



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ROBERT RAMOS DE LIMA**

**UMA REVISÃO SOBRE FRENAGEM REGENERATIVA EM MOTORES DE  
INDUÇÃO TRIFÁSICOS**

**FORTALEZA**

**2026**

ROBERT RAMOS DE LIMA

UMA REVISÃO SOBRE FRENAGEM REGENERATIVA EM MOTORES DE INDUÇÃO  
TRIFÁSICOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Luiz  
Marcelo Antunes

FORTALEZA

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

L71r Lima, Robert Ramos de.  
Uma revisão sobre frenagem regenerativa em motores de indução trifásicos / Robert Ramos de Lima. –  
2026.  
37 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,  
Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2026.  
Orientação: Prof. Dr. Fernando Luiz Marcelo Antunes.

1. Motores de indução. 2. Eficiência energética. I. Título.

CDD 621.3

---

ROBERT RAMOS DE LIMA

UMA REVISÃO SOBRE FRENAGEM REGENERATIVA EM MOTORES DE INDUÇÃO  
TRIFÁSICOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do  
Centro de Tecnologia da Universidade Federal  
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do  
grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Fernando Luiz Marcelo  
Antunes (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Eng. Gabriel Lino Garcia de Lima  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Doutorando Robério Oliveira Rodrigues  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À minha família, por sua capacidade de acreditar em mim e investir em mim. Mãe, seu cuidado e dedicação foi que deram, em alguns momentos, a esperança para seguir. Pai, sua presença significou segurança e certeza de que não estou sozinho nessa caminhada.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço de forma especial ao Prof. Dr. Fernando Antunes por me orientar nesse Trabalho de Conclusão de curso e por ter sido meu professor durante a cadeira de Máquinas Elétricas, tema deste trabalho.

Aos meus pais, expresso meu profundo agradecimento pelo apoio incondicional, pela compreensão diante das ausências, pelo incentivo constante e pela confiança depositada em mim ao longo de todos esses anos. O suporte emocional, os conselhos e o exemplo de esforço e responsabilidade foram essenciais para que eu pudesse alcançar este objetivo.

Agradeço a todos os professores por me proporcionar o conhecimento não apenas racional, mas a manifestação do caráter e afetividade da educação no processo de formação profissional, por tanto que se dedicaram a mim, não somente por terem me ensinado, mas por terem me feito aprender.

Aos meus colegas de curso, deixo meu agradecimento pela convivência, pelas trocas de conhecimento, pelas discussões técnicas, pelo apoio mútuo e pelos momentos compartilhados ao longo dessa jornada. A experiência acadêmica foi enriquecida pelo companheirismo e pela colaboração entre todos.

Também agradeço aos autores, pesquisadores e profissionais cujos trabalhos serviram de base teórica e metodológica para o desenvolvimento deste estudo. As contribuições científicas existentes na literatura foram essenciais para a fundamentação, análise e discussão dos resultados apresentados.

E, por fim, à instituição de ensino, agradeço pela qualidade do ensino oferecido, pelo ambiente acadêmico proporcionado e pela contribuição significativa na construção do conhecimento ao longo do curso. Cada disciplina cursada e cada experiência acadêmica vivenciada foram determinantes para a consolidação da base teórica e prática necessária à realização deste trabalho.

“Somente aquele que sonha é que, um dia, pode conquistar!”

(Autor desconhecido)

## RESUMO

O Motor de Indução trifásico (MIT) é extremamente importante na indústria, sendo o mais utilizado nesse ramo. Diante disso, surgem muitos pontos a serem explorados, dentre eles a frenagem regenerativa. Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresenta uma revisão sobre a aplicação da frenagem regenerativa em motores de indução trifásicos, com foco em seus princípios de funcionamento, limitações técnicas e potencial de recuperação energética. Ademais, o trabalho baseia-se em uma pesquisa bibliográfica exploratória, descritiva e qualitativa, fundamentada na análise de livros, artigos científicos e catálogos técnicos. Não foram realizados experimentos práticos ou simulações computacionais, sendo o estudo conduzido exclusivamente a partir de dados secundários disponíveis na literatura. Em particular, foram analisados dados provenientes de estudos anteriores envolvendo motores de indução operando em regime gerador durante a frenagem. Os resultados indicam que, embora a frenagem regenerativa não permita a recuperação total da energia consumida, é possível reaproveitar uma parcela significativa, que pode atingir valores em torno de 15% a 30%, dependendo das condições de operação, do tipo de aplicação e da frequência de ciclos de frenagem. Assim, a frenagem regenerativa em motores de indução trifásicos constitui uma alternativa viável para a melhoria da eficiência energética em sistemas industriais e de transporte elétrico. Entretanto, suas limitações físicas, operacionais e de controle devem ser cuidadosamente consideradas no projeto e na aplicação desses sistemas, indicando a necessidade de estudos futuros com abordagens experimentais e análises mais detalhadas.

**Palavras-chave:** Motores de indução. Eficiência energética.

## ABSTRACT

The three-phase induction motor plays an extremely important role in industry and is the most widely used type of electric motor in this sector. In this context, several aspects can be explored, among which regenerative braking stands out. This Undergraduate Final Project presents an review of the application of regenerative braking in three-phase induction motors, focusing on its operating principles, technical limitations, and energy recovery potential. Furthermore, this work is based on an exploratory, descriptive, and qualitative bibliographic research, grounded on the analysis of books, scientific articles, and technical datasheets. No practical experiments or computational simulations were carried out; the study was conducted exclusively using secondary data available in the literature. In particular, data from previous studies involving induction motors operating in generator mode during braking were analyzed. The results indicate that although regenerative braking does not allow for the full recovery of the consumed energy, a significant portion can be recovered, reaching values of approximately 15% to 30%, depending on operating conditions, application type, and the frequency of braking cycles. Therefore, regenerative braking in three-phase induction motors constitutes a viable alternative for improving energy efficiency in industrial systems and electric transportation. However, its physical, operational, and control-related limitations must be carefully considered in the design and application of such systems, highlighting the need for future studies employing experimental approaches and more detailed analyses.

**Keywords:** induction motors. Energy efficiency.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – MIT Gaiola de Esquilo . . . . .	18
Figura 2 – MIT Bobinado . . . . .	18
Figura 3 – A produção de conjugado induzido em um motor de indução. (a) Campo Magnético do Estator; (b) Campo Magnético do Estator e Corrente induzida no Rotor; (c) Campo Magnético Líquido. . . . .	19
Figura 4 – Reações de um rotor de gaiola de esquilo em um campo de dois polos. . . . .	20
Figura 5 – A produção de conjugado induzido em um motor de indução. (a) Campo Magnético com carga leve; (b) Campo Magnético com carga pesada. . . . .	22
Figura 6 – Curva do conjugado induzido versus velocidade . . . . .	22
Figura 7 – Curva do conjugado induzido versus velocidade com as regiões de operação . . . . .	23
Figura 8 – Variação do Ponto de operação na curva Torque versus velocidade . . . . .	24
Figura 9 – Inversor de Frequência WEG CFW501 . . . . .	25
Figura 10 – Onda Quadrada com Duty Cycle . . . . .	25
Figura 11 – Controlador Lógico Programável . . . . .	26
Figura 12 – Diagrama CLP inversor e MIT . . . . .	27
Figura 13 – Medição da energia média regenerada . . . . .	29

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – DATASHEET DO MOTOR 1LG0166-4AA70 – 20 CV . . . . .	30
---	----



## LISTA DE SÍMBOLOS

$B_r$	Densidade de fluxo magnético no rotor
$B_s$	Densidade de fluxo magnético no estator
$E_{consumida}$	Energia consumida
$E_{frenagem}$	Energia gerada pela frenagem regenerativa
$E_{\%recuperada}$	Porcentagem de energia recuperada
$f$	Frequência
$f_r$	Frequência elétrica do rotor
$f_{se}$	Frequência elétrica do estator
$k$	Constante de proporcionalidade do torque
$n_{mec}$	Velocidade mecânica
$n_{sinc}$	Velocidade síncrona do campo girante
$P$	Número de polos do motor
$Pot_{ativa}$	Potência ativa
$Pot_{mec}$	Potência mecânica
$s$	Escorregamento
$V$	Tensão
$\Delta t$	Intervalo de tempo
$\Phi$	Fluxo magnético
$\Phi_1$	Fluxo magnético na situação de o motor ser alimentado por 440 V, 60 Hz
$\Phi_2$	Fluxo magnético na situação de o motor ser alimentado por 380 V, 60 Hz
$\phi_2$	ângulo do fator de potência do rotor
$\eta$	Rendimento
$\omega$	Velocidade angular
$\tau$	Torque
$\tau_1$	Torque na situação de o motor ser alimentado por 440 V, 60 Hz
$\tau_2$	Torque na situação de o motor ser alimentado por 380 V, 60 Hz

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
<b>1.1</b>	<b>Contextualização</b>	<b>14</b>
<b>1.2</b>	<b>Importância da frenagem regenerativa</b>	<b>15</b>
<b>1.3</b>	<b>Problema de pesquisa</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>16</b>
<b>2.1</b>	<b>Motor de Indução Trifásico</b>	<b>17</b>
<b>2.1.1</b>	<i>Aspectos construtivos</i>	<b>17</b>
<b>2.1.1.1</b>	<i>Estatótor</i>	<b>17</b>
<b>2.1.1.2</b>	<i>Rotor</i>	<b>17</b>
<b>2.1.1.3</b>	<i>Entreferro</i>	<b>18</b>
<b>2.1.2</b>	<i>Escorregamento</i>	<b>18</b>
<b>2.1.3</b>	<i>A frequência elétrica no rotor</i>	<b>21</b>
<b>2.1.4</b>	<i>Curva Conjugado versus velocidade do motor de indução trifásico</i>	<b>21</b>
<b>2.2</b>	<b>Inversor de Frequência</b>	<b>24</b>
<b>2.2.1</b>	<i>Ajuste de Frequência</i>	<b>26</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>28</b>
<b>3.1</b>	<b>Natureza Bibliográfica</b>	<b>28</b>
<b>3.2</b>	<b>Procedimento de Coleta de Dados</b>	<b>28</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>29</b>
<b>4.1</b>	<b>Resultado da geração média de frenagem do motor</b>	<b>29</b>
<b>4.2</b>	<b>Resultados da Energia consumida</b>	<b>30</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>32</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>33</b>
	<b>APÊNDICES</b>	<b>34</b>
	<b>APÊNDICE A – Códigos dos Gráficos gerados</b>	<b>34</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>37</b>
	<b>ANEXO A – Artigo sobre frenagem regenerativa em elevadores</b>	<b>38</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

A crescente demanda por eficiência energética, redução de perdas e sustentabilidade nos sistemas industriais e de transporte tem impulsionado o desenvolvimento e a aplicação de técnicas avançadas de controle e conversão de energia. Nesse contexto, a frenagem regenerativa destaca-se como uma solução tecnológica relevante, pois permite a recuperação parcial da energia cinética associada a sistemas eletromecânicos durante processos de desaceleração ou frenagem, reintegrando-a ao sistema elétrico ou armazenando-a para uso posterior.

Esse método permite recuperar parte da energia cinética de um sistema motor durante desacelerações e convertê-la novamente em energia elétrica. Essa energia pode ser armazenada na bateria ou em outro elemento de armazenamento, contribuindo diretamente para o aumento da eficiência e da autonomia do sistema de tração. Assim, a frenagem regenerativa representa uma das tecnologias-chave para o funcionamento eficiente de sistemas modernos com motores elétricos, e sua compreensão é essencial tanto do ponto de vista teórico quanto prático.

A frenagem regenerativa não constitui um conceito recente na engenharia elétrica, tendo sido aplicada de forma prática ainda no final do século XIX e início do século XX, especialmente em sistemas de tração elétrica ferroviária, como bondes urbanos e ferrovias eletrificadas (MIDDLETON, 1967). Nesses sistemas, os motores elétricos de tração, majoritariamente motores de corrente contínua, eram capazes de operar tanto no regime motor quanto no regime gerador, possibilitando a recuperação de energia durante as fases de desaceleração ou descida em rampas. Do ponto de vista histórico, a adoção da frenagem regenerativa em bondes antigos não estava motivada apenas por preocupações energéticas, mas também por vantagens operacionais, como a redução do desgaste dos freios mecânicos, maior controle da desaceleração e aumento da confiabilidade do sistema (HINDEW, 1917). Esses benefícios anteciparam conceitos que hoje são considerados fundamentais em sistemas modernos de transporte elétrico.

Portanto, esse sistema que foi descoberto há tantos anos ainda mostra-se como uma alternativa interessante para a melhoria de eficiência energética em sistemas elétricos e merece ser estudado mais aprofundadamente.

## 1.2 Importância da frenagem regenerativa

Ao contrário dos sistemas de frenagem convencionais, que dissipam calor por atrito e desperdiçam energia, a frenagem regenerativa transforma o motor elétrico em gerador durante a desaceleração. Dessa forma, parte da energia que seria perdida é reaproveitada. Em algumas aplicações, esse processo pode recuperar entre 10% e 30% da energia normalmente consumida.

Em conformidade com Ehsani *et al.* (2010), essa capacidade de recuperação energética é especialmente relevante para o uso em veículos elétricos que transitem em ambientes com tráfego intenso, onde há constante necessidade de desaceleração e aceleração. Além disso, a frenagem regenerativa reduz o desgaste do sistema mecânico de freios, contribuindo para menor necessidade de manutenção e maior vida útil dos componentes. Portanto, o estudo aprofundado dessa tecnologia não apenas esclarece seus princípios de funcionamento, mas também revela seu impacto direto na eficiência energética dos veículos elétricos.

## 1.3 Problema de pesquisa

Embora a frenagem regenerativa seja amplamente utilizada na indústria, persistem dúvidas sobre seu funcionamento e sua eficiência real em diferentes situações. Em especial, uma chama a atenção:

Qual o percentual de energia que se consegue recuperar ?

Em que condições isso é feito?

Quais as melhores situações de aplicação desse método ?

Essas questões mostram que, apesar de difundida, a frenagem regenerativa ainda é frequentemente mal utilizada por estudantes e profissionais que atuam na área de sistemas elétricos de potência e máquinas elétricas. Assim, torna-se necessário consolidar e organizar o conhecimento existente, oferecendo uma análise abrangente dos princípios e aplicações dessa tecnologia.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A frenagem regenerativa é um tema que envolve diversos conceitos para se chegar até ela. Pensando nisso, é fundamental que sejam elencados e explicados os principais pontos.

É salutar destacar que ela é um dos princípios fundamentais dos sistemas modernos de tração elétrica e representa um avanço tecnológico essencial para aumentar a eficiência energética de veículos elétricos e híbridos (ANH; DUC, 2021). Além disso, esse sistema é muito utilizado em máquinas como elevadores. A frenagem regenerativa trata-se de uma técnica que transforma parte da energia mecânica dissipada durante a desaceleração em energia elétrica utilizável, recuperando-a e armazenando-a no sistema de armazenamento de energia, normalmente uma bateria ou um ultracapacitor. Diferentemente dos sistemas de frenagem convencionais, em que toda a energia cinética é dissipada na forma de calor pelos freios mecânicos, a frenagem regenerativa permite o reaproveitamento dessa energia, contribuindo para maior autonomia, menor consumo energético e redução do desgaste mecânico.

Do ponto de vista eletromagnético, a frenagem regenerativa fundamenta-se no fato de que motores elétricos de corrente alternada, como motores de indução, máquinas síncronas de ímãs permanentes; e motores *Brushless Direct Current* (BLDC) — podem operar tanto como motores quanto como geradores. Em veículos elétricos, durante a desaceleração, o comando eletrônico inverte o processo de conversão de energia: o fluxo de energia deixa de ser da bateria para o motor e passa a ser do eixo mecânico para o inversor, que converte essa energia em eletricidade e a direciona novamente para o sistema de armazenamento (ANH; DUC, 2021).

Esse processo depende diretamente do controle realizado pelo inversor e das características físicas da máquina elétrica e da bateria. Limitações de tensão, corrente, velocidade e temperatura impõem restrições importantes ao nível de regeneração possível. Além disso, fatores como o estado de carga da bateria, a resistência interna, a capacidade máxima de absorção de potência e as condições de operação influenciam diretamente a quantidade de energia que pode ser recuperada. Por essas razões, a frenagem regenerativa, embora extremamente eficiente, não consegue converter toda a energia disponível (ANH; DUC, 2021).

A seção a seguir apresenta os conceitos essenciais sobre motores elétricos e os princípios físicos que possibilitam o funcionamento da frenagem regenerativa, servindo de base para as análises das suas limitações e desafios abordadas nos próximos capítulos.

## 2.1 Motor de Indução Trifásico

O motor de indução trifásico (MIT) é o motor mais utilizado atualmente devido a sua fácil capacidades de controle através de um inversor de frequência.

### 2.1.1 Aspectos construtivos

O MIT possui algumas particularidades construtivas que o diferencia de outros motores, atuando eletricamente semelhante a um transformador.

#### 2.1.1.1 Estator

O MIT é constituído por um estator, que é a parte fixa da máquina e contém alguns componentes importantes:

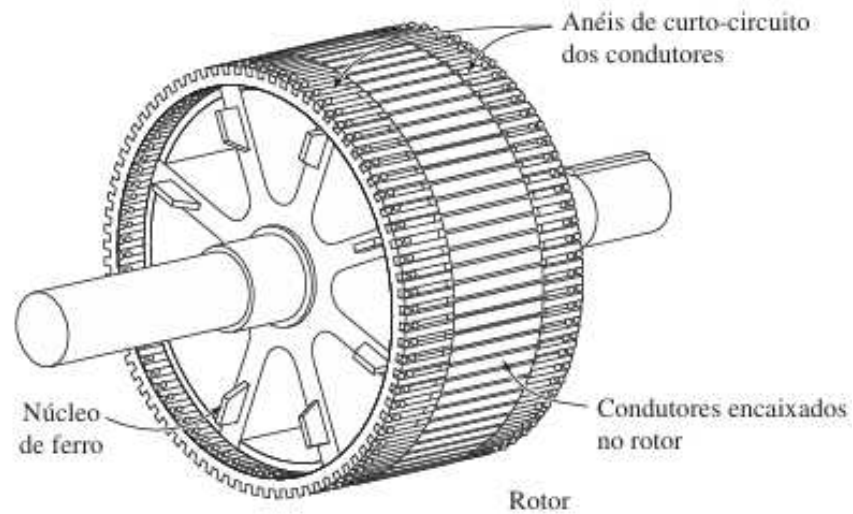
- a) Carcaça, que dá sustentação mecânica;
- b) Pacote de chapas ferromagnéticas, laminadas para reduzir perdas por histerese e correntes parasitas;
- c) Enrolamentos trifásicos, distribuídos em ranhuras ao longo das lâminas.
- d) Os enrolamentos são dispostos de forma a criar um campo magnético girante quando alimentados por tensões trifásicas defasadas de  $120^\circ$ .

#### 2.1.1.2 Rotor

O rotor pode ser de dois tipos:

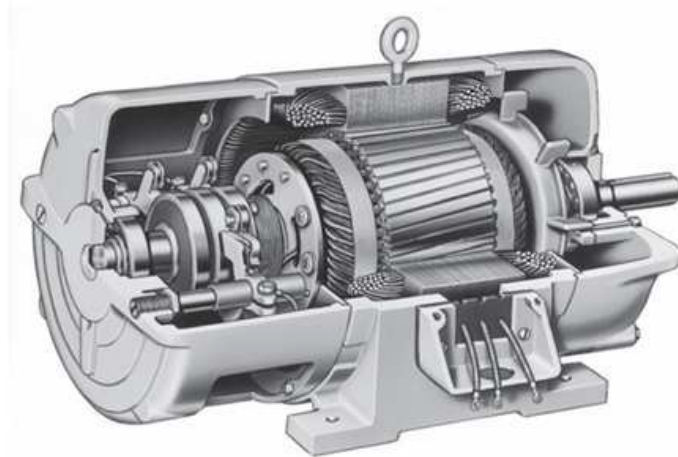
- a) Rotor gaiola de esquilo (o mais comum)
  - Barras de alumínio ou cobre inseridas nas ranhuras;
  - Anéis de curto-circuito conectando as barras nas extremidades;
  - Construção simples, robusta e de baixo custo.
- b) Rotor Bobinado
  - Enrolamentos trifásicos no rotor;
  - Conectados a anéis coletores e escovas;
  - Permite controle de torque e velocidade via resistências externas.

Figura 1 – MIT Gaiola de Esquilo



Fonte: Chapman (2013, p. 308).

Figura 2 – MIT Bobinado



Fonte: Chapman (2013, p. 311).

### 2.1.1.3 Entreferro

O entreferro é o pequeno espaço entre estator e rotor. Quanto menor, maior o acoplamento magnético e a eficiência.

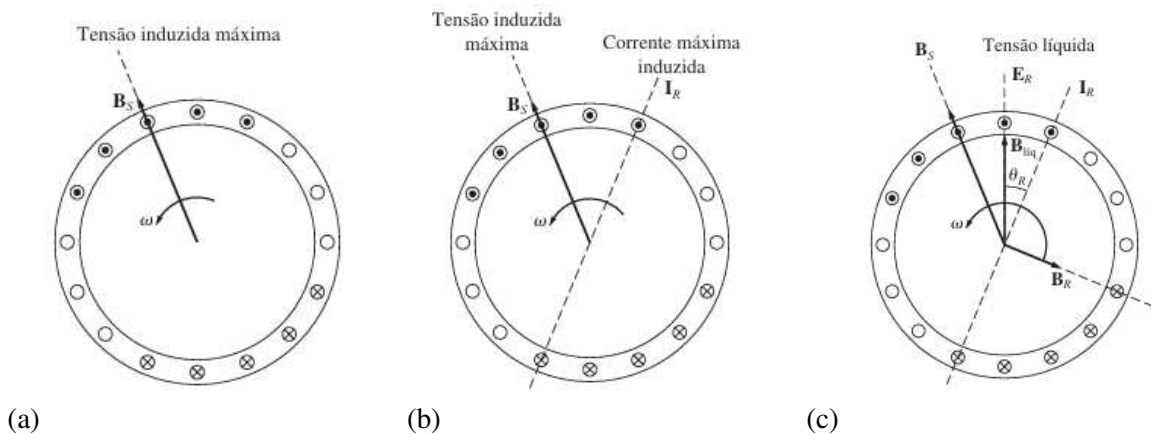
### 2.1.2 Escorregamento

O escorregamento é um conceito fundamental para entender o funcionamento dos motores de indução. O escorregamento nos motores de indução é fundamentalmente determinado pela interação entre os campos magnéticos gerados no estator e no rotor.

O estator do motor de indução é alimentado por um conjunto trifásico de tensões que produz um conjunto trifásico de correntes. Essas correntes criam um campo magnético girante no estator  $B_s$ . A velocidade de rotação desse campo  $n_{sinc}$  é fixada pela frequência elétrica aplicada ao estator  $f_{se}$  e pelo número de polos  $P$  da máquina.

$$n_{sinc} = \frac{120 \cdot f_{se}}{P} \quad (2.1)$$

Figura 3 – A produção de conjugado induzido em um motor de indução. (a) Campo Magnético do Estator; (b) Campo Magnético do Estator e Corrente induzida no Rotor; (c) Campo Magnético Líquido.



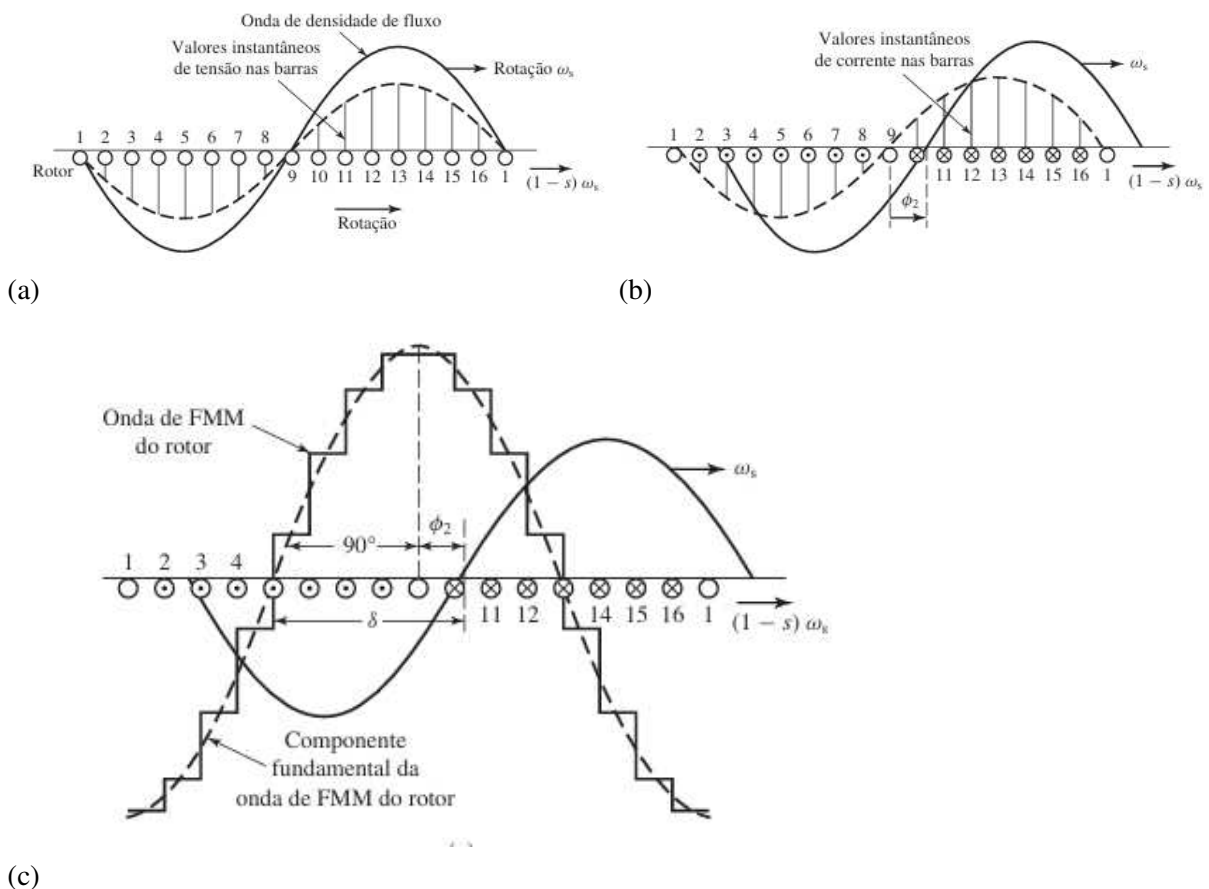
Fonte: Chapman (2013, p. 312).

O movimento relativo entre o campo do estator e o rotor faz com que se gere uma tensão induzida na barra do rotor. Essa tensão induzida gera uma corrente que, por sua vez, produz um campo magnético no rotor. O conjugado induzido na máquina é resultado da interação entre o campo magnético do estator  $B_s$  e o campo magnético do rotor  $B_r$ . O rotor tenta se alinhar com o campo do estator e, como este está girando, o rotor o "persegue" em círculos.

Essa dinâmica também pode ser representada em termos de ondas senoidais, como é possível visualizar na figura 4. A onda senoidal de densidade de fluxo no entreferro percorre o estator e induz tensões em cada barra do rotor. Os valores instantâneos dessas tensões são representados por linhas verticais cheias, acompanhando o formato da onda senoidal de fluxo conforme figura 4a. Após isso, devido à indutância das barras, as correntes do rotor não atingem seu valor máximo simultaneamente com a tensão. Elas apresentam um atraso de tempo definido pelo ângulo do fator de potência do rotor  $\phi_2$ . Nesse intervalo de tempo, a onda de densidade de fluxo se desloca espacialmente por esse mesmo ângulo  $\phi_2$  em relação ao rotor conforme a

figura 4b. Assim, as correntes nas barras criam uma onda de Força Magnetomotriz (FMM) do rotor em forma de degraus. A análise da figura 4c mostra que a componente fundamental dessa onda (senoide tracejada) interage com a onda de densidade de fluxo (senoide cheia). Portanto, o ponto fundamental revelado pela figura 4 é que o número de polos do rotor de gaiola de esquilo é determinado automaticamente pela onda de fluxo indutivo do estator, garantindo que ambos os campos girem em sincronismo para a produção de conjugado.

Figura 4 – Reações de um rotor de gaiola de esquilo em um campo de dois polos.



Fonte: Umans (2014, p. 350).

É importante salientar que o rotor nunca pode alcançar a velocidade síncrona. Se o rotor girasse na mesma velocidade que o campo do estator, não haveria movimento relativo, a tensão induzida seria zero, não haveria corrente no rotor e, conseqüentemente, o conjugado seria nulo. Portanto, o rotor sempre gira a uma velocidade mecânica ligeiramente inferior à síncrona.

O escorregamento ( $s$ ) é a medida desse "atraso" do rotor em relação ao campo girante. Ele é definido como a velocidade relativa (velocidade de escorregamento) expressa como uma fração da velocidade síncrona:

$$s = \frac{n_{sinc} - n_{mec}}{n_{sinc}} \quad (2.2)$$

### 2.1.3 A frequência elétrica no rotor

frequência elétrica no rotor de um motor de indução é uma grandeza variável que depende diretamente do movimento relativo entre o campo magnético do estator e o próprio rotor. A frequência do rotor  $f_r$  é diretamente proporcional ao escorregamento ( $s$ ) do motor. A relação fundamental é expressa pela fórmula:

$$f_r = s \cdot f_{se} \quad (2.3)$$

### 2.1.4 Curva Conjugado versus velocidade do motor de indução trifásico

O conjugado induzido (ou torque) em um Motor de Indução Trifásico (MIT) é a "força de fazer girar" que impulsiona o rotor, sendo o mecanismo central para a conversão de energia elétrica em mecânica. A interação entre o campo magnético do estator e o campo magnético do rotor é responsável por produzir o conjugado induzido, sendo proporcional ao produto vetorial entre o campo magnético do estator e o do rotor, como presente na relação:

$$\tau = k \cdot B_r \times B_s \quad (2.4)$$

Fisicamente, quando o motor está a vazio (sem carga), o rotor gira muito próximo da velocidade síncrona, o movimento relativo é mínimo, a corrente induzida é pequena e, portanto, o campo  $B_r$  e o conjugado são baixos. Quando uma carga é aplicada ao eixo:

1. O rotor perde velocidade momentaneamente, aumentando o escorregamento.;
2. Esse aumento no movimento relativo induz mais tensão e corrente nas barras do rotor.;
3. O campo magnético do rotor  $B_r$  torna-se mais forte.
4. O ângulo entre os campos também se altera devido ao aumento da reatância do rotor em frequências mais altas.

5. O resultado líquido é um aumento no conjugado induzido para suportar a nova carga.

Existe, entretanto, um limite físico chamado conjugado máximo (ou torque de pico). Se a carga exceder esse ponto, o aumento da corrente do rotor não consegue mais compensar a queda no fator de potência do rotor, e o motor para. Essas dinâmicas pode ser vista na Figura 5

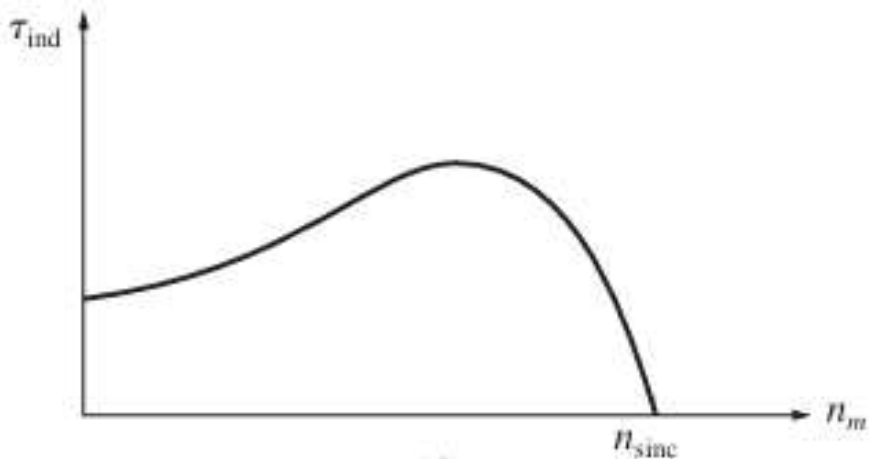
Figura 5 – A produção de conjugado induzido em um motor de indução. (a) Campo Magnético com carga leve; (b) Campo Magnético com carga pesada.



Fonte: Chapman (2013, p. 329).

Considerando a dinâmica do conjugado induzido e o escorregamento, produz-se uma curva muito característica dos MIT, a curva do Conjugado induzido versus velocidade, conforme

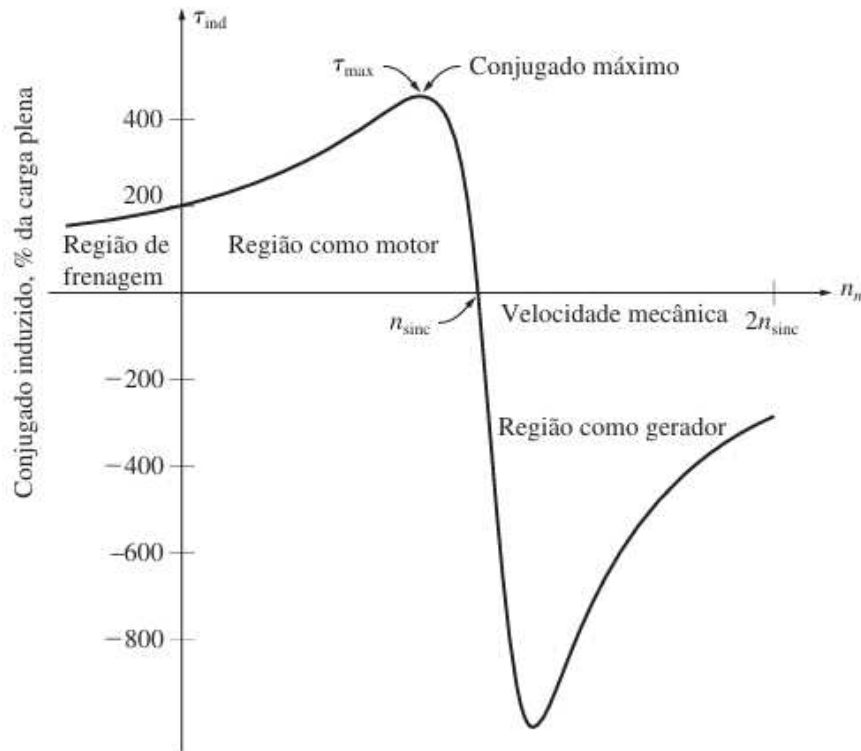
Figura 6 – Curva do conjugado induzido versus velocidade



Fonte: Chapman (2013, p. 331).

É perceptível que o gráfico da Figura 6 está incompleto, pois nada impede que a velocidade mecânica do rotor seja negativa, sentido contrário ao de  $n_{sinc}$ , ou ainda que ultrapasse o valor de  $n_{sinc}$ . Portanto, a curva completa é dada por:

Figura 7 – Curva do conjugado induzido versus velocidade com as regiões de operação



Fonte: Chapman (2013, p. 337).

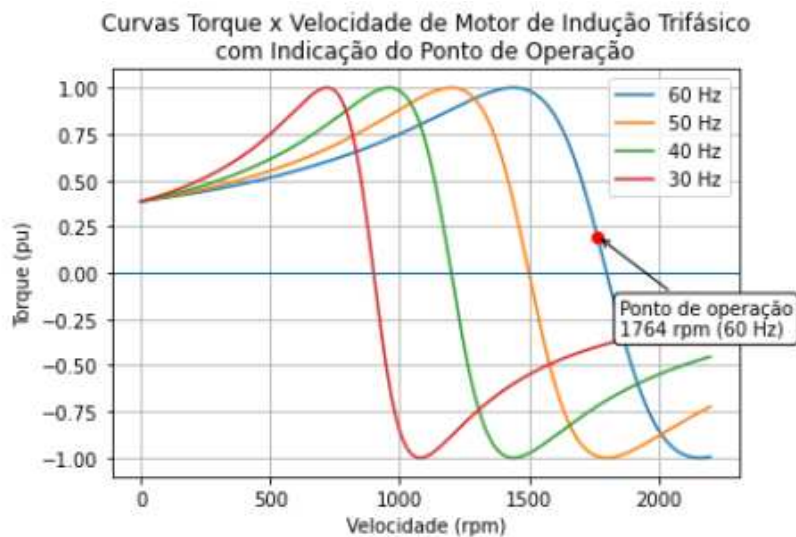
Levando a figura 7 em consideração, é necessário explicar uma importante diferença que será explorada mais a fundo nesse trabalho - a diferença entre região de frenagem e frenagem regenerativa. A primeira ocorre quando os campos magnéticos do estator e do rotor giram em sentidos opostos ou quando o rotor é forçado a girar no sentido contrário ao do campo magnético, fazendo com que  $n_{mec} < 0$ . Em motores de indução trifásicos, isso é obtido trocando-se as conexões de duas fases do estator enquanto o motor está em movimento. Isso inverte o sentido de rotação dos campos magnéticos instantaneamente. Entretanto, diferente da regeneração, este método consome energia elétrica para parar o motor e a energia cinética é dissipada como calor.

Já a segunda, ocorre quando a máquina deixa de operar como motor e passa a atuar como um gerador, o que ocorre quando  $n_{mec} > n_{sinc}$ , convertendo energia mecânica de volta em energia elétrica. Para motores de indução, isso acontece quando o rotor é acionado por uma carga ou máquina motriz a uma velocidade superior à velocidade síncrona, e a principal vantagem é que é um método altamente eficiente, pois a energia mecânica não é apenas dissipada, mas

devolvida ao sistema de potência, o que reduz os custos operacionais. Devido a essa vantagem, a frenagem regenerativa é aplicada em diversos sistemas eletromecânicos como carros elétricos, bondinhos e elevadores.

Para exemplificar melhor essa situação, foi traçado um gráfico em que há as curvas de Torque versus velocidade para diferentes frequências operando como motor e gerador. Na figura 8 é possível identificar o ponto de operação normalmente utilizada em um motor de indução trifásico de 4 polos e 2% de escorregamento. Entretanto, se a frequência elétrica de alimentação desse motor fosse alterada repentinamente para 50 Hz, para a velocidade de 1764 rpm, o MIT estaria dentro da região de operação como gerador. Esse efeito se torna mais acentuado quanto mais inércia o MIT tiver, pois mais demorado será para haver mudança em sua velocidade.

Figura 8 – Variação do Ponto de operação na curva Torque versus velocidade



Fonte: Próprio autor

## 2.2 Inversor de Frequência

O uso de inversores de frequência, como o da figura 9, revolucionou o controle dos Motores de Indução Trifásicos (MIT), tornando-os a escolha preferida para aplicações de velocidade variável, superando inclusive os motores de corrente contínua (CC) que dominavam esse cenário anteriormente. O controle de velocidade via inversores baseia-se primordialmente na alteração da frequência elétrica  $f_{se}$  aplicada ao estator, o que modifica diretamente a velocidade síncrona dos campos magnéticos da máquina e, para isso, o inversor se utiliza do Mecanismo do Pulse Width Modulation (PWM).

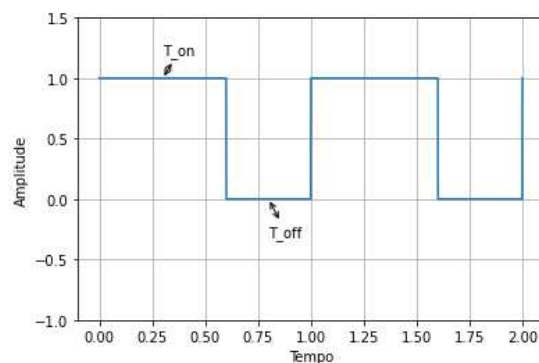
Figura 9 – Inversor de Frequência WEG CFW501



Fonte: WEG S.A. (s.d.).

Os inversores modernos utilizam a técnica do PWM para converter uma entrada de tensão e frequência fixas em uma saída trifásica ajustável. Através do PWM, o inversor controla independentemente a frequência de saída (que define a velocidade) e o nível de tensão eficaz aplicada ao motor. A tensão de saída é controlada pela fração de tempo em que a tensão permanece "ligada" em cada pulso, conhecido como Duty Cycle, enquanto a frequência é determinada pela taxa na qual a polaridade desses pulsos é alternada. Essa flexibilidade permite que o motor opere desde 5 % de sua velocidade base até mais do que o dobro dessa velocidade base. Na figura 10 pode-se visualizar o Duty Cycle

Figura 10 – Onda Quadrada com Duty Cycle



Fonte: Próprio autor

### 2.2.1 Ajuste de Frequência

Esse ajuste pode ser realizado manualmente através de controles no gabinete do acionamento ou remotamente por sinais externos de tensão ou corrente, permitindo que computadores ou controladores de processo gerenciem a velocidade do motor.

Um dos dispositivos utilizados para ajustar remotamente o inversor de frequência é o Controlador Lógico Programável (CLP) como pode ser visto na figura 11, que atua como o cérebro dos processos industriais. Como os inversores modernos possuem recursos como rampas de aceleração, desaceleração ajustáveis e outros diferentes padrões de tensão versus frequência, o CLP pode coordenar esses recursos conforme a necessidade dos sistemas de operação. Diante disso, é necessário fazer determinados esquemáticos para a ligação entre o CLP, inversor e o MIT, como exemplificado na figura 12.

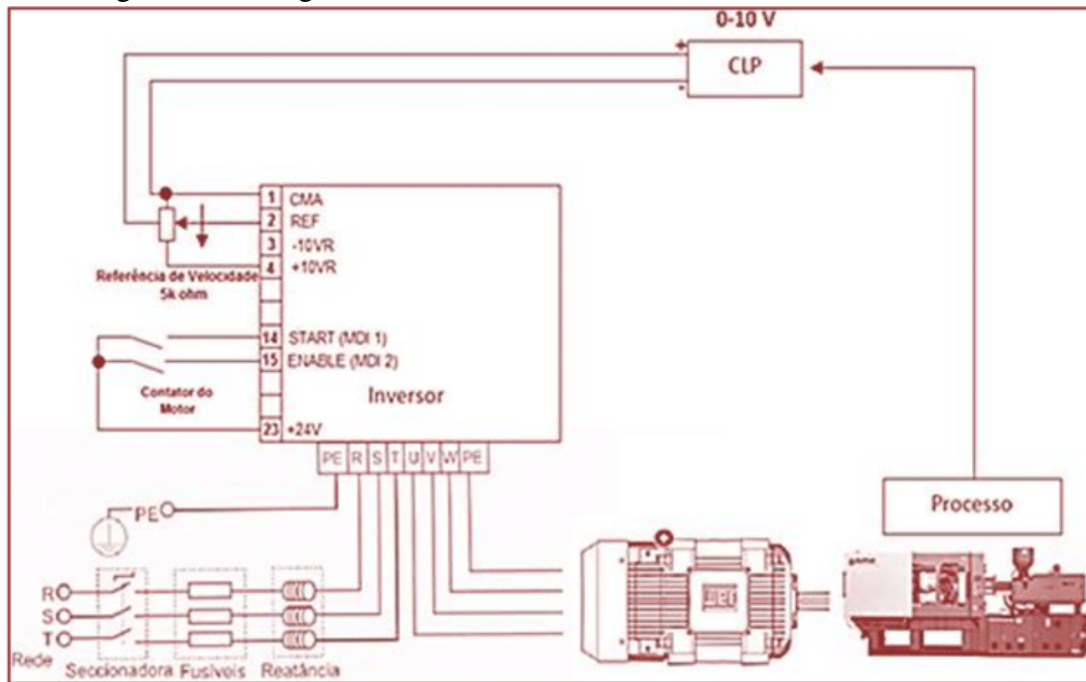
Além disso, em sistemas mais avançados, o CLP pode receber informações de sensores (como tacômetros ou sensores de pressão), instituindo uma malha fechada de controle, e comparar a velocidade real com a desejada. Se houver uma diferença, o CLP instrui o inversor a aumentar ou diminuir a tensão e a frequência para compensar variações de carga e manter a operação estável.

Figura 11 – Controlador Lógico Programável



Fonte: Siemens (2025).

Figura 12 – Diagrama CLP inversor e MIT



Fonte: Andrade (2020).

### **3 METODOLOGIA**

A metodologia adotada neste Trabalho de Conclusão de Curso é fundamentada em uma pesquisa bibliográfica exploratória, descritiva e qualitativa, cujo objetivo é analisar de forma aprofundada as limitações técnicas, energéticas e operacionais da frenagem regenerativa aplicada a veículos elétricos.

#### **3.1 Natureza Bibliográfica**

Esta pesquisa é: bibliográfica, pois utiliza exclusivamente fontes secundárias; exploratória, pelo caráter de busca ampla de conceitos e interpretações; descritiva, ao apresentar e organizar informações técnicas; qualitativa, pois a análise baseia-se na interpretação de dados conceituais e não na coleta numérica. Não há realização de experimentos, medições práticas ou simulações computacionais. Todo o estudo é baseado na análise de literatura especializada.

#### **3.2 Procedimento de Coleta de Dados**

Primeiramente, os dados utilizados neste trabalho foram obtidos a partir de trabalhos acadêmicos previamente publicados. Em particular, utilizou-se dados apresentados no Trabalho de Conclusão de Curso (GOMES; BARROS, 2020). Os dados extraídos referem-se às curvas características e às condições de operação do motor de indução trifásico em regime gerador, os quais foram organizados e analisados conforme a metodologia proposta neste trabalho.

Além desse Trabalho de Conclusão de Curso, foram extraídos dados do mesmo motor utilizado no Trabalho de Conclusão de Curso para realizar um cálculo da estimativa de consumo nas mesmas condições de operação e, posteriormente, uma comparação entre a energia gasta e regenerada.

## 4 RESULTADOS

Primeiramente serão apresentados os resultados extraídos de (GOMES; BARROS, 2020) para a geração de energia na frenagem regenerativa e após isso será realizado alguns cálculos para efeito de comparação no funcionamento como motor.

### 4.1 Resultado da geração média de frenagem do motor

Antes de tudo, é necessário ressaltar as considerações feitas por (GOMES; BARROS, 2020) durante esse ensaio. Uma delas é que foi considerado que em um dia há uma média de 43 frenagens, com cada uma durando em média 27 segundos. Com isso, foi montada a tabela da Figura 13.

Figura 13 – Medição da energia média regenerada

<b>Medições</b>	<b>Energia regenerada na frenagem [kWh]</b>	<b>Energia regenerada em um dia [kWh]</b>	<b>Energia regenerada em um ano [kWh]</b>
<b>Medição 1</b>	-0,008868333	-0,381338333	-139,1884917
<b>Medição 2</b>	-0,007140000	-0,307020000	-112,0623000
<b>Medição 3</b>	-0,018680830	-0,803275833	-293,1956792
<b>Medição 4</b>	-0,024251667	-1,042821667	-380,6299083
<b>Medição 5</b>	-0,009864167	-0,424159167	-154,8180958
<b>Medição 6</b>	-0,019500833	-0,838535833	-306,0655792
<b>Médias</b>	-0,014717638	-0,632858448	-230,9933336

Fonte: (GOMES; BARROS, 2020)

## 4.2 Resultados da Energia consumida

Considerando o mesmo motor utilizado para medir a geração, será realizado o cálculo do consumo para a operação nominal em 27 segundos.

Primeiramente, deve-se se atentar ao Datasheet do motor utilizado, o 1LG0166-4AA70 de 20 CV da SIEMENS, explicitado na tabela 1, em que foram extraídos alguns dados importantes de Siemens Standard Motors Ltd. (2008).

Tabela 1 – DATASHEET DO MOTOR 1LG0166-4AA70 – 20 CV

380 V $\Delta$ /660 V Y – 50 Hz			440 V $\Delta$ – 60 Hz		
Potência de saída [kW]	Velocidade nominal [rpm]	Rendimento a 100%	Potência de saída [kW]	Velocidade nominal [rpm]	Rendimento a 100%
15	1460	90%	17,3	1750	89,5%

Fonte: Elaborada pelo autor.

Nota: Os dados foram extraídos do datasheet do fabricante Siemens.

No caso dos experimentos realizados no artigo de Gomes e Barros (2020) , está se considerando que o motor foi ligado em 380/660 V, 60 Hz e ligação em  $\Delta$ .

Entretanto, o datasheet fornece apenas a potência ativa em 60 Hz para 440 V com ligação em  $\Delta$ . Por isso, será necessário encontrar a Potência ativa para as condições de 380 V em 60 Hz.

Portanto, parte-se da relação

$$\Phi \propto \frac{V}{f} \quad (4.1)$$

Portanto, para o Datasheet:

$$\Phi_1 \propto \frac{V}{f} = \frac{440}{60} = 7,33 \quad (4.2)$$

e para a situação em análise:

$$\Phi_2 \propto \frac{V}{f} = \frac{380}{60} = 6,33 \quad (4.3)$$

assim, tem-se que:

$$\frac{\Phi_2}{\Phi_1} = 0,864 \quad (4.4)$$

Parte-se da relação

$$\tau \propto \Phi^2 \quad (4.5)$$

Portanto, fazendo

$$\frac{\tau_2}{\tau_1} = \left(\frac{\Phi_2}{\Phi_1}\right)^2 = 0,7459 = 74,59\% \quad (4.6)$$

Como a Potência ativa pode ser determinada por

$$Pot_{ativa} = \frac{Pot_{mec}}{\eta} = \frac{\tau \cdot \omega}{\eta} \quad (4.7)$$

Considerando que  $\omega$  e  $\eta$  é o mesmo, então obtém-se que:

$$Pot_{ativa2} = Pot_{ativa1} \cdot \frac{\tau_2}{\tau_1} = 17,3k \cdot 74,59\% = 12,9kW \quad (4.8)$$

Agora, para encontrar a energia gasta em 27 segundos, simplesmente multiplica-se a potência pelo tempo.

$$E_{consumida} = Pot_{ativa2} \cdot \Delta t = 0,09675kWh \quad (4.9)$$

Por fim, comparando a energia consumida em operação nominal do motor, com a quantidade de energia produzida na frenagem regenerativa no mesmo período, conforme o valor da média da Figura 13, tem-se que a quantidade de energia recuperada é:

$$E_{\%recuperada} = \frac{E_{frenagem}}{E_{consumida}} \approx 15,2\% \quad (4.10)$$

É de grande interesse salientar o motivo de se utilizar a potência nominal, na operação do motor, ele funciona com potência nominal, logo, é justo comparar o quanto se consome de energia normalmente, e o quanto se recupera de energia durante o mesmo período de operação. Evidentemente, um MIT passa muito mais tempo operando nas condições de motor do que na região de gerador.

## 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que, em relação ao mesmo período, há uma certa porcentagem de energia recuperada pela frenagem regenerativa. Uma consideração a ser feita é que diariamente, a grande maioria dos motores não possui tantas frenagens, por isso, a recuperação de energia em um dia é irrisória. Entretanto, alguns sistemas utilizam frequentemente frenagens e acelerações, como elevadores e guindastes onde a movimentação das cargas é muito dinâmica; além da sua aplicação em veículos elétricos. Nesses casos, a tendência é que a porcentagem de energia recuperada possa ser bem maior em sua operação diária, o que provavelmente valha a pena ser explorados em estudos futuros, no intuito de se obter uma maior eficiência energética.

## REFERÊNCIAS

- ANDRADE, D. F. (Ed.). **Gestão da Produção em Foco: Volume 43**. Belo Horizonte: Editora Poisson, 2020. Acesso em: 04 fev. 2026. ISBN 978-65-86127-60-7. Disponível em: <<https://www.poisson.com.br/>>.
- ANH, A. T. H. T.; DUC, L. H. A regenerative braking energy recuperation from elevator operation in building by active rectifier. **International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)**, International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS), v. 12, n. 2, p. 811–821, 2021.
- CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2013.
- EHSANI, M.; GAO, Y.; LONGO, S.; EBRAHIMI, K. **Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2010.
- GOMES, A. G.; BARROS, R. G. Peçanha de. **Estudo sobre frenagem regenerativa de motores de indução trifásicos**. Dissertação (Mestrado) — Instituto Nacional de Telecomunicações, Cidade, 2020.
- HINDEW, B. W. **Electric Traction**. London: Cambridge University Press, 1917. Trabalho clássico sobre sistemas de tração e frenagem elétrica.
- MIDDLETON, W. D. **The Time of the Trolley**. San Marino: Golden West Books, 1967. ISBN 9780870950285.
- Siemens. **SIMATIC S7-1200 G2 – Nova Geração**. [S.l.], 2025. Disponível em: <[https://www.siemens.com/global/en/products/automation/systems/industrial/plc/s7-1200.html?utm\\_source=website](https://www.siemens.com/global/en/products/automation/systems/industrial/plc/s7-1200.html?utm_source=website)>.
- Siemens Standard Motors Ltd. **Motor de Indução Trifásico 1LG0166-4AA70**. Yizheng City, Jiangsu Province, China, 2008. (1LG0 Series). Motor de indução trifásico de 15 kW, 4 polos, da série 1LG0. Certificações: CCC (China Compulsory Certification) e CE. Disponível em: <<https://www.siemens.com/lowvoltagemotors>>.
- UMANS, S. D. **Electric Machinery**. 7. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014. 704 p. ISBN 978-0073380469.
- WEG S.A. **Inversor de Frequência CFW501 – HVAC**. Jaraguá do Sul, s.d. Catálogo técnico do inversor de frequência CFW501 para aplicações HVAC. Disponível em: <[https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Automa%C3%A7%C3%A3o-e-Controle-Industrial/Drives/Inversores-de-Frequ%C3%Aancia/HVAC/Inversor-de-Frequ%C3%Aancia-CFW501/Inversor-de-Frequ%C3%Aancia-CFW501/p/MKT\\_WDC\\_BRAZIL\\_FREQUENCY\\_INVERTER\\_DRIVE\\_CFW501\\_HVAC\\_R](https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Automa%C3%A7%C3%A3o-e-Controle-Industrial/Drives/Inversores-de-Frequ%C3%Aancia/HVAC/Inversor-de-Frequ%C3%Aancia-CFW501/Inversor-de-Frequ%C3%Aancia-CFW501/p/MKT_WDC_BRAZIL_FREQUENCY_INVERTER_DRIVE_CFW501_HVAC_R)>.

## APÊNDICE A – CÓDIGOS DOS GRÁFICOS GERADOS

Os códigos apresentados foram implementados em linguagem Python e executados no ambiente Jupyter Notebook, sendo utilizado para a geração das figuras 8 e 10

### Código fonte da Figura 8

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Parametros do motor
ns = 1800          # velocidade sincrona (rpm)
s_max = 1.0       # escorregamento maximo
slip = np.linspace(0, s_max, 500)

# Modelo simplificado de torque
T_max = 1.0
torque = T_max * (slip / s_max) / (1 + (slip / s_max)**2)

# Conversao de escorregamento para velocidade
n = ns * (1 - slip)

# Ponto de operacao
n_op = 1764
torque_op = np.interp(n_op, n[::-1], torque[::-1])

# Plot
plt.figure()
plt.plot(n, torque, label="Curva de Torque")
plt.plot(n_op, torque_op, "ro", label="Ponto de Operacao")

plt.annotate(
    "Ponto de operacao\n1764 rpm (60 Hz)",
    xy=(n_op, torque_op),
    xytext=(1850, -0.25),
    arrowprops=dict(arrowstyle="->"),
```

```
        bbox=dict(boxstyle="round,pad=0.3", fc="white", ec="black"),
        horizontalalignment="left",
        verticalalignment="center"
    )

plt.axhline(0, linewidth=1)
plt.xlabel("Velocidade (rpm)")
plt.ylabel("Torque (pu)")
plt.title(
    "Curvas Torque x Velocidade do Motor de Inducao Trifasico\n"
    "com Indicacao do Ponto de Operacao"
)

plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show()
```

## Código fonte da Figura 10

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Parâmetros da onda
period = 1.0          # Período
duty_cycle = 0.6      # Duty Cycle = 60%
cycles = 2           # Número de ciclos
amplitude = 1.0      # Amplitude

# Vetor de tempo
t = np.linspace(0, cycles * period, 2000)

# Definição da onda quadrada
signal = np.where((t % period) < (duty_cycle * period), amplitude, 0)

# Plotagem
plt.figure()
plt.plot(t, signal)
plt.xlabel("Tempo")
plt.ylabel("Amplitude")
plt.title("")

# Cotas do Duty Cycle (considerando um período)
ton = duty_cycle * period
toff = period - ton

plt.annotate("T_on",
            xy=(ton / 2, amplitude),
            xytext=(ton / 2, amplitude + 0.2),
            arrowprops=dict(arrowstyle="<->"))

plt.annotate("T_off",
            xy=(ton + toff / 2, 0),
```

```
        xytext=(ton + toff / 2, -0.3),
        arrowprops=dict(arrowstyle="<->"))

plt.ylim(-1, 1.5)
plt.grid(True)
plt.show()
```

## **ANEXO A – ARTIGO SOBRE FRENAGEM REGENERATIVA EM ELEVADORES**

Pensando na importância da frenagem regenerativa para elevadores, assim como foi proposto no Tópico 5, o artigo (ANH; DUC, 2021) tem a finalidade de guiar os trabalhos futuros e mostrar que esse tema pode ser explorado com mais detalhes, representando uma alternativa interessante para a melhoria da eficiência energética.

Conforme demonstrado no estudo de Anh et al. (2021), a eficiência energética em sistemas de transporte vertical pode representar uma grande recuperação percentual de energia. Em simulações baseadas em um edifício de 10 andares, os autores quantificaram que, enquanto o consumo em subida com carga plena atinge 46 Wh, a tecnologia de frenagem regenerativa permite a recuperação de 15,8 Wh na descida sob as mesmas condições de carga. Esse processo de devolução da energia excedente para a rede elétrica, modelado através de transformações, possibilita uma redução de até 33 % no consumo total de energia do sistema.