demandas contemporâneas. Este trabalho propõe o desenvolvimento de uma bancada para análise e simulação da aceleração de veículos elétricos, utilizando um motor de indução trifásico e um inversor de frequência, componentes amplamente reconhecidos por sua eficiência, robustez e versatilidade em aplicações industriais e educacionais.

Nos últimos anos, Teresina tem registrado um aumento significativo no número de veículos elétricos. Até abril de 2024, foram emplacados 296 veículos elétricos na capital piauiense, sinalizando uma demanda contínua e em alta (PINegócios, 2024). A marca BYD, líder mundial em veículos eletrificados, tem se destacado nesse mercado, com a Concessionária BYD Carmais consolidando sua presença em Teresina e ampliando seu protagonismo local no segmento automotivo. Esse crescimento reflete uma tendência global que impacta também o cenário regional, evidenciando a importância de preparar profissionais capacitados para atender às demandas do setor.

O motor escolhido para este projeto é o modelo WEG de 0,75 kW, tipo gaiola de esquilo, caracterizado por seu desempenho confiável e eficiência operacional de 79,5%. Ele é integrado ao inversor de frequência WEG CFW-500, um equipamento versátil que permite o controle preciso de velocidade e torque, características indispensáveis para a simulação realista de acelerações. A escolha foi feita considerando critérios de acessibilidade e viabilidade pedagógica, possibilitando a reprodução de princípios similares aos sistemas reais de tração elétrica.

A carência de recursos práticos no Instituto Federal do Piauí, Campus Teresina Central, limita a compreensão de conceitos fundamentais relacionados a motores elétricos e inversores de frequência. Assim, a bancada proposta tem como principal objetivo permitir a análise da variação da aceleração do motor elétrico em resposta a diferentes entradas de controle. Utilizando um potenciômetro para ajuste da aceleração e uma chave seletora de 3 posições para simular estados como drive, neutro e marcha ré, a bancada possibilita a observação do comportamento do motor

em diferentes níveis de acionamento. Embora não haja a simulação de variações de carga, o sistema permite que os estudantes compreendam o efeito da entrada da aceleração sobre a resposta do motor, fornecendo uma base para o estudo de acionamentos elétricos em veículos.

Dessa forma, este trabalho não apenas contribui para a modernização do ensino e formação de profissionais capacitados, mas também reforça o compromisso com a pesquisa prática e o avanço tecnológico na área de veículos elétricos, um segmento em rápida expansão global e local. Além disso, a documentação detalhada das etapas do projeto visa facilitar a replicação e o aprimoramento da bancada e o desenvolvimento de outras pesquisas no campus, fortalecendo a disseminação do conhecimento e o impacto positivo na formação acadêmica e profissional.

2 JUSTIFICATIVA

A crescente eletrificação do setor automotivo tem impulsionado a demanda por profissionais capacitados em sistemas de propulsão elétrica, que abrangem conhecimentos de engenharia mecânica, elétrica e automação. Essa tendência global começa a se refletir também em Teresina, Piauí, onde o mercado de veículos elétricos, embora ainda em estágio inicial, apresenta um potencial promissor, impulsionado pela busca por alternativas mais sustentáveis e econômicas para a mobilidade urbana.

No entanto, a formação acadêmica na área enfrenta desafios, especialmente devido à falta de recursos práticos voltados para o estudo desses sistemas no Instituto Federal do Piauí (IFPI). O desenvolvimento de uma bancada didática que simule a aceleração de veículos elétricos surge como uma solução para suprir essa lacuna, permitindo que os estudantes tenham contato direto com tecnologias essenciais, como o controle de motores de indução e o uso de inversores de frequência.

A ideia para o projeto teve origem na disciplina de Automação Industrial do curso de Engenharia Mecânica, que abordou conceitos fundamentais sobre controle de processos industriais.

Além de aprimorar a capacitação técnica e modernizar o ensino, o projeto abre caminho para um novo campo de atuação profissional: a manutenção de veículos elétricos. Com o crescimento da frota de veículos elétricos, aumenta a necessidade de mão de obra especializada para diagnóstico, reparo e manutenção de componentes como baterias, inversores e motores elétricos. A formação de profissionais qualificados representa uma oportunidade estratégica para a indústria

local, incentivando o surgimento de novos negócios e serviços especializados. Dessa forma, o projeto não apenas fortalece a pesquisa prática e a capacitação acadêmica, mas também contribui para o desenvolvimento do mercado automotivo regional, alinhando-se às demandas contemporâneas da mobilidade sustentável e da automação industrial.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Criar uma ferramenta que auxilie no ensino, na pesquisa e na extensão, proporcionando aos estudantes uma compreensão inicial sobre o funcionamento dos sistemas de aceleração em veículos elétricos.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver o sistema de controle que permita simular a aceleração de um veículo elétrico, considerando as características práticas e pedagógicas;
- Implementar e testar a bancada, avaliando seu desempenho e resultados;
- Documentar todas as etapas do projeto, desde a concepção até os testes, para que a bancada possa ser replicada ou aprimorada futuramente;
- Promover a integração da bancada aos recursos didáticos do IFPI, facilitando sua utilização em disciplinas relacionadas à engenharia mecânica, automação e elétrica.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 SISTEMA DE TRAÇÃO EM VEÍCULOS

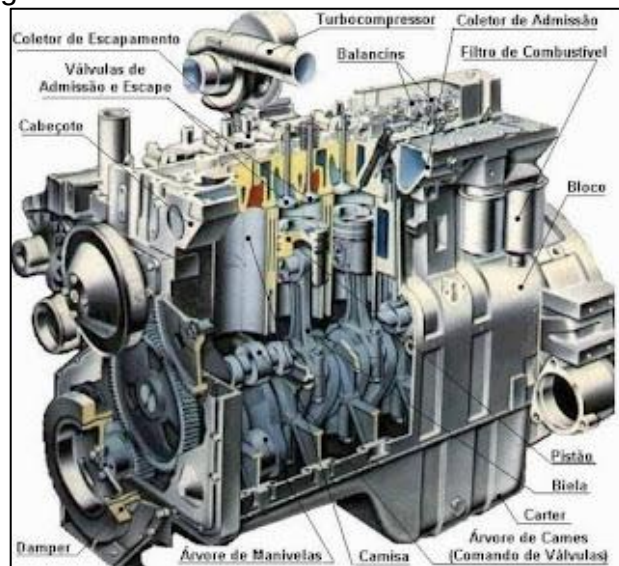
A tração de um veículo é o sistema responsável por converter a energia disponível em movimento, permitindo sua locomoção. Atualmente, os veículos podem ser classificados de acordo com o tipo de tração utilizada, sendo os dois principais grupos os veículos com motor de combustão interna (MCI) e os veículos elétricos (VE's) (HEYWOOD, 2018).

Os veículos a combustão interna utilizam motores térmicos, que convertem a energia química do combustível em energia mecânica por meio da combustão controlada dentro dos cilindros do motor (BOSCH, 2021). Já os veículos elétricos utilizam motores elétricos alimentados por baterias ou outras fontes de energia elétrica para gerar movimento (DELGADO et al., 2017).

4.2 VEÍCULOS COM MOTOR A COMBUSTÃO INTERNA

Os veículos a combustão interna dominaram a indústria automotiva por mais de um século, sendo amplamente utilizados devido à abundância de combustíveis fósseis e à infraestrutura consolidada de abastecimento (HEYWOOD, 2018). Esses veículos operam com motores que realizam a combustão de um combustível – como gasolina, etanol ou diesel – dentro dos cilindros, gerando força mecânica para movimentar o veículo (BOSCH, 2021).

Figura 1 - Motor a combustão interna ciclo diesel



Fonte: MOB Ceará (2013).

O princípio de funcionamento baseia-se no ciclo termodinâmico do motor, sendo os mais comuns (HEYWOOD, 2018):

- Ciclo Otto: Utilizado em motores a gasolina e etanol, caracteriza-se pela combustão provocada por uma centelha (vela de ignição).
- Ciclo Diesel: Utilizado em motores a diesel, caracteriza-se pela ignição espontânea do combustível devido à alta compressão da mistura ar-combustível.

A potência gerada pelo motor é transmitida às rodas por meio de um sistema mecânico que inclui embreagem, câmbio, diferencial, sistema virabrequim-manivela e eixos de tração. A eficiência desse sistema depende da relação de marchas, do tipo de transmissão (manual ou automática) e das perdas mecânicas inerentes ao funcionamento do motor e dos componentes de transmissão (GILLESPIE, 2021).

4.2.1 Powertrain em um veículo a combustão interna

Nos veículos a combustão, a força gerada pelo motor precisa ser convertida e distribuída às rodas. Existem diferentes configurações de tração utilizadas na indústria automotiva, sendo as mais comuns (HEYWOOD, 2018):

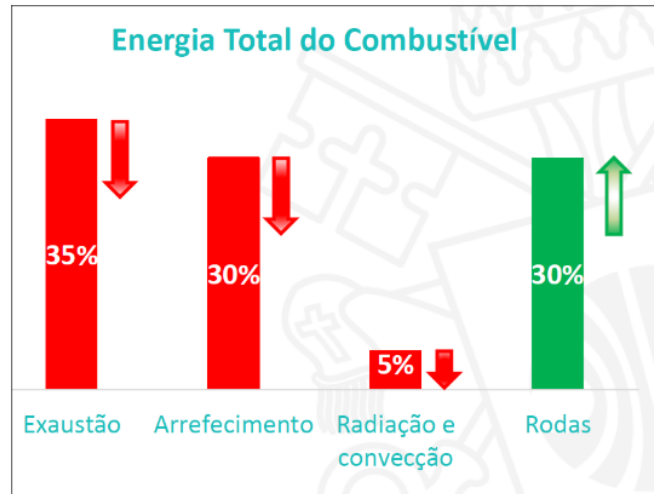
- Tração Dianteira (FWD - Front-Wheel Drive): O motor e a transmissão estão localizados na parte dianteira do veículo, transmitindo a força diretamente para as rodas dianteiras. Esse sistema é amplamente utilizado por oferecer menor custo, peso reduzido e melhor aproveitamento do espaço interno (BOSCH, 2021).
- Tração Traseira (RWD - Rear-Wheel Drive): A potência do motor é transmitida às rodas traseiras por meio de um eixo cardã e um diferencial. Esse sistema é comum em veículos esportivos e de alto desempenho, proporcionando melhor distribuição de peso e dirigibilidade (GILLESPIE, 2021).
- Tração Integral (AWD/4WD - All-Wheel Drive / Four-Wheel Drive): Distribui a potência entre as quatro rodas do veículo, melhorando a aderência e a estabilidade em terrenos difíceis. Esse sistema é utilizado em veículos off-road e alguns modelos esportivos (HEYWOOD, 2018).

4.2.2 Desempenho e eficiência

Apesar de serem amplamente utilizados, os motores a combustão interna apresentam desafios em termos de eficiência energética. Grande parte da energia do combustível é dissipada na forma de calor, resultando em um rendimento térmico relativamente baixo, geralmente entre 25% e 40%, dependendo do tipo de motor e das condições operacionais (GILLESPIE, 2021). Isso significa que uma parcela

significativa da energia contida no combustível é desperdiçada antes de ser convertida em movimento útil (HEYWOOD, 2018).

Figura 2 - Eficiência em Veículos com motor a combustão interna



Fonte: Fusco (2021).

Além disso, os veículos a combustão interna emitem poluentes atmosféricos, como dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO) e óxidos de nitrogênio (NO_x), contribuindo para problemas ambientais, como o efeito estufa e a poluição do ar (BOSCH, 2021). Como alternativa para reduzir esses impactos, a indústria tem investido no desenvolvimento de motores mais eficientes, combustíveis alternativos e tecnologias híbridas, que combinam motores a combustão com sistemas elétricos para otimizar o consumo de combustível e reduzir emissões (HEYWOOD, 2018).

Nos tópicos seguintes, será explorado o funcionamento da tração elétrica e as diferenças fundamentais entre os sistemas de propulsão tradicionais e os veículos movidos a eletricidade.

4.3 VEÍCULOS ELÉTRICOS (EV'S)

Os veículos elétricos (VEs ou EVs, na sigla em inglês *Electric Vehicles*) são caracterizados pelo uso de um ou mais motores elétricos para propulsão, utilizando a eletricidade como principal fonte de energia. Essa eletricidade pode ser obtida de diferentes maneiras, como através de conexão direta a fontes externas via plugs ou cabos aéreos, por indução eletromagnética, ou ainda por células combustíveis como, por exemplo, o hidrogênio. Outra forma relevante é a conversão de energia mecânica gerada durante a frenagem regenerativa, permitindo maior eficiência no reaproveitamento energético. Após gerada, a eletricidade é armazenada em baterias

químicas, que têm papel fundamental no fornecimento de energia ao motor elétrico, destacando-se como um dos principais componentes para o funcionamento dos EV's (DELGADO et al., 2017).

Figura 3 - Veículo elétrico



Fonte: Revista MOTOR SHOW (2021).

4.4 TIPOS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS E SUAS TECNOLOGIAS

Entre as principais categorias estão os veículos elétricos a bateria (BEV), híbridos convencionais (HEV), híbridos plug-in (PHEV), veículos com células a combustível de hidrogênio (FCEV) e híbridos com extensor de alcance (E-REVs). Cada tipo possui características específicas que os tornam adequados para diferentes necessidades e contextos, contribuindo para a redução das emissões de gases poluentes e o avanço da mobilidade sustentável (BRESOLIN, 2023).

A seguir, será percorrido a respeito de cada e uma breve introdução sobre os seus respectivos funcionamentos.

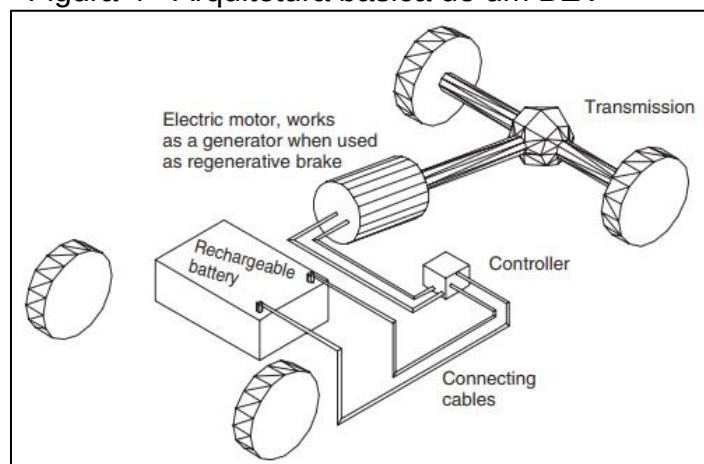
4.4.1 Veículos elétricos a bateria (BEV)

Os veículos elétricos a bateria (Battery Electric Vehicles - BEVs) representam uma das formas mais simples e amplamente utilizadas de tecnologia de veículos elétricos. Eles consistem em três componentes principais: uma bateria para armazenamento de energia, um motor elétrico e um controlador. A bateria é recarregada por meio da rede elétrica, utilizando um carregador que pode ser integrado ao próprio veículo ou instalado no ponto de recarga. Já o controlador desempenha um papel crucial ao regular a energia fornecida ao motor, permitindo

controlar a velocidade em ambas as direções — para frente e em marcha à ré. Essa capacidade, conhecida como "controle bidirecional" ou "controlador de dois quadrantes", destaca-se pela eficiência e flexibilidade no funcionamento dos BEVs (LARMINIE et al., 2012).

Além disso, muitos BEVs são equipados com sistemas de frenagem regenerativa, uma tecnologia que recupera energia durante a frenagem, transformando-a em eletricidade armazenada na bateria. Em casos onde a frenagem regenerativa opera em ambos os sentidos de movimento, o controlador é classificado como "controlador de quatro quadrantes". Essa característica melhora ainda mais a eficiência do veículo ao reduzir perdas energéticas e oferecer uma alternativa de frenagem sem atrito. Modelos comerciais como o Nissan Leaf e o Mitsubishi MiEV exemplificam o sucesso dessa tecnologia, que também é aplicada em veículos menores, como bicicletas e triciclos elétricos, demonstrando a versatilidade dos BEVs no mercado atual (LARMINIE et al., 2012).

Figura 4 - Arquitetura básica de um BEV



Fonte: Larminie et al. (2012).

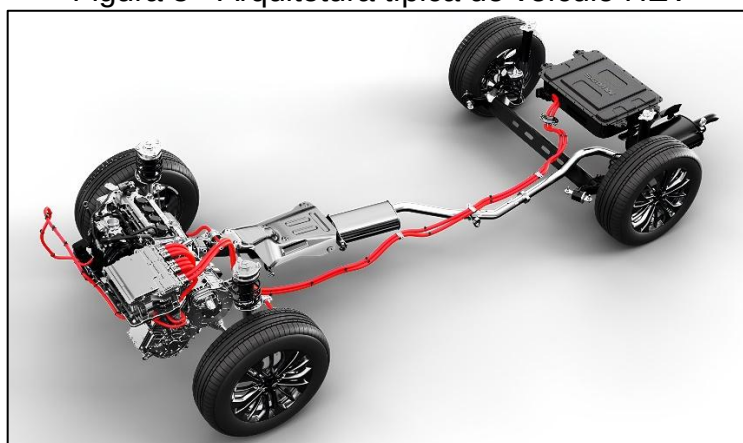
A Figura 4, ilustra de forma clara e simplificada a arquitetura básica de um BEV. No original, o texto "Eletric motor, works as a generator When used as regenerative brake" significa "Motor elétrico, funciona como gerador quando utilizado como freio regenerativo". Observa-se a interação entre os componentes principais: a bateria elétrica, o motor elétrico e o controlador. A figura também destaca o fluxo de energia entre esses elementos, evidenciando o papel do carregador na reposição da energia armazenada e a funcionalidade do controlador na gestão tanto da propulsão quanto da frenagem regenerativa (LARMINIE et al., 2012).

4.4.2 Veículos elétricos híbridos (HEV)

São considerados os veículos que proporcionaram o retorno a mobilidade elétrica. Possuem um motor de combustão interna (MCI) e também uma bateria com autonomia entre 16 e 50 Km. A característica principal destes veículos (HEV) é que eles não possuem a possibilidade de recarga da bateria via cabo de energia, ou seja, a carga da bateria é feita exclusivamente pelo alternador ligado ao motor a combustão e pela regeneração (BRESOLIN, 2023).

Em uma configuração típica de tração dianteira, o motor de combustão interna e o motor elétrico estão integrados ao eixo dianteiro, enquanto a bateria, responsável por armazenar energia elétrica, é posicionada na região do porta-malas. Essa disposição permite uma distribuição de peso mais equilibrada e otimiza o espaço disponível no veículo (EHSANI et al., 2018). Na figura 5 pode ser observada essa arquitetura.

Figura 5 - Arquitetura típica de veículo HEV



Fonte: Divulgação Wuling motors

4.4.3 Veículo híbrido plug-in (PHEV)

Os veículos híbridos plug-in (PHEV) surgem como uma evolução dos híbridos convencionais (HEV), trazendo a possibilidade de carregar suas baterias diretamente em uma fonte externa, como os eletropostos. Essa funcionalidade adicional não apenas aumenta a flexibilidade no uso de energia elétrica, mas também amplia o apelo sustentável desses veículos, uma vez que podem operar parcialmente como veículos elétricos em trechos mais curtos, reduzindo o consumo de combustíveis fósseis e as emissões associadas (BRESOLIN, 2023).

O motor de combustão interna continua sendo a principal fonte de tração nos PHEVs, que, assim como os HEVs, operam como híbridos paralelos. Essa configuração garante que ambos os sistemas, elétrico e a combustão, possam funcionar de forma conjunta para otimizar o desempenho. Quando comparados aos veículos elétricos puros (BEVs), os PHEVs se destacam por sua maior autonomia, graças ao uso de combustíveis tradicionais, sejam fósseis ou biocombustíveis, permitindo maior alcance e flexibilidade em viagens mais longas (DELGADO et al., 2017).

4.4.4 Veículos elétricos movidos a célula de hidrogênio (FCEV)

Os veículos equipados com células a combustível de hidrogênio (FCEV) são considerados uma alternativa promissora para a mobilidade sustentável. Esses veículos utilizam hidrogênio armazenado em tanques para gerar eletricidade por meio de células de combustível, emitindo apenas água como subproduto. A autonomia média dos FCEVs varia entre 500 e 700 quilômetros com um único tanque de hidrogênio, comparável à dos veículos movidos a combustíveis fósseis e superior à de muitos carros elétricos a bateria. Além disso, o reabastecimento de hidrogênio é rápido, semelhante ao tempo necessário para abastecer veículos convencionais. (JUSTOS, 2024).

4.4.5 Veículos híbridos de longo alcance (E-REV)

É um híbrido do tipo em série, no qual o motor principal é elétrico e recebe alimentação diretamente de uma fonte externa. Paralelamente, o motor à combustão interna atua como um gerador, convertendo energia química em elétrica para manter um nível mínimo de carga da bateria. Dessa forma, o sistema permite que o veículo de alcance estendido (E-REV) opere por distâncias significativamente maiores sem depender exclusivamente da recarga externa, garantindo maior autonomia, eficiência energética e reduzindo a dependência de combustíveis fósseis (DELGADO et al., 2017).

As Figuras 6 apresenta um veículo do tipo E-REV o BMW i3 com motor à combustão para aumentar o range se necessário.

Figura 6 - BMW i3



Fonte: BMW (2022).

4.5 MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

Os motores de indução trifásicos são um dos tipos mais comuns de máquinas elétricas utilizadas em ambientes industriais devido à sua alta confiabilidade, baixo custo de manutenção e robustez. Eles funcionam através da indução de corrente elétrica no rotor, gerada por um campo magnético rotativo proveniente da alimentação trifásica. Esses motores operam em uma velocidade constante, determinada pela frequência da rede elétrica, o que pode limitar o controle de velocidade. Contudo, o uso crescente de inversores de frequência tem permitido ajustar a velocidade de operação desses motores, ampliando suas aplicações. São essenciais em uma vasta gama de sistemas industriais, como bombas, compressores, ventiladores e sistemas de transporte, devido à sua eficiência e durabilidade (FITZGERALD et al., 2019).

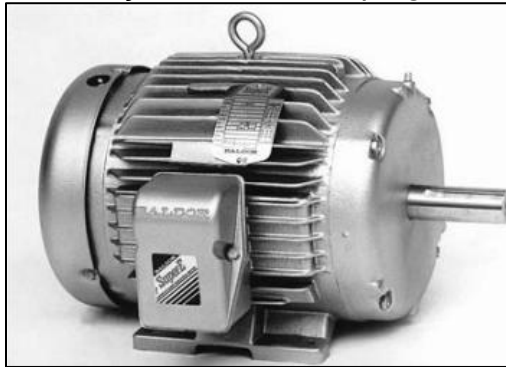
Eles podem ser divididos em dois tipos principais: motores com rotor em gaiola de esquilo e motores com rotor bobinado. O primeiro possui um rotor formado por barras condutoras curto-circuitadas por anéis nas extremidades, sendo robusto e de baixo custo. Já o motor com rotor bobinado tem enrolamentos trifásicos conectados a resistências externas através de anéis coletores, permitindo maior controle durante a partida e variações de velocidade. Ambos os tipos são constituídos por um estator, onde o campo magnético girante é gerado, e um rotor, responsável pela conversão de energia elétrica em mecânica (NAGRATH; KOTHARI, 2020).

4.5.1 Componentes principais

Os motores de indução trifásicos possuem dois componentes principais: o estator e o rotor. O estator é estacionário e abriga um núcleo cilíndrico oco composto

por lâminas de aço empilhadas, com slots uniformemente espaçados em sua circunferência interna para acomodar os enrolamentos do estator, na figura 7 é ilustrado o motor do tipo gaiola em sua vista explodida mostrando seus componentes principais. Já o rotor, que gira dentro do estator, também é composto por lâminas empilhadas com slots para os enrolamentos do rotor. Dependendo do tipo de motor, esses enrolamentos podem ser trifásicos convencionais, feitos com fios isolados, ou do tipo gaiola de esquilo (WILDI, 2014).

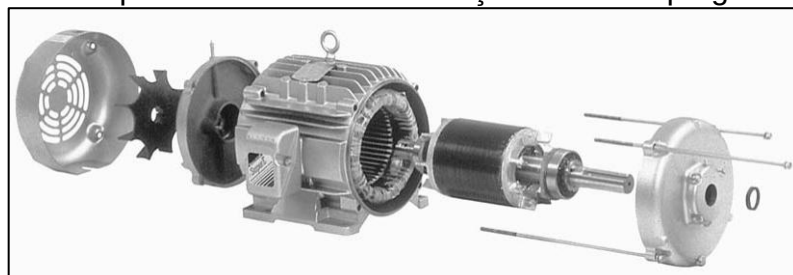
Figura 7 - Motor de indução trifásico do tipo gaiola de esquilo



Fonte: Wildi (2014).

Nos motores com rotor de gaiola de esquilo, as barras de cobre ou alumínio são inseridas nos slots do núcleo do rotor e conectadas em curto-circuito por anéis em suas extremidades. Essa configuração forma uma estrutura robusta e compacta que dá ao motor seu nome característico, inspirado na semelhança com uma roda de exercícios para esquilos. O design simples e eficaz do rotor de gaiola de esquilo permite a condução de correntes induzidas pelas bobinas do estator, gerando o torque necessário para o funcionamento do motor. Além disso, o motor de rotor de gaiola de esquilo é amplamente utilizado em aplicações industriais e comerciais, sendo reconhecido por sua durabilidade, confiabilidade e eficiência em uma ampla gama de condições operacionais (WILDI, 2014).

Figura 8 - Vista explodida do motor de indução trifásico tipo gaiola de esquilo



Fonte: Wildi (2014).

A extrema simplicidade e robustez da construção em gaiola de esquilo representam vantagens notáveis para esse tipo de motor de indução e, de longe, fazem dele o tipo de motor mais comumente usado, indo desde motores fracionários até os de grande porte (FITZGERALD et al., 2019).

Os componentes principais do motor de indução trifásico com rotor bobinado incluem o estator, o rotor bobinado, os anéis coletores, as escovas e o sistema de ventilação. O estator é a parte fixa, contendo enrolamentos trifásicos responsáveis por gerar um campo magnético girante ao receber corrente alternada trifásica. O rotor bobinado é composto por enrolamentos trifásicos conectados aos anéis coletores, que permitem a inserção de resistências externas no circuito. Essas resistências são fundamentais para controlar a corrente de partida e ajustar o torque do motor. As escovas fazem contato com os anéis coletores, viabilizando a conexão das resistências externas ao rotor. Por fim, o motor conta com um sistema de ventilação que dissipa o calor gerado durante a operação, garantindo sua eficiência e durabilidade (WILDI, 2014).

Figura 9 - Componentes do motor de indução trifásico rotor bobinado



Fonte: Adaptado de WEG (2009).

4.5.2 Princípio de funcionamento

O motor de indução trifásico de modo geral funciona por meio da interação entre um campo magnético girante, gerado no estator, e as correntes induzidas no rotor. Quando alimentado por uma fonte trifásica, os enrolamentos do estator

produzem um campo magnético girante cuja velocidade é denominada velocidade síncrona (n_s), calculada pela equação 1:

$$n_s = \frac{120 \times f}{P} \quad (1)$$

onde f é a frequência da corrente de alimentação e P o número de polos do motor (GURU et al., 2001).

O rotor nunca atinge a velocidade síncrona devido à necessidade de escorregamento para manter a indução eletromagnética. O escorregamento (S) é definido pela equação 2:

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (2)$$

Onde n_r é a velocidade do rotor (SILVA, 2013).

O rotor tipo gaiola de esquilo consiste em barras condutoras paralelas conectadas por dois anéis de curto-circuito em suas extremidades. À medida que o campo magnético girante corta essas barras, é gerada uma corrente elétrica induzida (Lei de Faraday). Essa corrente interage com o campo magnético do estator, produzindo uma força mecânica de acordo com a força de Lorentz, que resulta no torque responsável pela rotação do rotor (BOLDEA et al., 2010).

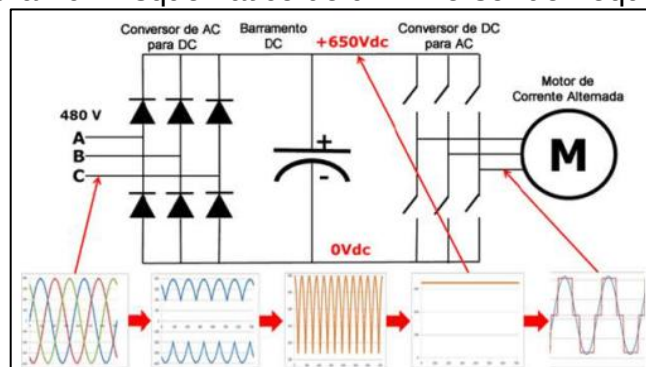
No motor de rotor bobinado, o rotor possui enrolamentos trifásicos conectados a anéis coletores. Essa configuração permite a utilização de resistências externas no circuito do rotor, possibilitando o controle da corrente de partida e do torque. O princípio de funcionamento é semelhante ao do rotor em gaiola de esquilo: o campo magnético girante do estator induz correntes nos enrolamentos do rotor. No entanto, o uso das resistências externas permite ajustar o desempenho do motor durante a partida e em operações que exijam controle de velocidade, como guindastes e elevadores (GURU et al., 2001).

4.6 INVERSOR DE FREQUÊNCIA

O inversor de frequência tem como objetivo converter uma tensão contínua em uma alternada, ou seja, a síntese do inversor de frequência consiste em transformar a energia disponível, por exemplo, em uma bateria para uma tensão alternada com valores eficazes de tensão e frequências para execução de trabalhos específicos. No

entanto, verifica-se que ao se gerar uma nova forma de onda alternada (quadrada) pode-se criar, teoricamente, esta nova onda com quaisquer frequências. Assim, os inversores de frequência passaram a ser utilizados no controle de velocidade de motores de indução, o que não é possível em condições normais, pois com uma fonte de alimentação de frequência fixa a rotação do motor de indução também é fixa. A Figura 10 apresenta o diagrama esquemático básico de um conversor que possui estágio CA-CC uma ponte retificadora com diodos e como estágio CC-CA um inversor de tensão trifásico (BRESOLIN, 2023).

Figura 10 - Esquemático de um inversor de frequência



Fonte: Bresolin (2023).

Na entrada do sistema, tem-se a tensão sinusoidal que é retificada pela etapa do conversor CA para CC (ponte de diodos). Na segunda etapa, a tensão contínua pulsante é filtrada por um banco de capacitores. Na terceira etapa, a nova tensão CA (quadrada) é gerada pelo conversor CC para CA (BRESOLIN, 2023).

No caso dos inversores de frequência utilizados para veículos elétricos a primeira etapa não existe (Diodos retificadores), pois a tensão da bateria já é contínua. Vale salientar que a tensão CA final é controlada por um estágio PWM (*Pulse Width Modulation*) o que faz com que a corrente aplicada ao motor se comporte como uma senóide “quase” perfeita (BRESOLIN, 2023).

A Figura 11 apresenta as partes internas de um inversor de frequência utilizado em um veículo elétrico. O módulo de controle da eletrônica de potência possui vários subsistemas: quando o veículo é carregado a partir de uma rede elétrica doméstica (por exemplo, 220 V), o retificador converte a corrente alternada em corrente contínua, a fim de alimentar a bateria (BRESOLIN, 2023).

Figura 11 - Partes internas do inversor de frequência



Fonte: Bresolin (2023).

Basicamente, para controlar a velocidade do veículo é preciso ativar no inversor de frequência o sistema de controle vetorial do inversor, o qual conta com a tecnologia de realimentação por encoder, que ajusta a velocidade do motor e do torque automaticamente, melhorando o desempenho de todo o sistema de tração do VE (BRESOLIN, 2023).

4.7 CONTROLE ESCALAR V/f

O controle escalar é uma das técnicas mais simples e amplamente utilizadas para o controle de motores elétricos, particularmente motores de indução trifásicos. Seu princípio básico é a manutenção de uma relação constante entre a tensão (V) aplicada ao motor e a frequência (f) de alimentação. Essa relação é essencial para garantir que o fluxo magnético no motor permaneça estável durante a operação, evitando problemas como a perda de torque ou a saturação magnética (BOLTON, 1999).

A velocidade síncrona de uma máquina de indução pode ser alterada diretamente a partir da variação da frequência da fonte de tensão que alimenta os enrolamentos do estator (FITZGERALD; KINGSLEY e UMANS, 2005).

Matematicamente, o princípio do controle escalar pode ser expresso pela equação 3:

$$\frac{V}{f} = K \quad (3)$$

Onde K é uma constante que depende das características do motor. A manutenção dessa proporção é realizada por inversores de frequência, que ajustam simultaneamente a tensão e a frequência em função da variação da velocidade desejada, garantindo a relação V/f constante e o desempenho adequado do motor (WEG, 2025).

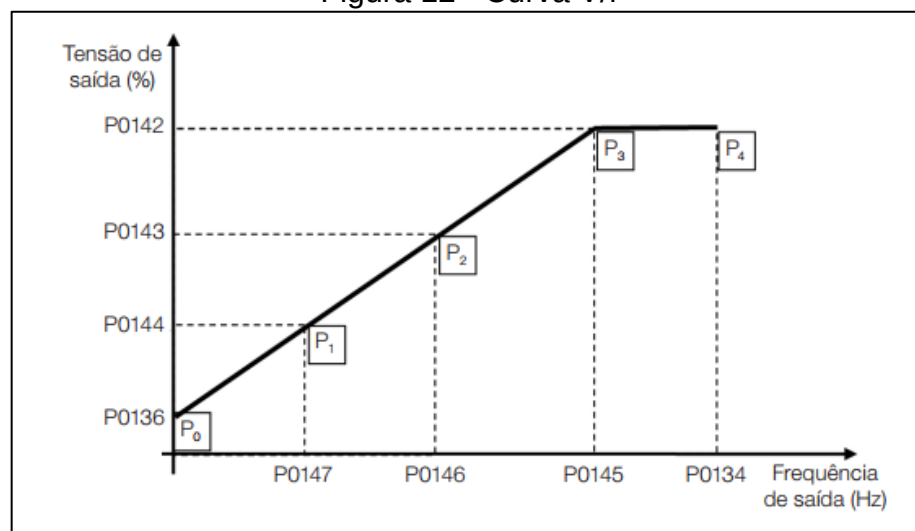
Outro aspecto importante é a relação entre o torque do motor (T) e os parâmetros de controle. Em condições ideais, o torque pode ser descrito pela equação 4:

$$T \propto \frac{V^2}{f^2} \quad (4)$$

Essa relação mostra que, ao reduzir a frequência sem ajustar proporcionalmente a tensão, ocorre uma queda no torque, especialmente em baixas velocidades. Isso limita a aplicação do controle escalar em sistemas que exigem alta precisão ou resposta rápida a variações de carga (BOLTON, 1999).

O controle escalar é amplamente utilizado em aplicações que não demandam controle dinâmico ou precisão no torque, como em bombas centrífugas, ventiladores e esteiras transportadoras. Nessas situações, sua simplicidade e baixo custo o tornam uma solução eficaz. Contudo, apresenta limitações, como a incapacidade de fornecer alto desempenho em baixas velocidades ou de lidar com variações rápidas de carga (WEG, 2025).

Figura 12 - Curva V/f



Fonte: WEG (2024).

A Figura 12 apresenta a curva V/f (tensão por frequência) utilizada no controle escalar de motores de indução. No gráfico, o eixo vertical representa a tensão de saída

(%), enquanto o eixo horizontal indica a frequência de saída (Hz). A tensão de saída varia de 0% a 100% da tensão nominal à medida que a frequência aumenta de 0 Hz até a frequência nominal do motor (WEG, 2024).

A curva é caracterizada por uma rampa linear até um determinado ponto, onde a tensão atinge um valor máximo e se mantém constante. Os pontos marcados como P_0 , P_1 , P_2 , P_3 e P_4 representam valores específicos de tensão e frequência associados a parâmetros do inversor de frequência, como P0136, P0147, P0146, P0145, P0134 e P0142 (WEG, 2024).

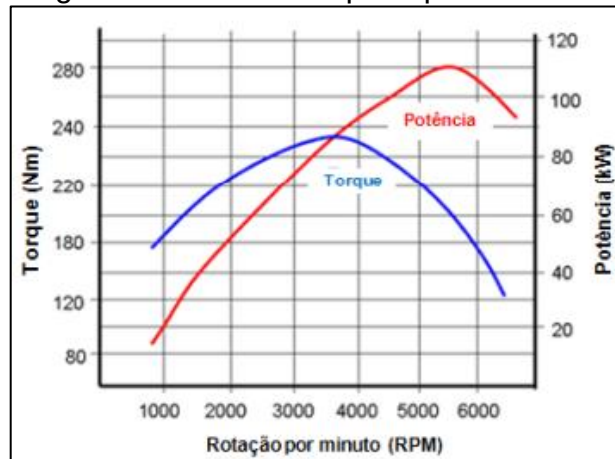
O gráfico mostra que, em baixas frequências, a tensão também é reduzida proporcionalmente para manter a relação constante entre tensão e frequência, garantindo um funcionamento adequado do motor. Após atingir um limite predefinido, a tensão permanece fixa, mesmo com o aumento da frequência, evitando sobrecarga no motor (WEG, 2024).

Essa curva ilustra o princípio fundamental do controle escalar V/f, que busca manter o fluxo magnético do motor estável ao longo da faixa de operação (WEG, 2024).

4.8 VCI COMPARADO A UM VE: CURVAS DE TORQUE E POTÊNCIA

A análise das curvas de torque e potência é fundamental para compreender as diferenças entre motores elétricos e motores a combustão interna (MCI). Nos motores a combustão, o desempenho depende diretamente da rotação do motor, e os picos de torque e potência ocorrem em faixas de rotação distintas. O torque máximo geralmente é entregue em baixas rotações, enquanto a potência máxima ocorre em rotações mais elevadas. Além disso, acima de uma determinada rotação, a eficiência do motor começa a cair, tornando-se menos eficiente. Para contornar essa limitação e otimizar o desempenho em diferentes condições de velocidade, os veículos com motores a combustão utilizam uma transmissão com múltiplas marchas, permitindo a adaptação da relação entre torque e velocidade conforme a necessidade (CAVALCANTE JÚNIOR, 2021).

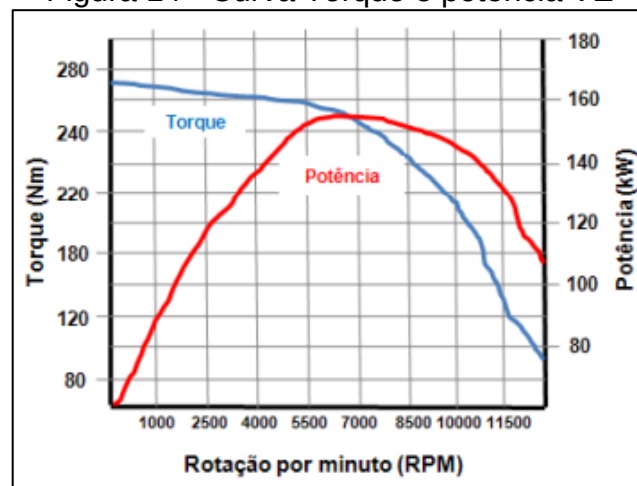
Figura 13 - Curva Torque e potência VCI



Fonte: Cavalcante Júnior (2021).

Por outro lado, os motores elétricos possuem um comportamento distinto. Diferente dos MCI, que necessitam de um câmbio para operar de forma eficiente, os motores elétricos entregam torque instantâneo desde a partida e mantêm esse valor praticamente constante até atingirem sua potência máxima. Isso elimina a necessidade de uma caixa de marchas, pois o próprio motor consegue fornecer aceleração contínua e eficiente ao veículo. Além disso, os motores elétricos suportam uma faixa de rotação superior à dos motores a combustão, permitindo maior flexibilidade operacional sem comprometer a eficiência. Outra vantagem dos motores elétricos em relação aos convencionais é a redução de perdas mecânicas, uma vez que os sistemas de transmissão tradicionais sofrem com atrito entre engrenagens, o que impacta o consumo energético e a eficiência geral do veículo (CAVALCANTE JÚNIOR, 2021).

Figura 14 - Curva Torque e potência VE



Fonte: Cavalcante Júnior (2021).

Essa diferença na curva de torque e potência entre os dois tipos de motores influencia diretamente o comportamento dinâmico dos veículos. Enquanto os motores a combustão exigem trocas de marcha para aproveitar melhor a potência disponível, os motores elétricos proporcionam uma condução mais linear e responsiva, tornando-se uma alternativa tecnológica mais eficiente e simplificada para aplicações automotivas modernas (CAVALCANTE JÚNIOR, 2021).

Embora os motores elétricos não necessitem de câmbio devido à entrega instantânea de torque, alguns fabricantes têm introduzido sistemas que simulam trocas de marcha para aprimorar a experiência de condução. Por exemplo, o Hyundai Ioniq 5 N incorpora o "N e-Shift", uma funcionalidade que emula um câmbio de oito velocidades, proporcionando ao motorista a sensação de mudanças de marcha e aumentando o prazer ao dirigir (HYUNDAI, 2024).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO ROTOR TIPO GAIOLA DE ESQUILO

O motor utilizado na bancada didática é um motor trifásico de indução fabricado pela WEG, modelo com rotor de gaiola de esquilo. Este motor possui potência nominal de 0,75 kW (ou 1,0 HP) e opera a uma frequência de 60 Hz, com uma velocidade síncrona de 1730 RPM. Sua tensão nominal é configurável para 220/380 V, com correntes nominais de 3,02 A em 220 V e 1,75 A em 380 V. O motor possui grau de proteção IP55, adequado, e seu fator de potência nominal é de 0,82.

A eficiência nominal do motor é de 79,5%, o que o torna aceitável para aplicações didáticas, permitindo uma análise detalhada do desempenho em diferentes condições de operação. Este motor será integrado à bancada juntamente com o inversor de frequência, que será detalhado posteriormente. A Figura 15 apresenta a imagem do motor utilizado.

Figura 15 - Motor WEG 0.75 Kw



Fonte: Autoria própria.

5.2 INVERSOR DE FREQUÊNCIA

O inversor de frequência utilizado na bancada didática será o modelo WEG CFW-500. Ele será responsável por ajustar a velocidade e o torque do motor, permitindo a simulação precisa de acelerações. A Figura 16 apresenta o inversor CFW-500, que será integrado ao sistema.

Figura 16 - Inversor de frequência CFW-500 WEG

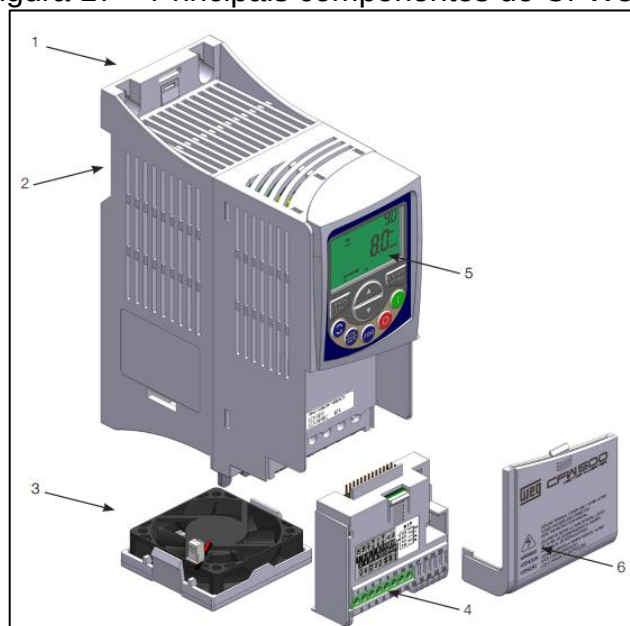


Fonte: Autoria própria.

A Figura 17 apresenta os componentes principais do inversor de frequência CFW500, projetado para o controle eficiente de motores elétricos. O item 1 refere-se ao suporte de fixação, utilizado para montagem em superfícies, enquanto o item 2

corresponde ao suporte para montagem em trilho DIN, oferecendo maior flexibilidade na instalação. O ventilador com suporte de fixação (item 3) desempenha a função de resfriar os componentes internos, garantindo a dissipação de calor e a estabilidade térmica do sistema. O módulo plug-in (item 4) permite a personalização e expansão das funcionalidades do inversor, como a adição de interfaces ou módulos de comunicação. O item 5 corresponde a Interface Homem-máquina (IHM) a qual é basicamente uma interface de operação que possibilita o monitoramento, configuração e controle do inversor de forma intuitiva. Por fim, a tampa frontal (item 6) protege os componentes internos, garantindo segurança durante a operação e acesso facilitado aos módulos quando necessário.

Figura 17 – Principais componentes do CFW500



Fonte: WEG (2024).

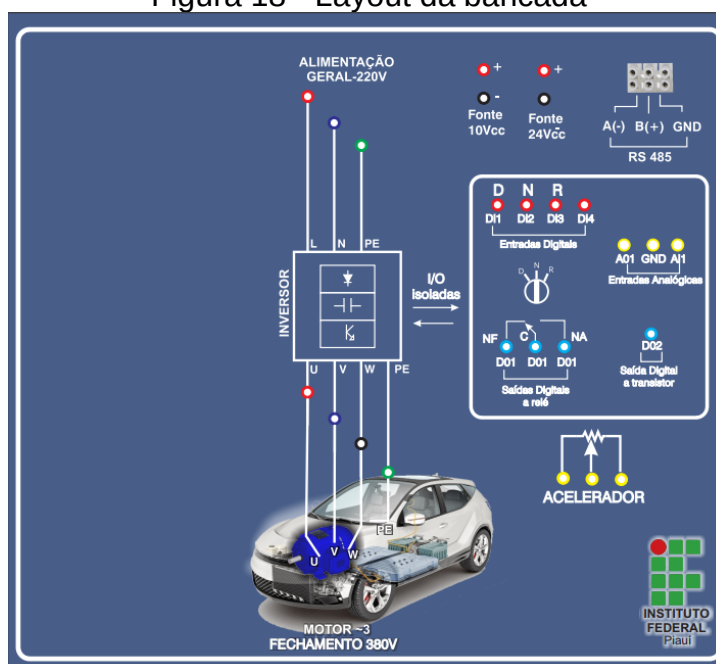
Vale salientar que o inversor de frequência WEG CFW500, utilizado neste projeto, é amplamente reconhecido por sua versatilidade e eficiência, sendo também comumente aplicado em sistemas fotovoltaicos. Essa escolha evidencia a sinergia entre os sistemas de veículos elétricos e as tecnologias de geração fotovoltaica, que compartilham características fundamentais, como a necessidade de conversão e controle de energia elétrica. No contexto de veículos elétricos, o inversor desempenha um papel central ao ajustar a velocidade e o torque do motor de forma precisa, enquanto em sistemas fotovoltaicos, ele é responsável por converter a energia gerada em corrente contínua para corrente alternada, viabilizando sua integração à rede elétrica.

A ampla disponibilidade do CFW500 no mercado e sua capacidade de operar com altos níveis de eficiência reforçam sua adequação tanto para fins pedagógicos quanto para aplicações industriais, tornando-o uma solução ideal para este projeto didático e para a exploração de conceitos relacionados à mobilidade elétrica e sustentabilidade energética.

5.3 BANCADA DE SIMULAÇÃO

A bancada de simulação foi projetada para a análise e a simulação da aceleração de veículos elétricos utilizando um motor de indução trifásico. O sistema é composto por diversas fontes de alimentação, interfaces de entrada e saída, além de módulos de controle que possibilitam a integração com o motor e os componentes auxiliares. Na figura 18, é ilustrado o layout inicial.

Figura 18 - Layout da bancada



Fonte: Autoria própria

5.3.1 Montagem da placa da bancada

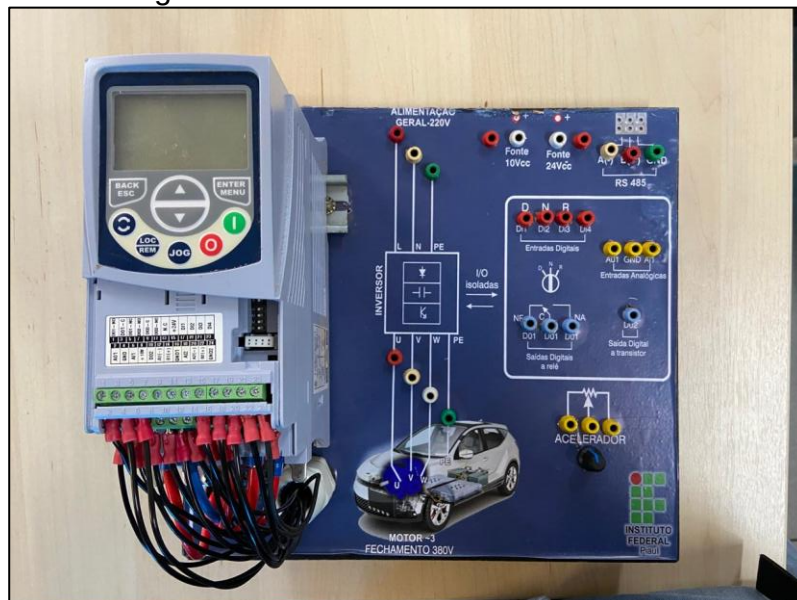
Para a construção da bancada didática, foi utilizada uma placa de MDF com dimensões de 30 cm x 30 cm desbastada a uma altura de 3 cm nas extremidades, escolhida pela sua leveza, resistência e facilidade de usinagem. O layout da bancada, contendo a disposição dos componentes, foi previamente projetado e posteriormente

plotado em adesivo de vinil com as mesmas dimensões da placa. O adesivo de vinil foi aplicado diretamente sobre o MDF, servindo como um guia visual para a montagem e organização das conexões.

As conexões elétricas foram realizadas utilizando dois tipos de cabos: cabos flexíveis de 0,75 mm² para os circuitos de controle e cabos flexíveis de 2,5 mm² para os circuitos de força. Essa escolha foi feita para garantir a segurança e a eficiência do sistema, atendendo às exigências de corrente de cada circuito. Os cabos foram organizados e fixados na placa para evitar cruzamentos desnecessários e minimizar interferências eletromagnéticas entre os circuitos.

Durante o processo de montagem, os componentes foram posicionados e fixados na placa de acordo com o layout do adesivo de vinil, utilizando parafusos e abraçadeiras quando necessário. As conexões elétricas foram realizadas com terminais e conectores adequados, garantindo a robustez e a segurança do sistema. Após a finalização da montagem, foi realizada uma inspeção visual e funcional para verificar a conformidade das conexões e a integridade dos componentes, assegurando que a placa estava pronta para ser integrada ao restante da bancada.

Figura 19 – Placa da bancada montada



Fonte: Autoria própria

5.3.2 Sistema de controle

O sistema de controle conta com um potenciômetro que irá funcionar como acelerador e uma chave seletora de três posições que simula as posições D (Drive),

para partida à frente; N (Neutro), representando o veículo parado em modo neutro; e R (Reverso), simulando a marcha ré, permitindo o ajuste dinâmico da aceleração. O motor de indução trifásico é alimentado por uma rede de fechamento trifásica de 380V, garantindo o funcionamento em condições reais de operação.

Para o controle do motor, foi adotado o método escalar V/f, no qual a tensão e a frequência são ajustadas proporcionalmente para manter a relação V/f constante. Essa abordagem, amplamente utilizada em aplicações industriais, apresenta a vantagem de simplicidade e robustez, sendo adequada para cenários onde não há necessidade de controle dinâmico preciso de torque. A escolha do controle escalar neste projeto se justifica pelo fato de que a bancada didática simula apenas a aceleração do motor sem carga no eixo. Dessa forma, o controle escalar atende ao objetivo do experimento, permitindo a variação da velocidade do motor de forma eficiente e facilitando a compreensão dos conceitos de acionamento elétrico e inversores de frequência.

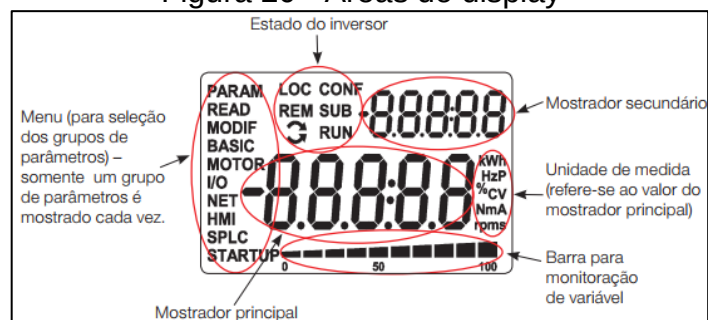
5.4 PARAMETRIZAÇÃO DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA CFW500

A parametrização do inversor de frequência WEG CFW500 é uma etapa essencial para garantir o funcionamento adequado da bancada. Essa configuração permite adaptar o inversor ao motor de indução trifásico utilizado, ajustando os parâmetros necessários para controle de velocidade, torque e proteção.

O processo foi realizado seguindo as orientações descritas no Manual de Programação do Inversor de Frequência CFW500 da WEG, onde cada parâmetro foi ajustado conforme as características nominais do motor e os requisitos específicos da aplicação. Abaixo, detalha-se o processo das configurações realizadas.

5.4.1 HMI e Programação básica

Figura 20 - Áreas do display



Fonte: WEG (2024).

A configuração inicial do inversor de frequência CFW500 foi realizada por meio de sua interface homem-máquina (HMI), que possui um display intuitivo e teclas de navegação para acesso às funções de programação. A interface é composta por diversas áreas descritas na Figura 20, que facilitam a identificação dos estados do inversor e a realização de ajustes.

5.4.2 Parametrização do inversor de frequência

Primeiramente, com base nos dados nominais do motor, apresentados na Tabela 1, foram inseridos os respectivos parâmetros no inversor de frequência para garantir um funcionamento adequado e otimizado. Essas informações, extraídas diretamente da placa de identificação do motor, são essenciais para que o inversor ajuste corretamente a tensão e a frequência de saída, assegurando uma operação eficiente e dentro dos limites especificados pelo fabricante.

A parametrização foi realizada por meio da interface do inversor, onde cada valor do motor foi inserido nos parâmetros correspondentes. No manual do inversor WEG, esses valores não são inseridos diretamente, mas sim por meio de códigos numéricos que representam cada grandeza específica. Assim, os seguintes parâmetros foram configurados:

- P0400 – Tensão nominal do motor: 220 V
- P0401 – Corrente nominal do motor: 3,08 A
- P0402 – Velocidade nominal do motor: 1730 rpm
- P0403 – Frequência nominal do motor: 60 Hz
- P0404 – Potência nominal do motor: 0,75 kW

Esses ajustes permitem que o inversor forneça a energia necessária ao motor de forma controlada, respeitando suas características elétricas e térmicas. Além disso, a correta parametrização evita problemas como sobrecarga, aquecimento excessivo e perda de eficiência, garantindo um desempenho confiável da bancada.

Tabela 1 - Dados nominais do motor

Parâmetro	Valor
Fabricante	WEG
Modelo	FP50604
Tipo	Motor de Indução - Gaiola
Frequência Nominal	60 Hz
Potência Nominal	0,75 kW (1 CV)
Tensão Nominal	220/380 V
Corrente Nominal	3,08 A (220V) / 1,78 A (380V)
Rotação Nominal	1.730 RPM
Fator de Serviço (SF)	1.15
Grau de Proteção	IP55
Isolação	Classe B
Rendimento	78%
Fator de Potência ($\cos\phi$)	0.82

Fonte: Autoria própria, com base na placa identificação do motor WEG

Após a configuração dos dados nominais do motor, foi selecionado o modo de controle V/f (fluxo escalar). A configuração foi realizada por meio do parâmetro P0202 – Modo de controle: V/f, garantindo que a relação entre tensão e frequência aplicada ao motor fosse mantida de maneira eficiente e estável.

Além disso, as rampas de aceleração e desaceleração foram ajustadas para garantir transições suaves na variação de velocidade do motor, prevenindo picos de corrente e reduzindo o estresse mecânico. Os parâmetros configurados foram:

- P0100 – Tempo de aceleração: Definido em 10 segundos, permitindo uma partida suave, evitando sobrecorrentes no motor.
- P0101 – Tempo de desaceleração: Também configurado para 10 segundos, garantindo uma redução de velocidade progressiva, prevenindo paradas bruscas e desgastes prematuros.

A configuração das entradas e saídas digitais do inversor foi ajustada visando maior flexibilidade e integração com o sistema de automação. Primeiramente, a seleção da fonte de comando foi alterada para permitir controle remoto:

- P0220 – Seleção da fonte LOC/REM: Ajustado para "Sempre Remoto", garantindo que o controle do inversor seja realizado exclusivamente por fontes externas, impedindo acionamentos locais não desejados.
- P0222 – Seleção da referência remota: Configurada para SoftPLC, permitindo que a velocidade seja definida diretamente pelo sistema de automação, garantindo maior precisão e integração.

- P0226 – Seleção de giro: Ajustada para SoftPLC, possibilitando a ativação do sentido de giro por meio da lógica programada, sem necessidade de comandos físicos.
- P0227 – Função gira/para: Controlada pelo SoftPLC, permitindo que o acionamento e a parada do motor sejam gerenciados pelo software.
- P0228 – Ativação do JOG remoto: Configurada para SoftPLC, garantindo que o motor opere com pequenos deslocamentos de forma automatizada conforme a lógica programada.

Além dessas configurações, todas as entradas digitais foram programadas para operar via SoftPLC, além da entrada analógica AI1, substituindo acionamentos físicos por comandos gerenciados pelo software, otimizando a flexibilidade operacional. As entradas ajustadas foram:

- P0263 – Entrada DI1: Configurada para SoftPLC.
- P0264 – Entrada DI2: Configurada para SoftPLC.
- P0265 – Entrada DI3: Configurada para SoftPLC.
- P0266 – Entrada DI4: Configurada para SoftPLC.
- P0231 – Função do sinal AI1: Configurada para SoftPLC.

Essa configuração centraliza o controle do inversor dentro do sistema de automação, reduzindo a necessidade de modificações físicas no hardware e permitindo ajustes rápidos na lógica de operação.

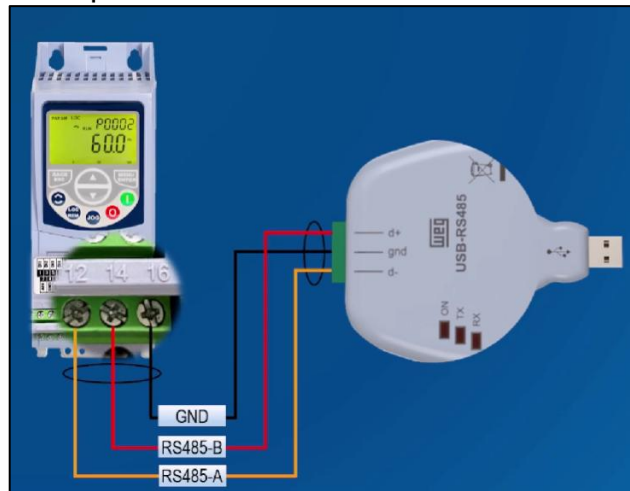
Com essa parametrização, o inversor de frequência CFW500 está totalmente integrado ao SoftPLC, permitindo que toda a lógica de controle seja desenvolvida e modificada diretamente no software. Isso proporciona maior flexibilidade e eficiência na operação do motor, garantindo um funcionamento seguro e otimizado dentro do sistema de automação.

5.5 DESENVOLVIMENTO DA PROGRAMAÇÃO LADDER NO WLP

Para complementar o controle da bancada, a programação em linguagem Ladder desenvolvida no software WLP da WEG desempenha um papel fundamental na gestão do sistema, garantindo uma lógica segura e flexível para a operação. Com essa abordagem, é possível implementar regras como impedir que o motor seja acionado diretamente em marcha à frente ou ré sem passar pelo estado de neutro, prevenindo partidas bruscas e assegurando um controle mais estruturado. Além disso, a lógica programada pode ser ajustada conforme necessário, permitindo futuras

modificações no comportamento do sistema sem necessidade de alterações no hardware.

Figura 21 - Esquema de conexão entre conversor e o inversor.



Fonte: WEG (2022).

Para realizar a comunicação entre o software WLP da WEG e o inversor, é necessário o uso de um conversor conectado ao equipamento. Esse conversor, do tipo RS485, permite a troca de informações entre os dispositivos, viabilizando o controle adequado do motor. Na Figura 21, é apresentado o esquema de conexão entre o inversor e o conversor.

Figura 22 - Conversor usado na bancada.



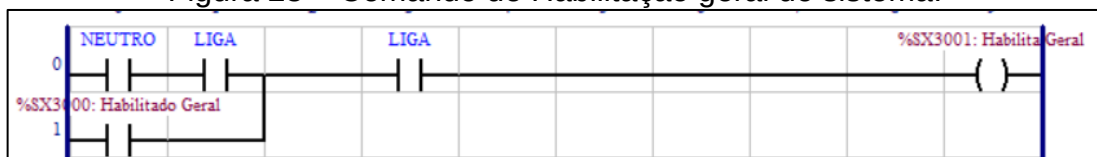
Fonte: Autoria própria

5.5.1 Lógica de programação

A programação desenvolvida tem como objetivo principal a implementação do controle de acionamento de um motor elétrico por meio do inversor de frequência CFW500. A lógica foi estruturada de maneira a garantir um funcionamento eficiente, permitindo o controle da habilitação, do sentido de rotação e da velocidade do motor.

Inicialmente, para que o sistema possa operar, é necessário que o comando de habilitação geral seja ativado. Essa função é representada pelo contato denominado "LIGA", o qual, quando acionado em conjunto com o contato NEUTRO, utilizando a função lógica "AND", fecha o circuito e ativa a saída associada ao bit %SX3001, correspondente à habilitação geral do sistema e a função bit %SX3000 Habilitado Geral funciona como um selo. Esse procedimento garante que somente após a ativação desses comandos outros circuitos possam ser acionados, proporcionando uma segurança adicional ao sistema, além disso para simular a condição de liga de um carro elétrico, o qual somente irá ligar caso o ligar e neutro estiverem acionados, dependendo do veículo.

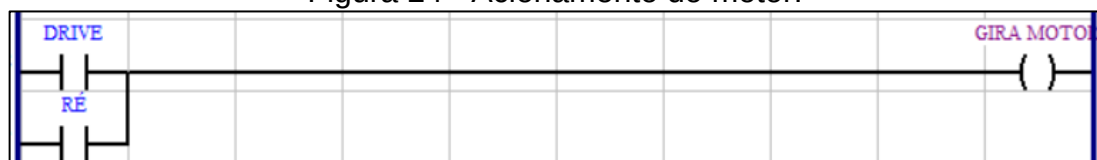
Figura 23 – Comando de Habilitação geral do sistema.



Fonte: Autoria Própria

O acionamento do motor é gerenciado através do contato "DRIVE", que, ao ser ativado, permite a energização da linha de comando do motor. Associado a esse contato, foi utilizada a função lógica "OR", onde torna possível acionar o motor "RE". O contato "GIRA MOTOR" é utilizado para efetivar o acionamento do motor, garantindo que a ativação ocorra somente quando todas as condições prévias forem satisfeitas.

Figura 24 - Acionamento do motor.

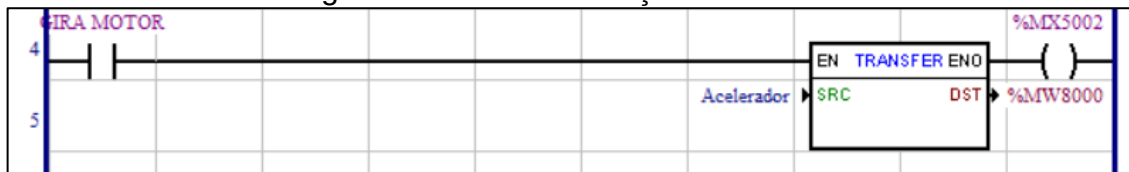


Fonte: Autoria própria

A programação também inclui a transferência de um valor de referência para o controle de velocidade do motor. Esse processo é realizado por meio do bloco de

função "TRANSFER", cuja função é copiar um valor de origem (SRC) para um destino (DST). No caso específico do programa, o valor do acelerador é transferido para a variável de controle de velocidade que no caso é um marcador de word, %MW8000, permitindo que a velocidade do motor seja ajustada dinamicamente com base nos comandos fornecidos pelo operador ou pelo sistema de automação, nesse caso utiliza-se um potenciômetro para o controle da velocidade que está na entrada analógica AI1.

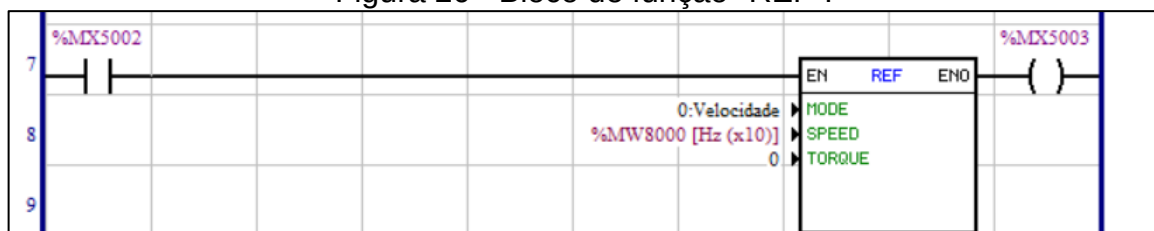
Figura 25 - Bloco de função "Transfer".



Fonte: Autoria própria

O ajuste da velocidade do motor é realizado pelo bloco de função "REF", responsável por configurar parâmetros essenciais do controle do inversor. Esse bloco recebe como entrada o valor de referência de velocidade e ajusta três variáveis principais: MODE, SPEED e TORQUE. O parâmetro MODE define o modo de operação do controle de velocidade, o parâmetro SPEED ajusta a velocidade angular pela frequência de rotação, e o parâmetro TORQUE controla a resposta de torque do sistema, garantindo um funcionamento mais eficiente e adequado às condições de operação, nesse caso podemos ver que o ajuste de velocidade está sendo controlado pelo marcador de word %MW8000, que é o valor transferido do acelerador.

Figura 26 - Bloco de função "REF".

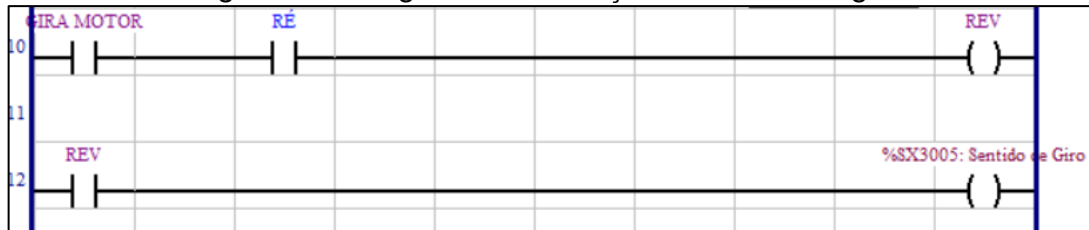


Fonte: Autoria própria

O sentido de giro do motor também é controlado de forma lógica na programação Ladder. Quando o contato "GIRA MOTOR" está ativado em conjunto com o contato "RE", o bit "REV" é acionado, indicando a necessidade de reversão da rotação do motor. Esse comando é associado ao bit %SX3005, que representa o sentido de giro do motor no inversor de frequência, garantindo que a reversão ocorra

corretamente sempre que necessário. É importante destacar que, devido ao formato físico da chave seletora, ela obrigatoriamente passa pela posição neutra ao alternar entre ré e drive.

Figura 27 – Lógica de mudança de sentido de giro.



Fonte: Autoria própria

Essa lógica de programação proporciona um controle eficiente e flexível para o motor, permitindo ajustes dinâmicos de velocidade, controle preciso do sentido de rotação e uma estrutura segura de habilitação do sistema. Além disso, o uso de blocos funcionais como "TRANSFER" e "REF" facilita a parametrização e a integração do controle de velocidade dentro do sistema de automação.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A implementação da bancada didática para análise e simulação da aceleração de veículos elétricos demonstrou a eficácia do sistema desenvolvido, permitindo a verificação prática dos conceitos abordados ao longo do projeto. A montagem e parametrização do inversor de frequência WEG CFW500, juntamente com a programação Ladder no software WLP, possibilitaram o controle preciso do motor de indução trifásico, garantindo ajustes dinâmicos de velocidade e sentido de rotação. Além disso, a monitoração online da bancada pelo WLP permitiu acompanhar em tempo real o acionamento dos contatos do circuito, possibilitando uma análise do funcionamento lógico da programação. A seguir, serão apresentados os registros fotográficos da bancada em operação, a monitoração do sistema via software e a análise gráfica do ajuste da entrada analógica AI1, destacando sua influência na resposta do motor.

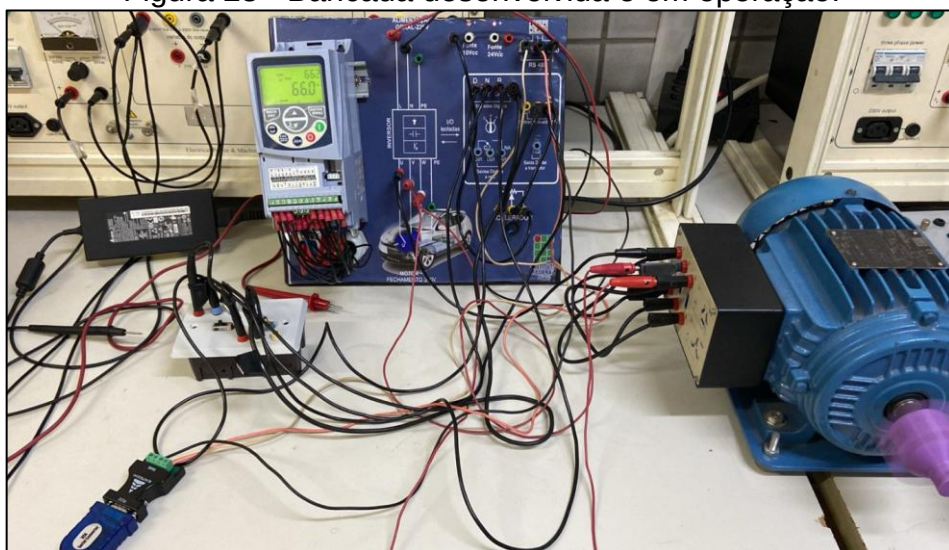
6.2 BANCADA DESENVOLVIDA

A bancada didática construída para este estudo foi projetada com o objetivo principal de simular, de forma inicial, a aceleração de veículos elétricos, utilizando um motor de indução trifásico acionado por um inversor de frequência WEG CFW500. A concepção e montagem da estrutura foram realizadas de maneira a garantir a funcionalidade do sistema, permitindo a validação experimental da lógica de controle desenvolvida.

Durante o processo de construção, foram considerados aspectos fundamentais para assegurar a confiabilidade e a eficiência do sistema, incluindo a adequada fixação dos componentes e a implementação de um painel de controle intuitivo. O inversor de frequência foi parametrizado para operar dentro das condições estabelecidas pelo projeto, possibilitando a variação controlada da velocidade e do sentido de rotação do motor, fatores essenciais para a simulação da aceleração de um veículo elétrico.

Com a montagem concluída, foi possível verificar que a bancada atende aos requisitos estabelecidos, proporcionando um ambiente seguro e adequado para o estudo do acionamento elétrico. Além disso, a estrutura desenvolvida permite futuras expansões, como a inclusão de novas estratégias de controle e sensores para a obtenção de dados mais detalhados sobre o desempenho do motor. Dessa forma, a construção da bancada não apenas cumpre seu papel como ferramenta didática, mas também abre possibilidades para novas investigações e aprimoramentos.

Figura 28 - Bancada desenvolvida e em operação.

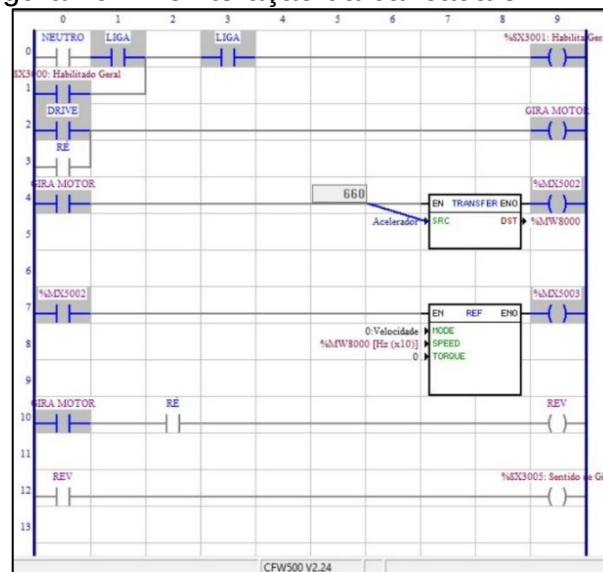


Fonte: Autoria própria

6.3 MONITORAÇÃO ONLINE DA BANCADA EM FUNCIONAMENTO

A monitoração online da bancada foi realizada por meio do software WLP, permitindo a visualização em tempo real do funcionamento do circuito de controle desenvolvido. Através desse monitoramento, foi possível acompanhar a operação dos contatos e a ativação dos comandos programados em linguagem Ladder, garantindo a verificação do correto acionamento do motor e da resposta do sistema às entradas configuradas.

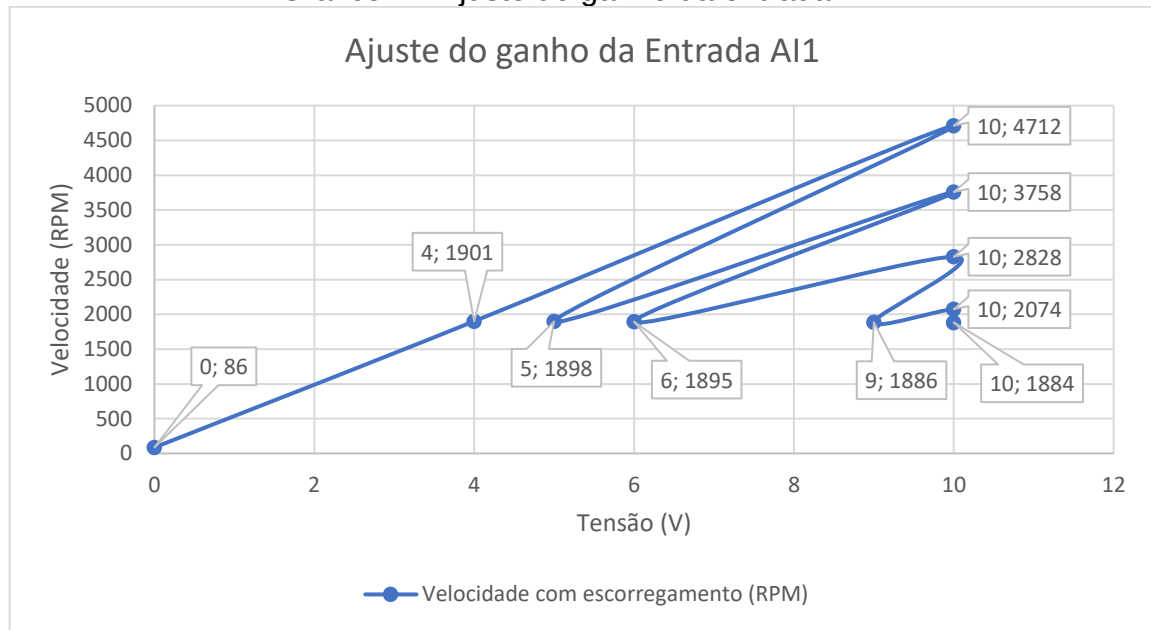
Figura 29 - Monitoração da bancada em DRIVE



Fonte: Autoria própria

Na figura 29, observa-se que os contatos responsáveis pela habilitação do inversor e pelo acionamento do motor estão ativados, indicando que o sistema está em funcionamento. Além disso, o acelerador encontra-se em operação, indicando a frequência 66 Hz, no caso a velocidade máxima parametrizada, enviando um sinal para a entrada analógica do inversor, o que resulta no controle da velocidade do motor. Essa monitoração permite acompanhar o comportamento do sistema, verificando se os comandos estão sendo corretamente interpretados e garantindo a funcionalidade esperada da lógica de controle implementada.

Gráfico 1 - Ajuste do ganho da entrada AI1



Fonte: Autoria própria

O gráfico apresentado ilustra a relação entre a velocidade do sistema (rpm), o ganho ajustado e a tensão aplicada. Variando o ganho da entrada analógica AI1 podemos analisar a influência desse parâmetro na sensibilidade do potenciômetro e, conseqüentemente, no controle da velocidade do motor. A relação entre a tensão aplicada e a velocidade demonstrou que a redução do ganho impacta diretamente a resposta do motor à variação da tensão de entrada.

Observou-se que, com um ganho de 0,050, a resposta do motor foi mais acentuada, resultando em uma velocidade de 4712 RPM quando aplicada uma tensão de 10V. Esse comportamento indica uma alta sensibilidade do potenciômetro, tornando a variação de velocidade mais abrupta. À medida que o ganho foi reduzido para 0,040, a velocidade máxima atingida sob a mesma tensão foi de 3758 RPM, evidenciando um efeito de amortecimento na resposta do sistema. Com ganhos ainda menores, como 0,030, 0,022 e 0,020, a velocidade máxima obtida foi progressivamente reduzida, chegando a 1884 RPM com 10V no menor ganho testado. Esse resultado demonstra que a diminuição do ganho torna a resposta do motor mais gradual, permitindo um controle de velocidade mais progressivo e estável.

Esse comportamento é crucial para a calibração do sistema, pois demonstra como o ajuste do ganho influencia a resposta da velocidade em função da tensão aplicada. Um ganho elevado torna o sistema mais sensível às variações de tensão, podendo levar a oscilações indesejadas, enquanto um ganho reduzido suaviza essa

resposta, proporcionando um controle mais progressivo e estável. Dessa forma, a análise do gráfico permite identificar o ajuste de ganho mais adequado para garantir uma operação eficiente e estável do sistema.

6.5 GUIA DE PARAMETRIZAÇÃO DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA CFW500

A parametrização do inversor é um processo essencial para garantir um controle eficiente do motor na bancada didática. Seguir corretamente os passos abaixo ajudará a configurar o equipamento de forma precisa e funcional e deixar pronto para funcionar corretamente via SoftPLC.

Essa instrução busca manter a informação clara e acessível, tornando a parametrização mais intuitiva para quem está aprendendo.

Tabela 3 - Guia de Parametrização do inversor para aplicação na bancada

GUIA DE PARAMETRIZAÇÃO DO INVERSOR CFW500 PARA OPERAR BANCADA DE SIMULAÇÃO DE ACELERAÇÃO DE EV'S			
Parâmetro	Função	Valor Padrão	Valor Ajustado
P0204	Carrega/Salva Parâm.	0	5 = Reset de fábrica (60Hz)
P0220	Seleção Fonte LOC/REM	2 = Tecla HMI (LOC)	1 = Sempre remoto
P0222	Seleção Referência REM	1 = AI1	12 = SoftPLC
P0226	Seleção Giro REM	4 = DIx	12 = SoftPLC
P0227	Seleção Gira/Para REM	1 = DIx	5 = SoftPLC
P0228	Seleção JOG REM	2 = DIx	6 = SoftPLC
P0231	Função do Sinal AI1	0 = Ref. Vel	7 = SoftPLC
P0232	Ganho da Entrada AI1	1,000	Conforme ajuste (Ver 6.4)
P0263	Função da Entrada DI1	1 = Gira/Para	21 = SoftPLC
P0264	Função da Entrada DI2	8 = Sentido Giro Horário	21 = SoftPLC
P0265	Função da Entrada DI3	-	21 = SoftPLC
P0266	Função da Entrada DI4	10 = JOG	21 = SoftPLC
P0399	Rendimento Nom. Motor	75%	Conforme dados do motor
P0400	Tensão Nom. Moto	-	Conforme dados do motor
P0401	Corrente Nom. Motor	-	Conforme dados do motor
P0402	Velocidade Nom. Motor	1710 (1425) rpm	Conforme dados do motor
P0403	Frequência Nom. Motor	60 (50) Hz	Conforme dados do motor
P0404	Potência Nom. Motor	-	Conforme dados do motor
P0407	Fator Pot. Nom. Motor	0,80	Conforme dados do motor

Fonte: Autoria própria

7 CONCLUSÃO

A implementação da bancada didática para análise e simulação da aceleração de veículos elétricos utilizando um motor de indução trifásico e um inversor de frequência foi realizada com sucesso, cumprindo seu principal objetivo de fornecer uma ferramenta prática para ensino, pesquisa e extensão. A ausência de equipamentos semelhantes no Instituto Federal do Piauí (IFPI) reforça a importância deste projeto na capacitação de estudantes e profissionais na área de eletromobilidade.

Os testes realizados demonstraram a influência direta da parametrização do inversor no comportamento do motor, evidenciando a relação entre o ajuste do ganho da entrada analógica AI1 e a resposta da velocidade em função da tensão aplicada. Foi possível observar que, à medida que o ganho do inversor foi reduzido, a sensibilidade do potenciômetro também diminuiu, tornando o controle da velocidade mais progressivo. Esse comportamento ressalta a importância do ajuste correto dos parâmetros para garantir um desempenho adequado do sistema.

Além de contribuir para a modernização do ensino, o projeto atende ao objetivo de promover a integração da bancada aos recursos didáticos do IFPI, facilitando sua utilização em disciplinas relacionadas à engenharia mecânica, automação e elétrica. Dessa forma, a bancada possibilita a aplicação prática desses conhecimentos, conectando a teoria da mobilidade elétrica a uma simulação inicial de seu funcionamento.

Contudo, a documentação do processo permite a replicação da bancada em outras instituições, ampliando seu impacto no ensino e na pesquisa. Dessa forma, este trabalho contribui significativamente para a modernização da aprendizagem em engenharia mecânica, elétrica, automação e controle, entre outras, proporcionando um ambiente experimental que auxilia na compreensão de conceitos fundamentais sobre motores elétricos e inversores de frequência e automação.

8 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Para a continuidade deste estudo, algumas melhorias podem ser implementadas, visando ampliar a aplicabilidade da bancada didática e aprofundar a análise do comportamento do motor de indução sob diferentes condições

operacionais. Uma das possibilidades consiste na inclusão de sensores para medição de parâmetros elétricos, como corrente, tensão e frequência. A obtenção desses dados em tempo real permitiria uma análise mais detalhada do desempenho do motor, possibilitando a identificação de padrões de funcionamento, variações de carga e eventuais anomalias no sistema. Com essa abordagem, seria viável comparar os resultados experimentais com os valores teóricos previstos, contribuindo para um estudo mais aprofundado da eficiência energética e das perdas do motor. Outra proposta relevante envolve a implementação de algoritmos de controle avançados, como o controle proporcional-integral-derivativo (PID).

REFERÊNCIAS

BOLDEA, I.; NASAR, S. A. **Induction Machines Handbook**. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2010.

BOLTON, William. **Engenharia de Controle**. São Paulo: Makron Books do Brasil, 1999. Disponível em: https://archive.org/download/controle-engenharia-de-controle-bolton/Controle%20-%20Engenharia-de-Controle-BOLTON_text.pdf. Acesso em: 26 jan. 2025.

BORTONI, E. da C. **Máquinas Elétricas: Fundamentos e Aplicações**. São Paulo: Érica, 2010.

BRESOLIN, Adriano de Andrade. **Eletromobilidade: volume 7**. Florianópolis: ENBPar/IFSC, 2023. 130 p. (Projeto EnergIF, vol. 7). ISBN 978-65-85912-01-3.

CAVALCANTE JÚNIOR, Luiz Claudio Paulino. **Análise comparativa da substituição de motores a combustão por motores elétricos no setor de transportes**. 2021. 14 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciência e Tecnologia) – Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/server/api/core/bitstreams/04aa9b15-5775-46e4-a210-0016f30bfcbb/content>. Acesso em: 30 jan. 2025.

DELGADO, Fernanda; COSTA, José Evaldo Geraldo; FEBRARO, Júlia; SILVA, Tatiana Bruce da. **Carros elétricos**. Coordenação editorial: Felipe Gonçalves. Rio de Janeiro: FGV Energia, maio 2017. Disponível em: https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/caderno_carros_eletricos-fgv-book.pdf. Acesso em: 2 dez. 2024.

EHSANI, Mehرداد; GAO, Yimin; LONGO, Stefano; EBRAHIMI, Kambiz. **Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2018.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C. Jr.; UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas**. 6. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2019.

FUSCO, André. **Eficiência energética - Eficiência do motor de combustão interna / Energy Efficiency - Efficiency of an Internal Combustion Engine**. LinkedIn, 16 abr. 2021. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/efici%C3%Aancia-energ%C3%A9tica-do-motor-de-combust%C3%A3o-interna-andr%C3%A9-fusco/>. Acesso em: 14 fev. 2025.

GILLESPIE, T. D. **Fundamentals of Vehicle Dynamics**. Warrendale: SAE International, 2021.

GURU, B. S.; HIZIROGLU, H. R. **Electric Machinery and Transformers**. 3rd ed. New York: Oxford University Press, 2001.

HEYWOOD, J. B. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. 2. ed. Nova York: McGraw-Hill, 2018. Disponível em:

https://www.iust.ac.ir/files/mech/ayatgh_c5664/files/internal_combustion_engines_haywood.pdf. Acesso em: 05 jan. 2025.

HYUNDAI Ioniq 5 N review: fake shifting, real fun. **The Verge**, 2024. Disponível em: <https://www.theverge.com/2024/11/29/24308950/hyundai-ioniq-5-n-review-price-specs-photos>. Acesso em: 13 fev. 2025.

JUSTOS. **Carro a hidrogênio: o que é, vantagens e como funciona**. São Paulo: Justos, 2024. Disponível em: <https://www.justos.com.br/blog/carro-a-hidrogenio>. Acesso em: 05 jan. 2025.

LARMINIE, James; LOWRY, John. **Electric Vehicle Technology Explained**. 2. ed. Chichester: Wiley, 2012.

NAGRATH, I. J.; KOTHARI, D. P. **Electric Machines**. 5. ed. Nova Deli: McGraw Hill, 2020.

PINegócios. **Vendas de carros elétricos no Piauí sobem 170%**. Teresina: PINegócios, 2024. Disponível em: <https://pinegocios.com.br/noticia/2275-vendas-de-carros-eletricos-no-piaui-sobem-170>. Acesso em: 13 jan. 2025.

SILVA, A. V. **Máquinas de Indução Trifásicas**. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

WEG S.A. **CFW500 - Programação SoftPLC e Comunicação - Aula 01**. 2022. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=AfzshW8snCg>. Acesso em: 13 fev. 2025.

WEG Equipamentos Elétricos S.A. **Manual de programação CFW500**. 1.8x. Jaraguá do Sul: WEG, 2024. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hee/h0b/WEG-cfw500-manual-de-programacao-10001469555-1.8x-manual-portugues-br.pdf>. Acesso em: 5 jan. 2025.

WEG. **Manual do Inversor de Frequência CFW500**. Disponível em: <https://www.weg.net>. Acesso em: 25 jan. 2025.

WILDI, T. **Electrical Machines, Drives and Power Systems**. 6. ed. Pearson New International Edition, 2014.