



**UNILAB**

**UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA  
AFRO-BRASILEIRA  
INSTITUTO DE ENGENHARIAS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL  
ENGENHARIA DE ENERGIAS**

**FRANCISCO FAGNER PIMENTEL DOS SANTOS**

**ESTUDO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM MIT, PARA DIFERENTES  
CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO**

**REDENÇÃO-CE**

**2024**

FRANCISCO FAGNER PIMENTEL DOS SANTOS

ESTUDO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM MIT, PARA DIFERENTES  
CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Energia da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia de Energias.

Prof. Me. Humberto Ícaro Fontinele.

ACARAPE-CE

2024

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira  
Sistema de Bibliotecas da UNILAB  
Catalogação de Publicação na Fonte.

---

Santos, Francisco Fagner Pimentel Dos.

S237e

Estudo da eficiência Energética de um MIT, para Diferentes Condições de Operação / Francisco Fagner Pimentel Dos Santos. - Redenção, 2024.

93f: il.

Dissertação - Curso de Engenharia De Energias, Instituto De Engenharias E Desenvolvimento Sustentável, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2024.

Orientador: Prof. Me. Humberto Ícaro Pinto Fontinele.

1. Eficiência energética - Energia elétrica. 2. Motor de Indução Trifásico (MIT). 3. Métodos de acionamento. 4. Qualidade de energia e temperatura ambiente. 5. Regimes de serviço. I. Título

CE/UF/BSCA

CDD 333.79

---

# ESTUDO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM MIT PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia de  
Energias da UNILAB como parte dos  
requisitos para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia de Energias.

Aprovado em: 28/08/2024

## BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Me. Humberto Ícaro Pinto Fontinele (IEDS/UNILAB).  
Presidente da Banca Examinadora

---

Prof.<sup>a</sup> Me. Janaína Barbosa Almada (IEDS/UNILAB)  
Membro da Banca Examinadora

*Gustavo Alves de Lima Henn*

---

Prof. Dr. Gustavo Alves de Lima Henn (IEDS/UNILAB)  
Membro da Banca Examinadora

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho. Em primeiro lugar, agradeço a Deus, por me dar força, saúde e perseverança para concluir mais essa etapa da minha vida.

Agradeço ao meu orientador, Humberto Ícaro Fontinele, pela orientação, paciência e pelas valiosas contribuições que foram essenciais para a conclusão deste estudo. Sua dedicação e comprometimento com a educação foram inspiradores.

Minha gratidão também vai para os meus pais, Francisco Marques dos Santos e Maria Terezinha Pimentel dos Reis, meu irmão Francisco Wagner Pimentel dos Santos e meus familiares, que sempre me apoiaram incondicionalmente ao longo de toda a minha jornada acadêmica. Sem o amor e o incentivo de vocês, este trabalho não teria sido possível.

Aos meus colegas de curso e trabalho, que compartilharam comigo essa jornada, enfrentando desafios e celebrando conquistas juntos. A colaboração e a amizade de cada um de vocês foram fundamentais para o meu crescimento pessoal e profissional.

Gostaria também de agradecer à Universidade de Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira - UNILAB, por fornecer um ambiente acadêmico de excelência, onde pude desenvolver minhas habilidades e adquirir o conhecimento necessário para a realização deste trabalho.

Por fim, dedico este trabalho à minha filha Marjorie Rafaela Ferrer Pimentel, que é a maior inspiração da minha vida. Que este trabalho sirva de exemplo para que ela, no futuro, também busque seus sonhos com determinação, coragem e resiliência.

Este trabalho é dedicado a todos que, de alguma forma, contribuíram para a minha formação e realização deste objetivo.

*“Feliz é aquele que, ao errar, aprende e tenta novamente, com mais determinação, perseverança e resiliência em busca de seu objetivo”*

*Fagner Pimentel.*

## RESUMO

O setor industrial permanece como um dos principais consumidores de energia no Brasil, sendo responsável por aproximadamente 33% do consumo total de eletricidade no país em 2022. Dentro desse setor, os Motores de Indução Trifásicos (MITs) continuam a representar a força motriz predominante nos processos industriais de manufatura, correspondendo à maior parcela de consumo de energia, não apenas no Brasil, mas também em nível global. Essa predominância se deve à sua ampla aplicação em máquinas, bombas, ventiladores e outros equipamentos essenciais ao processo produtivo industrial. Por esse motivo, os MITs possuem grande relevância na eficiência energética global, dada sua prevalência e impacto no consumo global de energia elétrica. A proposta deste trabalho é avaliar a influência de métodos de acionamento, regime de carga e temperatura ambiente na eficiência energética de um Motor de Indução Trifásico, através de um estudo prático. Este estudo visa compreender e quantificar a influência da temperatura ambiente, dos regimes de carga, dos métodos de acionamentos na eficiência energética deste tipo de motor. Além disso, esse trabalho aborda conceitos e estratégias para melhorar a eficiência energética na indústria, através da otimização da operação dos MITs. O trabalho se encerra com um estudo de caso onde diversas condições de acionamento, regimes de serviço e temperatura ambiente são impostas a um motor real, em ensaios de laboratório, para medição da eficiência energética desta máquina para cada condição.

**Palavras-chave:** Eficiência energética, Motor de Indução Trifásico (MIT), métodos de acionamento, qualidade de energia e temperatura ambiente, regimes de serviço.

## ABSTRACT

The industrial sector remains one of the primary energy consumers in Brazil, accounting for approximately 33% of the country's total electricity consumption in 2022. Within this sector, Three-Phase Induction Motors (MITs) continue to represent the predominant driving force in industrial manufacturing processes, corresponding to the largest share of energy consumption, not only in Brazil but also globally. This predominance is due to their widespread application in machines, pumps, fans, and other essential equipment in industrial production processes. For this reason, MITs are highly relevant to global energy efficiency, given their prevalence and impact on global electricity consumption. The aim of this work is to evaluate the influence of control methods, load regimes, and ambient temperature on the energy efficiency of a Three-Phase Induction Motor through a practical study. This study seeks to understand and quantify the influence of ambient temperature, load regimes, and control methods on the energy efficiency of this type of motor. Furthermore, this work addresses concepts and strategies for improving energy efficiency in the industry by optimizing the operation of MITs. The study concludes with a case study where various control conditions, service regimes, and ambient temperatures are imposed on a real motor in laboratory tests to measure the energy efficiency of this machine under each condition.

**Keywords:** Energy efficiency, Three-phase Induction Motor (MIT), drive methods, power quality and ambient temperature, load regimes.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	9
<b>1.1 Objetivos</b> .....	11
1.1.1 Objetivo geral .....	11
1.1.2 Objetivos específicos .....	11
<b>1.2 Justificativa</b> .....	12
<b>1.3 Estrutura do trabalho</b> .....	12
<b>2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICA</b> .....	14
<b>2.1 Eficiência energética</b> .....	14
<b>2.2 Regimes de serviço dos MITs</b> .....	20
<b>2.3 Métodos de acionamento dos MITs</b> .....	31
<b>2.4 Indicadores de qualidade de energia</b> .....	33
2.4.1 Harmônicos de corrente e tensão.....	34
2.4.2 As variações de tensão de curta duração.....	37
2.4.3 Cintilação – <i>flicker</i> .....	38
2.4.4 Transientes .....	41
2.4.5 Sub e sobretensão .....	41
2.4.6 Desequilíbrios de tensão.....	42
2.4.7 O Fator de Potência (FP) .....	44
2.4.8 Variação de frequência .....	46
<b>2.5 Influência da temperatura ambiente na eficiência de MITs</b> .....	48
<b>3 ESTUDO APLICADO</b> .....	52
<b>3.1 Materiais</b> .....	52
<b>3.2 Metodologia aplicada aos ensaios</b> .....	54
3.2.1 Ensaio 1: Influência da temperatura ambiente na eficiência no MIT.....	58
3.2.2 Ensaio 2: Influência do regime de carga na eficiência no MIT.....	60
3.2.3 Ensaio 3: Influência do método de acionamento no MIT .....	62
<b>4 RESULTADOS</b> .....	68

<b>4.1 Eficiência vs temperatura ambiente .....</b>	<b>68</b>
<b>4.2 Eficiência vs regime de carga .....</b>	<b>74</b>
<b>4.3 Eficiência vs método de acionamento .....</b>	<b>78</b>
<b>4.4 Considerações finais .....</b>	<b>86</b>
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>87</b>
<b>5.1 Contribuições do trabalho .....</b>	<b>88</b>
<b>5.2 Sugestão de trabalhos futuros .....</b>	<b>88</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>90</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A eficiência energética é um tema de grande relevância no contexto atual, pois está intrinsecamente ligada à sustentabilidade ambiental, à economia de recursos e à busca por um futuro energético mais limpo e eficiente.

A compreensão dos conceitos relacionados à eficiência energética é essencial para a promoção de práticas e políticas que visam a otimização do uso da energia, contribuindo tanto para a redução dos impactos ambientais quanto para o desenvolvimento econômico sustentável.

No âmbito industrial, onde a energia elétrica é insumo essencial, a compreensão e a otimização do uso energético tornam-se imperativos. Os Motores de Indução Trifásicos (MITs) são os responsáveis pela maior parcela de consumo de energia nas indústrias, em todos os segmentos, e são o foco central de estudo deste trabalho.

Os MITs são máquinas que desempenham relevância em processos industriais, ao mesmo tempo que representam uma fatia substancial do consumo global de energia elétrica. Logo, compreender como otimizar a eficiência desses motores reveste-se de importância crítica para o aprimoramento da eficiência energética no setor industrial.

O Brasil possui uma matriz elétrica predominantemente baseada em fontes de energia renovável, com destaque para a energia hidrelétrica. Em 2022, a energia proveniente de fontes hídricas contribuiu com 64% da oferta total de energia elétrica no país. O consumo final foi de 586,1 TWh, representando uma expansão de 2,3% em comparação ao ano anterior, com destaque para os setores industrial e residencial, que participaram com 37% e 27% respectivamente (BEN, 2023).

Além disso, segundo o Painel de Monitoramento do Consumo de Energia Elétrica, fornecido pela EPE – Empresa de Pesquisa Energética, tendo como referência 2019 a 2022, é possível observar uma tendência de aumento no consumo de energia elétrica, principalmente pelo avanço tecnológico e o crescimento populacional, o que reforça ainda mais a necessidade do consumo eficiente desse recurso, principalmente pelas indústrias.

Em 2022, um estudo da Eletrobrás e Procel revelou que o setor industrial continua sendo um dos maiores consumidores de energia no Brasil, responsável por cerca de 33% do consumo total de eletricidade. Dentro desse setor, os Motores de Indução Trifásicos (MITs) são a principal força motriz nos processos industriais de manufatura, representando a maior parcela do consumo de energia, tanto no Brasil quanto globalmente.

Assim é perceptível a relevância da indústria no consumo de energia no Brasil. Esse consumo é essencial para alimentar os processos de fabricação nas instalações industriais. Assim, essa alta demanda por energia também representa um impacto significativo na eficiência energética global do país.

A otimização do uso de energia na indústria não apenas reduz os custos operacionais, mas também tem um impacto positivo no meio ambiente, diminuindo as emissões de gases de efeito estufa e outros poluentes.

Devido à robustez, confiabilidade, baixo custo e a baixa necessidade de manutenção, os motores de indução são utilizados na maioria das aplicações industriais. (RAJ, C. T *et. al.*, 2009).

Nas indústrias são utilizados predominantemente os motores trifásicos de indução como fonte de força motriz, que desempenham um papel fundamental nos processos de manufatura. O uso generalizado desses motores representa um consumo significativo de energia elétrica à nível global, o que coloca a indústria como setor de maior consumo energético em praticamente todos os países. Esse cenário justifica a necessidade do foco maior nos motores, quando se fala em eficiência energética na indústria, e em um cenário global.

Esses motores encontram aplicação extensiva em uma variada gama de máquinas e equipamentos, que são utilizados em indústrias dos mais diversos setores, abrangendo funções que incluem bombeamento, ventilação, compressão e sistemas transportadores, entre outros. Entretanto, é comum que a operação inadequada destes motores e o estado de conservação precário resultem em consumo exagerado de energia elétrica.

Para reduzir o consumo de energia elétrica dos motores de indução, e melhorar a eficiência energética na indústria, é possível adotar medidas como a substituição dos motores antigos por modelos mais eficientes, a instalação de

sistemas de controle e automação para otimização de operação, a manutenção preventiva e corretiva destes equipamentos, manutenção das máquinas onde eles são aplicados e ainda manutenção das instalações, para manter uma boa qualidade de energia.

O objetivo central deste trabalho é abordar os principais fatores que influenciam a eficiência energética dos MITs. Destacam-se como pontos centrais do trabalho o estudo sobre a influência dos métodos de acionamento dos regimes de carga da temperatura ambiente na eficiência energética dos motores. Esse trabalho se encerra com um estudo de caso, onde se constata, através de ensaios práticos, o nível de influência desses fatores na eficiência energética dessas máquinas.

## **1.1 Objetivos**

### 1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar, de forma prática, a influência de fatores externos, como método de acionamento, regime de carga e temperatura ambiente, na eficiência energética de MITs.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Para se alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos são almeçados.

- Realizar uma revisão da literatura sobre eficiência energética em MITs;
- Realizar ensaios de laboratório para coletar dados relacionados a eficiência energética de um MIT, operando com diferentes métodos de acionamento, regimes de serviço e temperaturas ambiente;
- Processar e analisar os dados obtidos em laboratório;
- Comparar os resultados com a teoria e apresentar as conclusões obtidas.

## 1.2 Justificativa

Segundo Mamizader e Iskender, no *artigo Designing of Induction Motor Efficiency Monitoring System Without Using Torque meter and Speed Sensor*, de 2017, o estudo da eficiência energética dos MITs é importante pois essas máquinas são amplamente utilizadas em diversas aplicações industriais e representam parcela significativa de toda a energia elétrica consumida mundialmente. Essa ampla utilização significa que a melhoria da eficiência energética desses motores pode representar um grande impacto energético global, pois a indústria é o setor que mais consome energia.

As indústrias que buscam otimizar a eficiência energética dessas máquinas podem alcançar economia significativa nos seus custos de processos de manufatura, o que pode representar um grande diferencial competitivo para essas empresas. Além disso, a eficiência energética pode ser uma estratégia importante para alcançar a conformidade com as normas regulatórias, que estão se tornando cada vez mais rigorosas em relação ao consumo de energia. Essa conformidade pode conferir a empresa certificados de padronização, que também representam diferencial competitivo no mercado.

Por fim, é importante ressaltar que a melhoria da eficiência energética dos motores trifásicos de indução pode ser alcançada por meio de diversas estratégias, como o correto dimensionamento do motor, um correto controle de partida e de regulação de velocidade. Assim, como através da substituição de motores antigos por motores de alta eficiência e a realização de manutenções preventivas periódicas, tanto nos motores quanto na infraestrutura elétrica que fornece a energia para esses equipamentos, como forma de garantir a qualidade de energia necessária para otimizar a eficiência energética destes.

Portanto, o estudo da eficiência energética dos motores trifásicos de indução é fundamental para identificar as melhores práticas e soluções para a economia de energia, redução de custos e mitigação de impactos ambientais.

## 1.3 Estrutura do trabalho

Esse trabalho contém 5 capítulos, divididos conforme segue. No capítulo 2 serão abordados conceitos fundamentais relacionados à eficiência energética

em motores de indução trifásica. Em seguida, são apresentados os principais métodos de acionamento, regimes de serviços e temperatura ambiente, seguido da análise da influência destes fatores na eficiência destas máquinas.

No capítulo seguinte é detalhada a metodologia adotada para o estudo prático da eficiência energética dos MITs, incluindo os materiais e métodos, bem como os procedimentos adotados em cada ensaio realizado. Os resultados obtidos nos ensaios práticos são apresentados analisados e interpretados, destacando como cada variável afeta a eficiência dos MITs.

No capítulo 4 são apresentados e comentados os resultados obtidos nos ensaios práticos.

Por fim, o trabalho é concluído com um resumo breve sobre os objetivos e métodos aplicados, assim como com a apresentação das principais contribuições do estudo, destacando as conclusões relevantes para a eficiência energética em motores de indução trifásica. Além disso, são sugeridos temas para futuras pesquisas, com o intuito de expandir a contribuição deste trabalho.

## 2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICA

### 2.1 Eficiência energética

A eficiência energética pode ser entendida como a relação entre a energia empregada e o trabalho realizado, buscando a minimização do desperdício de energia em qualquer processo, seja na produção, distribuição ou consumo de energia (*International Energy Agency, 2020*). A eficiência energética não deve ser apenas uma preocupação isolada, mas sim um princípio que permeia toda a cadeia de geração, transmissão e uso da energia elétrica.

A busca por um uso eficiente da energia não apenas reduz custos, mas também contribui para a sustentabilidade e a preservação dos recursos naturais. Esse objetivo tem se tornado uma prioridade cada vez mais relevante em um mundo onde a energia desempenha um papel central para a sociedade. As indústrias, que utilizam máquinas elétricas em grande escala, estão entre os principais focos dessa iniciativa.

Segundo Mamizader e Iskender, 2017, os motores elétricos são responsáveis por cerca de 40% da energia elétrica total consumida no mundo e 96% dessa energia é consumida pelos motores de indução. Enquanto cerca de 67% dessa energia é usada em motores de indução com potência inferior a 75 kW, mais de 85% das perdas de energia são decorrentes da operação de motores nessa faixa de potência.

Os autores Fitzgerald e Kingsley, 2014, também abordam o tema eficiência energética dos MITs. Para se obter rendimento máximo, embora a energia elétrica possa ser convertida eficientemente em energia mecânica, é imprescindível a combinação de um projeto minucioso das máquinas elétricas, com uma integração apropriada da máquina na aplicação desejada.

Logo, para alcançar o melhor rendimento na conversão de energia elétrica em energia mecânica, é essencial adotar estratégias cuidadosas, tanto no projeto das máquinas elétricas quanto na sua integração com a aplicação pretendida. Isso significa que as máquinas elétricas devem ser projetadas levando em consideração não apenas a eficiência intrínseca, mas também a maneira como serão utilizadas.

O projeto cuidadoso das máquinas elétricas envolve a otimização de componentes, a seleção de materiais apropriados e o correto dimensionamento das diversas partes destes equipamentos. Esses aspectos são importantes para garantir que a energia elétrica seja convertida de forma eficiente em energia mecânica ou o contrário. Logo, é essencial que a máquina seja adequada a aplicação pretendida, para contribuir com a eficiência global da instalação.

Não apenas a seleção do motor deve ser adequada, mas também o método e os dispositivos de partida aplicados, além das rotinas de manutenção e as características do local de instalação. Todos esses fatores influenciam na eficiência elétrica do motor. Devem ser levados em consideração fatores como carga, ciclo de operação, regime de carga, características do ambiente, qualidade da energia de alimentação, entre outros.

A *International Electrotechnical Commission* – IEC define 5 classes de eficiência dos motores elétricos, através da norma internacional IEC 60034-30-1, conforme apresentado na Tabela 1. O índice IE1 indica eficiência padrão, o IE2 alta eficiência, o IE3 eficiência *premium*, o IE4 eficiência *super premium* e o IE5 eficiência *ultra premium*.

Tabela 1: Classe de eficiência segundo a IEC 60034-30-1

<b>Classe</b>	<b>Índice de Eficiência</b>
Ultra-Premium efficiency	IE5
Super-Premium efficiency	IE4
Premium efficiency	IE3
High efficiency	IE2
Standard efficiency	IE1

Fonte: Adaptado de GEBRAS, 2023

No Brasil a norma que estabelece as classes de eficiência energética em motores elétricos é a ABNT NBR 17094-1, com base na IEC 60034-30-1, conforme observa-se na Tabela 2. Na legislação vigente, o nível de eficiência mínimo exigido para a comercialização de motores elétricos é o IR3 (equivalente ao IE3 da norma IEC). Os modelos de eficiência IR2 podiam ser comercializados até agosto de 2021. (GEBRAS, 2021).

Tabela 2: Comparativo classe de eficiência IEC com ABNT

<b>Classe</b>	<b>Índice de Eficiência IEC 60034-30-1</b>	<b>Índice de Eficiência ABNT NBR 17094-1</b>
Ultra-Premium efficiency	IE5	IR5
Super-Premium efficiency	IE4	IR4
Premium efficiency	IE3	IR3
High efficiency	IE2	IR2 (até agosto 2021)
Standard efficiency	IE1	-

Fonte: Adaptado de GEBRAS, 2023

A potência útil fornecida por motores elétricos na ponta do eixo é menor que a potência que o motor absorve da rede de alimentação, por isso o rendimento do motor é sempre inferior a 100%. A diferença entre as duas potências representa as perdas, ocasionadas pelo atrito nos rolamentos, por exemplo, que são transformadas em calor, o qual aquece a bobina e deve ser dissipado para fora do motor, para evitar que a elevação de temperatura seja excessiva (WEG, 2006).

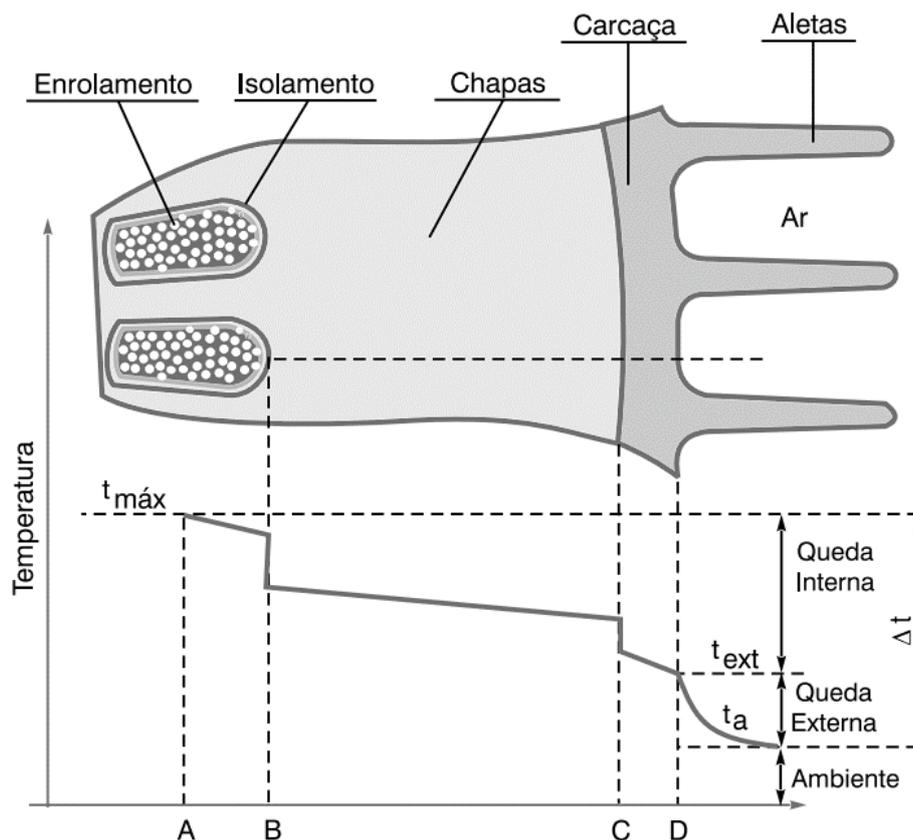
Sendo o motor de indução uma máquina robusta e de construção simples, a sua vida útil depende quase exclusivamente da vida útil da isolamento dos enrolamentos. Esta é afetada por muitos fatores, como umidade, vibrações, ambientes corrosivos e outros. Dentre todos os fatores, o mais importante é, sem dúvida a temperatura de trabalho dos materiais isolantes empregados. Um aumento de 8 a 10 graus na temperatura da isolamento reduz sua vida útil pela metade. (WEG, pag. D.23, 2006).

O calor gerado pelas perdas no interior da máquina é dissipado para fora da máquina, principalmente através da superfície externa da carcaça. Em motores fechados essa dissipação é normalmente auxiliada por um ventilador montado no próprio eixo do motor. Segundo a WEG, uma boa dissipação de calor depende da

- Eficiência do sistema de ventilação;
- Área total de dissipação da carcaça;
- Diferença de temperatura entre a superfície externa da carcaça e do ar do ambiente.

Se o sistema de ventilação é bem projetado, além de ter uma ventoinha eficiente, capaz de movimentar grande volume de ar, deve dirigir esse ar de modo a “varrer” toda a superfície da carcaça, onde se dá a troca de calor. Além disso, esse sistema deve dissipar a maior quantidade de calor gerado, através da menor área de dissipação possível, tendo em vista que o tamanho de um motor geralmente é relevante para maioria das aplicações. Na Figura 1, podem-se observar os cinco principais pontos que delimitam as regiões de calor dos MITs, delimitadas pelos pontos A, B, C e D (WEG, 2006). Observa-se na curva de temperatura que o local de instalação do conjunto de enrolamentos é o ponto de temperatura mais elevada da máquina e que essa temperatura diminui à medida que se aproxima da carcaça e aletas.

Figura 1: Temperatura em um MIT em diferentes pontos



Ponto A - Ponto mais quente do enrolamento, no interior da ranhura, onde é gerado o calor proveniente das perdas nos condutores;

Região AB – Região de queda de temperatura na transferência de calor do ponto mais quente até as espiras mais externas da bobina. Como o ar é um isolante térmico, é importante que não haja “vazios” no interior da ranhura, isto é, as bobinas devem ser compactas e a impregnação com verniz deve ser a melhor possível;

Ponto B – Ponto de queda através do isolamento da ranhura e no contato deste com os condutores, de um lado, e com as chapas do núcleo, do outro;

Região BC – Região de queda de temperatura por transmissão através do material das chapas do núcleo;

Ponto C – Ponto de queda de temperatura no contato entre o núcleo e a carcaça. A condução de calor será tanto melhor quanto melhor for o contato entre as partes, dependendo do bom alinhamento das chapas, e precisão da usinagem da carcaça;

Região CD – Região de queda de temperatura por transmissão através da espessura da carcaça.

Região D - Ponto de queda de temperatura por transmissão através das aletas da carcaça (WEG, 2006).

Outro fator importante com relação a eficiência energéticas para os MITs, é a qualidade da energia utilizada para alimentar o motor. Essa qualidade de energia pode ser prejudicada por distúrbios, que podem ser caracterizados de acordo com os padrões de flutuações que surgem na rede, e geram fenômenos como cintilação, *flicker*, variação de tensão de curta duração – VTCD, afundamentos e elevação de tensão, interrupções, entre outros. Esses distúrbios resultam em distorções e enfraquecimento dos campos magnéticos no interior da máquina, prejudicando o seu rendimento (Eletrobrás, 2004).

Em máquinas elétricas, a avaliação da eficiência é frequentemente baseada em medições das perdas, em vez de se medir diretamente a potência de entrada e saída do motor, sob carga. “Os rendimentos determinados a partir das medições de perdas podem ser usados para comparar máquinas semelhantes, quando exatamente os mesmos métodos de medição e de cálculo são usados em cada caso.” (Fitzgerald e Kingsley, 2014, pag. 677).

Nessa perspectiva, quantificar as perdas totais do motor é relevante, pois assim é possível determinar a eficiência. Segundo *The Institute of Electrical and Electronics Engineers* – IEEE, Std -112, na clausula 5, são definidos quatro tipos de perdas de energia em motores. Essas perdas são por efeito joule no enrolamento do estator,  $W_S$ , perda por efeito joule no rotor,  $W_R$ , perdas no núcleo,  $W_{Núcleo}$ , e perda rotacionais mecânica,  $W_{AV}$ . Na Equação 1 as variáveis  $P_{Entrada}$ ,  $P_{Saída}$  e  $P_{Perdas}$  se referem às potências de entrada, de saída e das perdas totais do motor, respectivamente, onde as perdas totais do motor são quantificadas através da Equação 2.

$$P_{Perdas} = P_{Entrada} - P_{Saída} \quad (1)$$

$$P_{Perdas} = W_S + W_R + W_{Núcleo} + W_{AV} \quad (2)$$

A eficiência do motor,  $\eta$ , é definida como reação entre a potência de saída e da entrada, conforme é mostrado na Equação 3.

$$\eta = \frac{P_{Saída}}{P_{Entrada}} \times 100\% = 1 - \frac{P_{Perdas}}{P_{Entrada}} \times 100\% \quad (3)$$

As perdas por efeito joule na bobina do estator,  $W_S$ , são contabilizadas conforme a Equação 4.

$$W_S = 1,5I^2R \quad (4)$$

Onde  $I$  é a corrente de linha se a ligação for estrela e  $R$  é a resistência do enrolamento do motor, que possui relação inversa com a variação de temperatura. As perdas por efeito joule no bobinamento do rotor de motores do tipo rotor bobinado devem ser determinadas a partir do escorregamento, conforme mostrado na Equação 6, em unidades percentuais, usando a Equação 5.

$$W_R = (P_{Entrada} - W_S - W_{Núcleo}) \times s \quad (5)$$

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (6)$$

$$n_s = \frac{120 f}{p} \quad (7)$$

Em que,  $s$  é o escorregamento,  $n_s$  é a velocidade síncrona,  $n$  a velocidade do motor, dado em rotações por minuto (rpm),  $f$  a frequência da tensão de alimentação da máquina (Hz) e  $p$  o número de polos. A perda no núcleo,  $W_{Núcleo}$ , é dada pela soma das perdas pela histerese de magnetização e as perdas pelas correntes parasitas no ferro. Segundo Fitzgerald e Kingsley, a variação nas perdas por histerese  $P_h$  pode ser expressa em forma de equação apenas com base empírica. Uma relação normalmente usada é dada na Equação 8:

$$P_h = K_h f B_{max}^n \quad (8)$$

Onde  $K_h$  é uma constante de proporcionalidade que, depende das características e do volume do ferro da máquina, e  $f$  a é frequência de operação da máquina. O expoente  $n$  varia de 1,5 a 2,5, adotando-se o valor 2,0 quando o parâmetro é desconhecido. (Fitzgerald e Kingsley, 2014).

As perdas por correntes parasitas,  $W_{LL}$ , variam com o quadrado da densidade de fluxo magnético, a frequência do fluxo e a espessura das chapas. Em condições normais de operação, pode ser expressa com aproximação suficiente pela Equação 9.

$$W_{LL} = K_p (B_{max} f \delta)^2 \quad (9)$$

Em que  $\delta$  é a espessura das chapas,  $B_{max}$  é a densidade de fluxo máxima,  $f$  frequência de operação da máquina e  $K_p$  constante de proporcionalidade. O valor de  $K_p$  depende das unidades usadas, do volume de ferro e da resistividade do ferro.

A perda  $W_{AV}$  é a perda rotacional mecânica devido ao atrito e à ventilação. Ela também é praticamente constante, desde carga nula até a carga máxima, e geralmente é medida a partir do teste em vazio (Lun B. *et. al*, 2006).

A perda de correntes parasita,  $P_p$ , são as perdas decorrentes da desmagnetização causada pelas correntes que circulam no ferro da máquina, induzidas pelo campo magnético alternado produzido dentro da máquina. Pode ser dividida em duas partes: perda de corrente parasita no estator,  $P_{pe}$ , e perda de correntes parasita no rotor,  $P_{pr}$  (Lun B. *et al.*, 2006).

Conforme foi abordado preliminarmente, fatores como qualidade de energia, método de acionamento, regime de serviço e temperatura ambiente influenciam diretamente na eficiência energética dessas máquinas. Nas seções seguintes, cada um desses fatores será abordado mais a fundo.

## 2.2 Regimes de serviço dos MITs

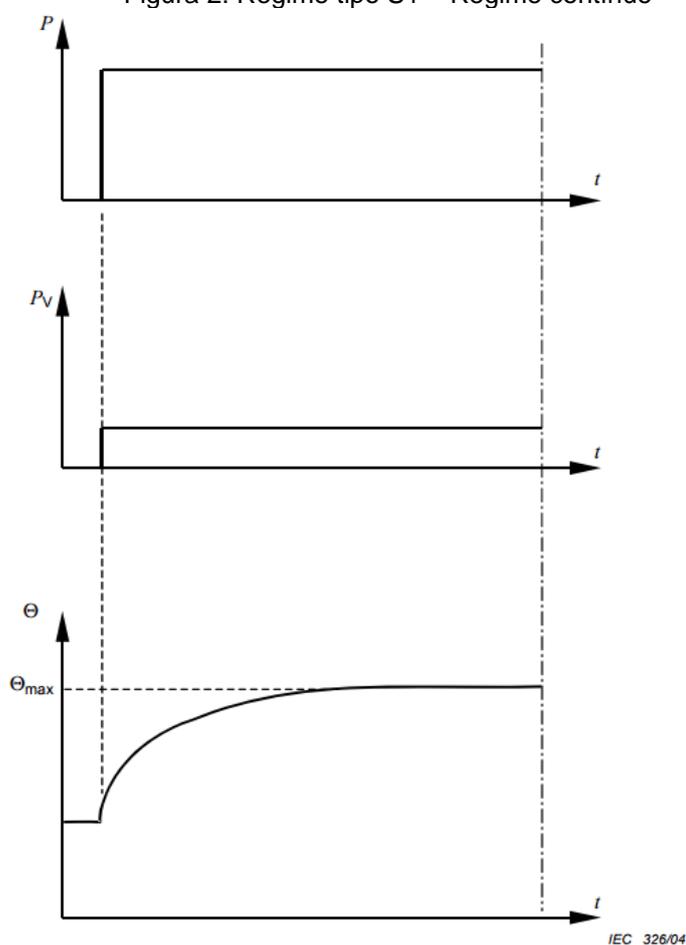
De acordo com a norma IEC 60034-1, o regime de trabalho ou regime de serviço refere-se ao grau de regularidade da carga imposta a um motor. Em geral, a maioria dos motores são projetados para operar em regime contínuo, o que significa que eles funcionam sob carga constante e durante um período suficiente para que o motor alcance um equilíbrio térmico enquanto está em funcionamento.

Nos casos em que a carga não variar ou, se for o caso, variar de forma previsível, o regime poderá ser indicado numericamente ou por meio de gráficos que representam a variação em função do tempo das grandezas variáveis. Quando a sequência real dos valores no tempo for indeterminada, deverá ser indicada uma sequência fictícia não menos severa que a real. (WEG, 2023).

Identificar o regime de serviço de MITs, conforme definidos pela IEC 60034-1, para uma dada aplicação, é essencial para a escolha, operação e manutenção eficaz desses motores, tanto para aplicações industriais quanto comerciais. A seguir são apresentadas as definições dos principais regimes de serviço previstos nesta norma, com os respectivos gráficos de dinâmica de carga  $P$ , perdas elétricas,  $P_v$ , temperatura,  $\theta$  e temperatura máxima,  $\theta_{max}$ .

Regime tipo S1 - Regime contínuo: este regime é caracterizado pelo funcionamento ininterrupto do motor, mantendo a carga constante, por um período significativo, como pode ser observado na Figura 2.

Figura 2: Regime tipo S1 – Regime contínuo

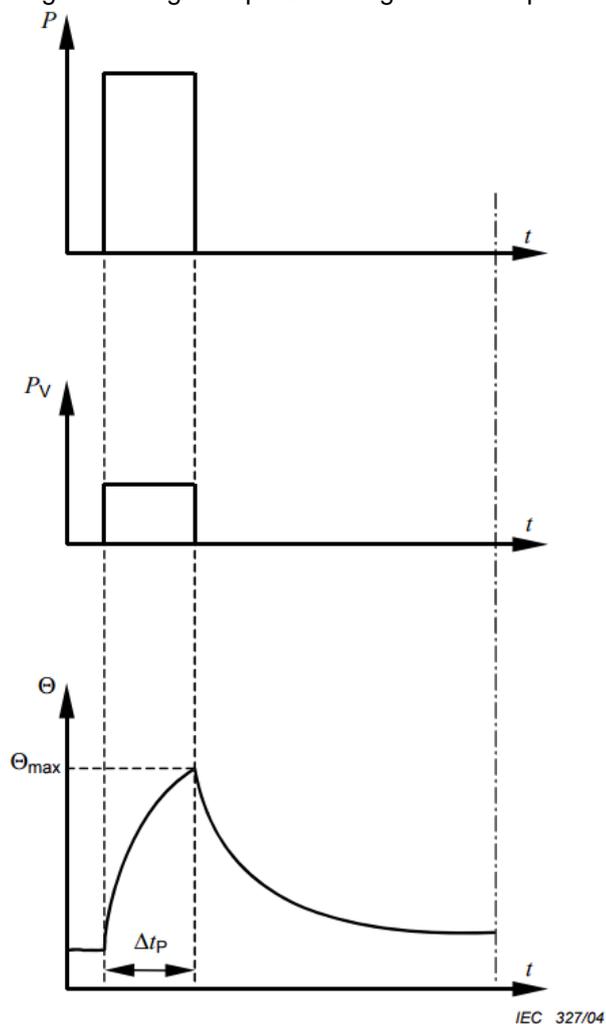


Fonte: IEC 60034-1, 2010

1. Regime tipo S2 – Regime de tempo limitado: funcionamento à carga constante por um tempo determinado, inferior ao necessário para atingir o equilíbrio térmico, seguido por um tempo de repouso de duração suficiente para restabelecer a temperatura da máquina

com até + 2 °C em relação à temperatura do fluido refrigerante, conforme é mostrado na Figura 3. (NBR 17094, 2018).

Figura 3: Regime tipo S2 – Regime de tempo limitado

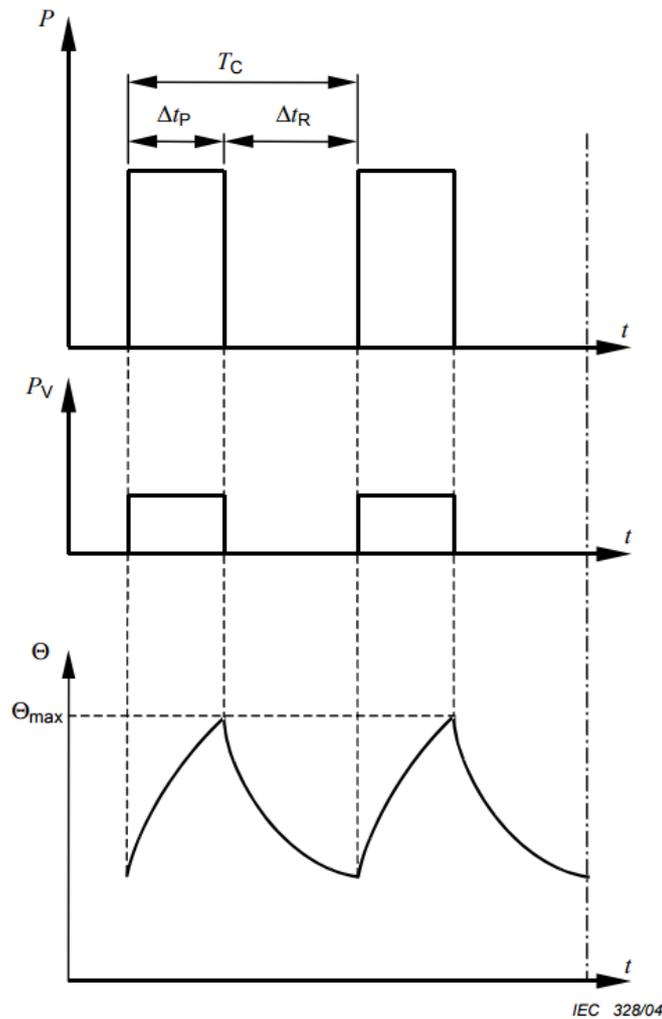


Fonte: IEC 60034-1, 2010

Em que  $\Delta t_p$  se refere ao tempo em funcionamento à carga constante.

2. Regime tipo S3 – Regime intermitente periódico: sequência de ciclos de regime idênticos, cada um incluindo um tempo de funcionamento com carga constante e um tempo desenergizado e em repouso, como observa-se na Figura 4. Neste regime, o ciclo é tal que corrente de partida não afeta significativamente a elevação de temperatura.

Figura 4: Regime tipo S3 – Regime intermitente periódico



Fonte: IEC 60034-1, 2010

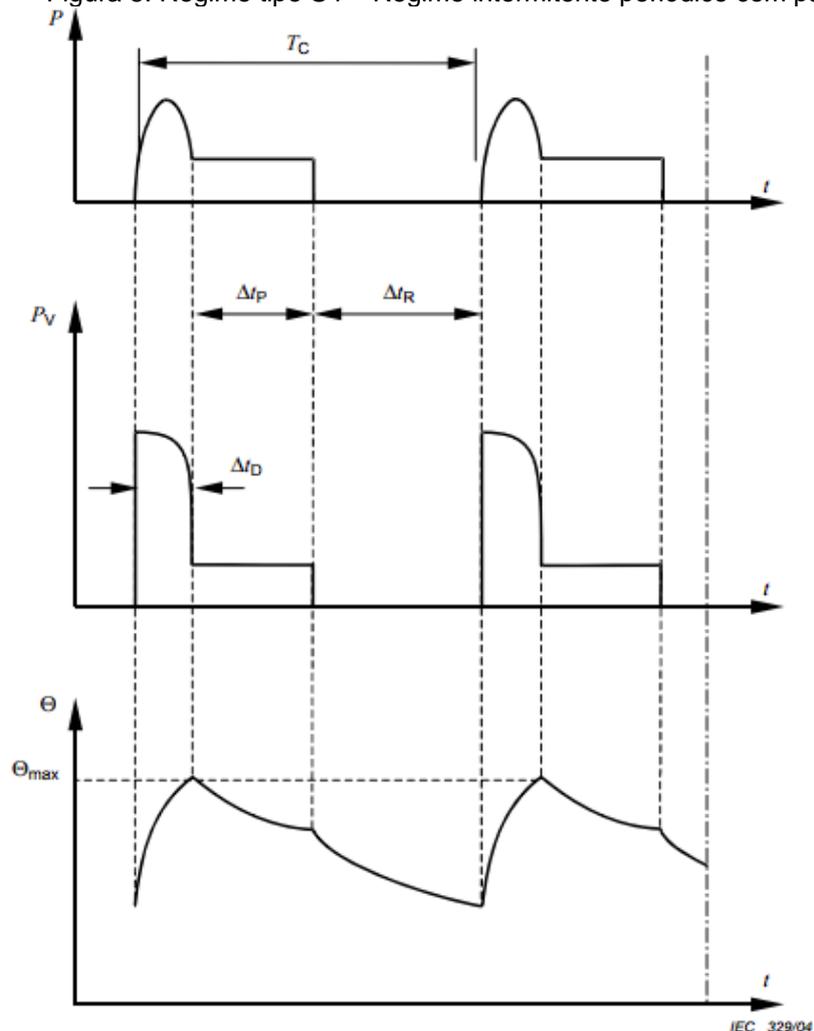
Em que  $T_c$  é a duração do ciclo,  $\Delta t_R$  é o tempo de desenergizado e em repouso, cujo um dos maiores é o Fator de Duração do Ciclo ( $FDC$ ), que é dado pela Equação 10.

$$FDC = \frac{\Delta t_p}{T_c} \quad (10)$$

Em que  $\Delta t_p$  é o tempo energizado.

3. Regime tipo S4 – Regime intermitente periódico com partidas: Sequência de ciclos de regime idênticos, cada qual incluindo um tempo de partida, um tempo de funcionamento com carga constante e um tempo de repouso, conforme pode ser visto na Figura 5.

Figura 5: Regime tipo S4 – Regime intermitente periódico com partidas



Fonte: IEC 60034-1, 2010

Nesse caso, o FDC é dado pela Equação 11:

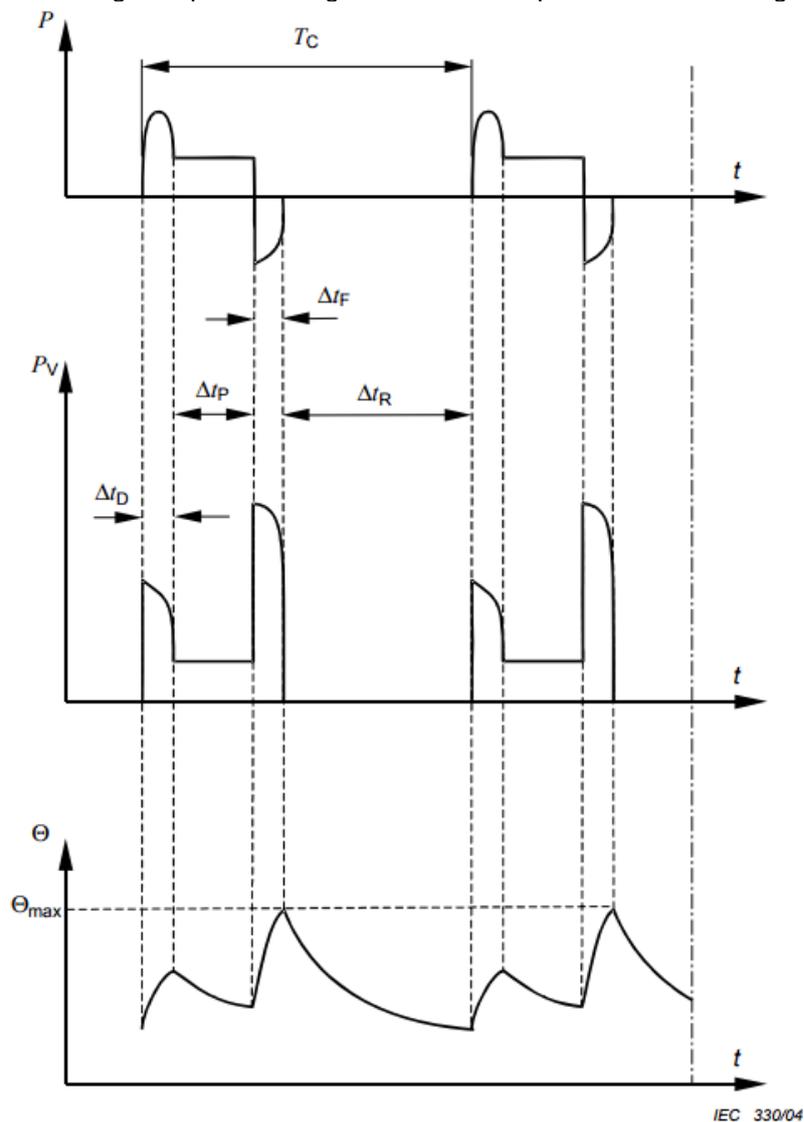
$$FDC = \frac{(\Delta t_D + \Delta t_P)}{T_C} \quad (11)$$

Onde:

- $\Delta t_D$  é o tempo de partida;
- $\Delta t_P$  é o tempo energizado;
- $T_C$  é o tempo do ciclo.

4. Regime tipo S5 – Regime intermitente periódico com frenagem elétrica: sequência de ciclos de regime idênticos, cada qual incluindo um tempo de partida, um tempo de funcionamento à carga constante, um tempo de frenagem elétrica rápida e um tempo desenergizado e em repouso, conforme é mostrado na Figura 6.

Figura 6: Regime tipo S5 – Regime intermitente periódico com frenagem elétrica

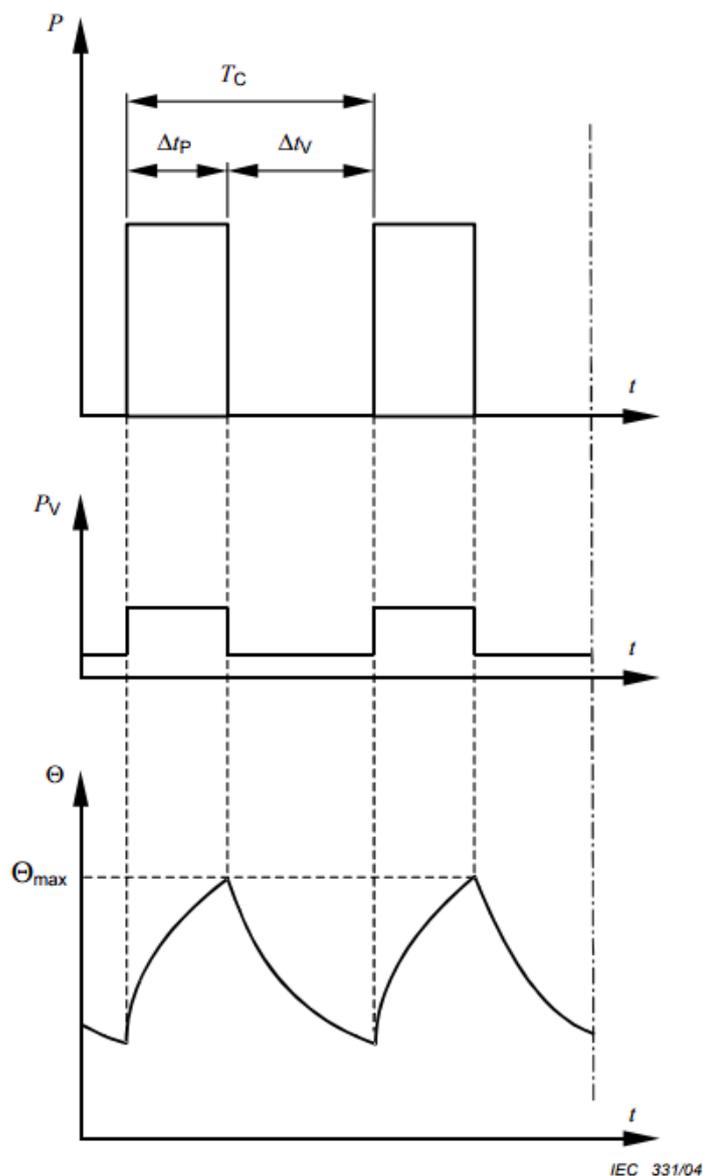


Fonte: IEC 60034-1, 2010

Em que o  $\Delta t_F$  é o tempo de frenagem elétrica.

5. Regime tipo S6 – Regime de funcionamento contínuo periódico com carga intermitente: sequência de ciclos de regime idênticos, cada qual incluindo um tempo de funcionamento à carga constante e um tempo de funcionamento em vazio. Não existe tempo desenergizado e em repouso, como pode ser observado na Figura 7.

Figura 7: Regime tipo S6 – Regime de funcionamento contínuo periódico com carga intermitente



Fonte: IEC 60034-1, 2010

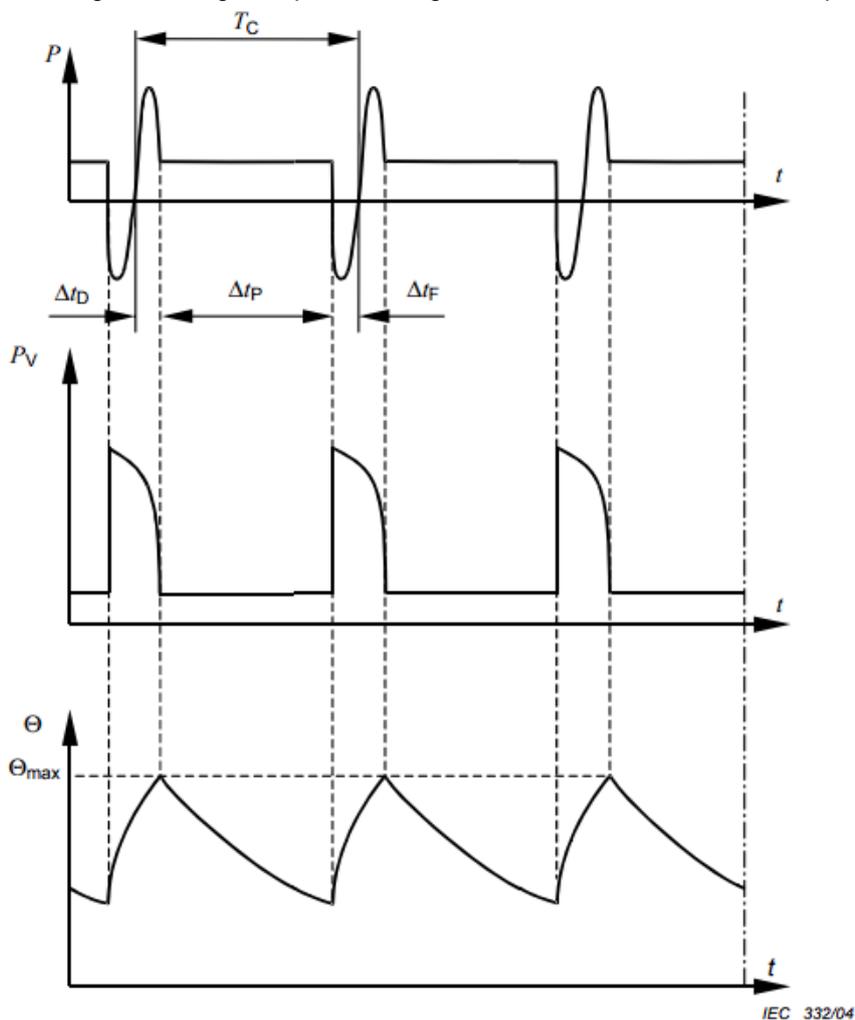
Em que  $\Delta t_v$  é o tempo de funcionamento a vazio e o FDC é calculado através da Equação 12:

$$FDC = \frac{\Delta t_p}{T_c} \quad (12)$$

6. Regime tipo S7 – Regime de funcionamento contínuo periódico com frenagem elétrica: sequência de ciclos de regime idênticos, cada qual incluindo um tempo de partida, um tempo de funcionamento à carga constante e um tempo de frenagem elétrica.

Não existe tempo desenergizado e em repouso, conforme pode ser observado na Figura 8.

Figura 8: Regime tipo S7 – Regime de funcionamento contínuo periódico



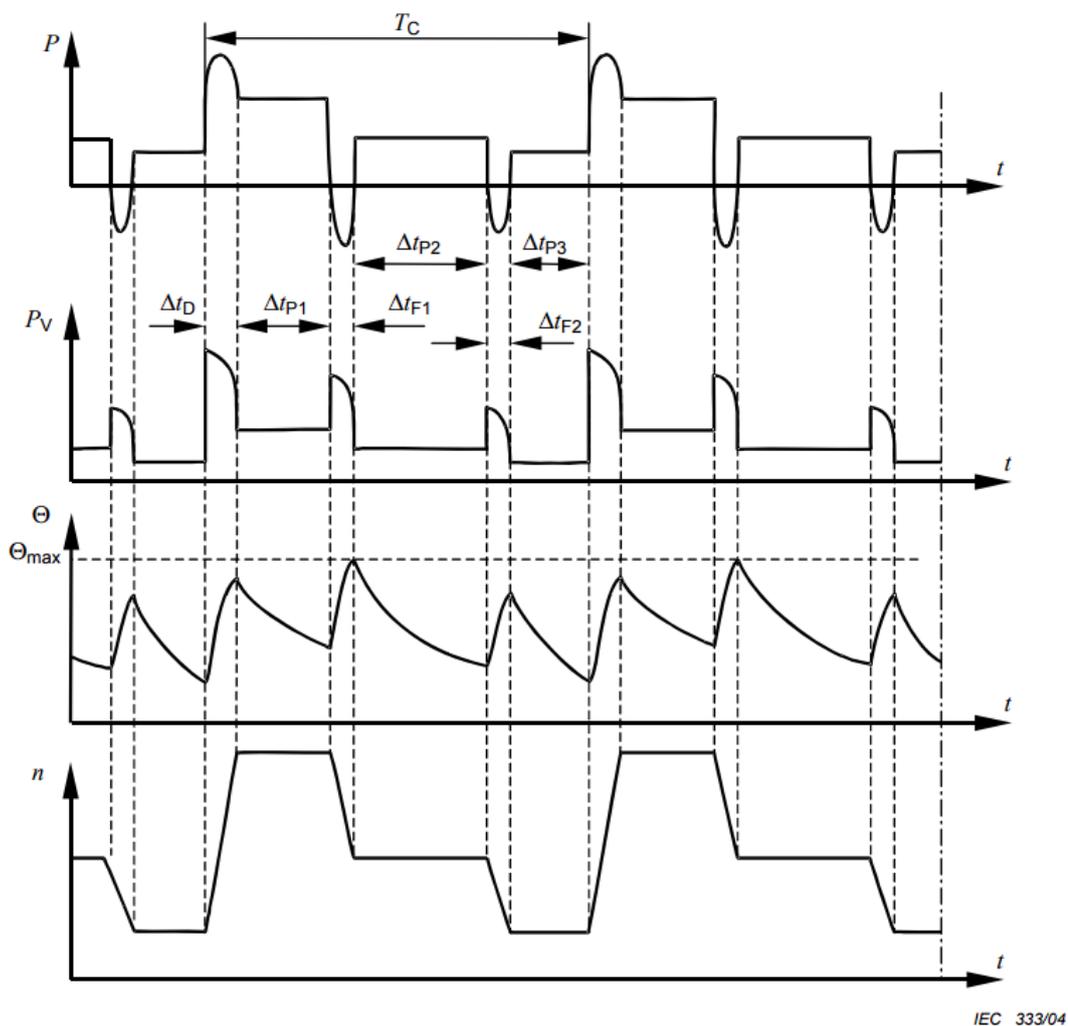
Fonte: IEC 60034-1, 2010

Neste regime o FDC é unitário

$$FDC = 1 \quad (13)$$

7. Regime tipo S8 – Regime de funcionamento contínuo periódico com mudanças correspondentes de carga e de rotação: sequência de ciclos de regime idênticos, cada qual incluindo um tempo de funcionamento à carga constante correspondente a uma determinada velocidade de rotação, seguido de um ou mais tempos de funcionamento a outras cargas constantes, correspondentes a diferentes rotações. Não existe tempo desenergizado e em repouso, conforme pode ser observado na Figura 9.

Figura 9: Regime tipo S8 – Regime de funcionamento contínuo periódico, com mudanças



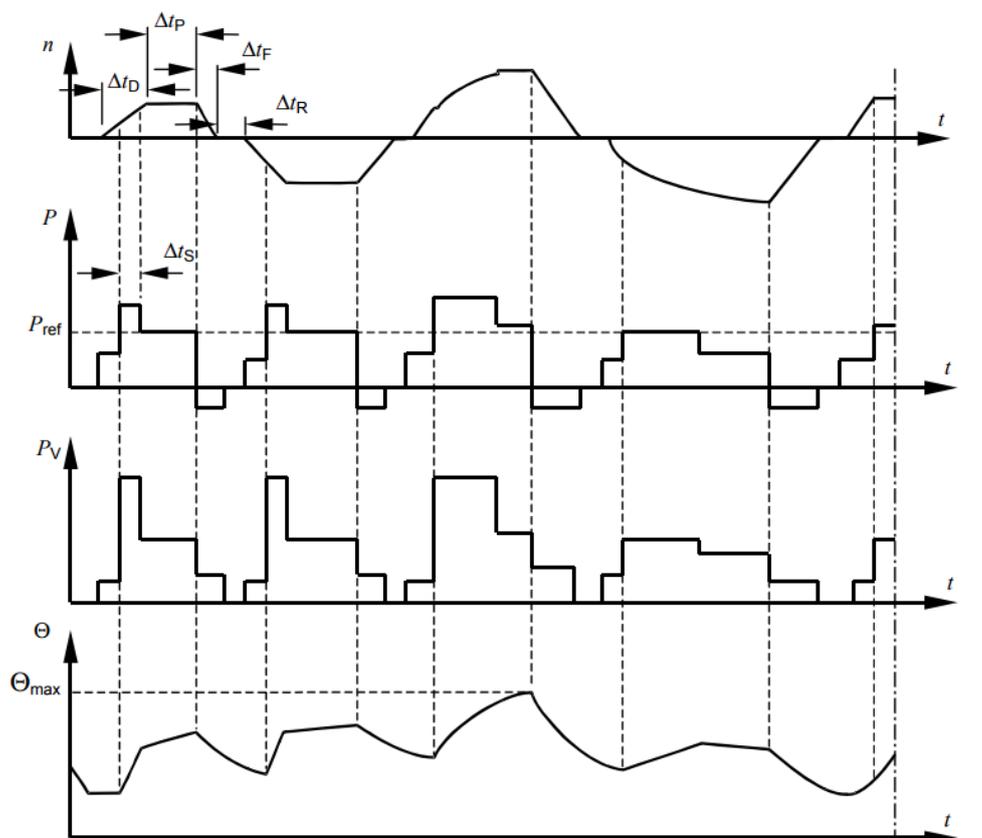
Fonte: IEC 60034-1, 2010

Em que  $\Delta t_F$  é o tempo de frenagem elétrica,  $n$  é a velocidade de rotação e o FDC é dado pela Equação 14:

$$FDC = \frac{\Delta t_D + \Delta t_{P1}}{T_C} + \frac{\Delta t_{F1} + \Delta t_{P2}}{T_C} + \frac{\Delta t_{F2} + \Delta t_{P3}}{T_C} \quad (14)$$

8. Regime tipo S9 – Regime com variações não periódicas de carga e de rotação: regime no qual geralmente a carga e a rotação variam não periodicamente, dentro da faixa de funcionamento admissível. Este regime inclui frequentemente sobrecargas aplicadas que podem ser muito superiores à carga de referência, conforme pode ser visto na Figura 10.

Figura 10: Regime tipo S9 – Regime com variações não periódicas de carga e rotação



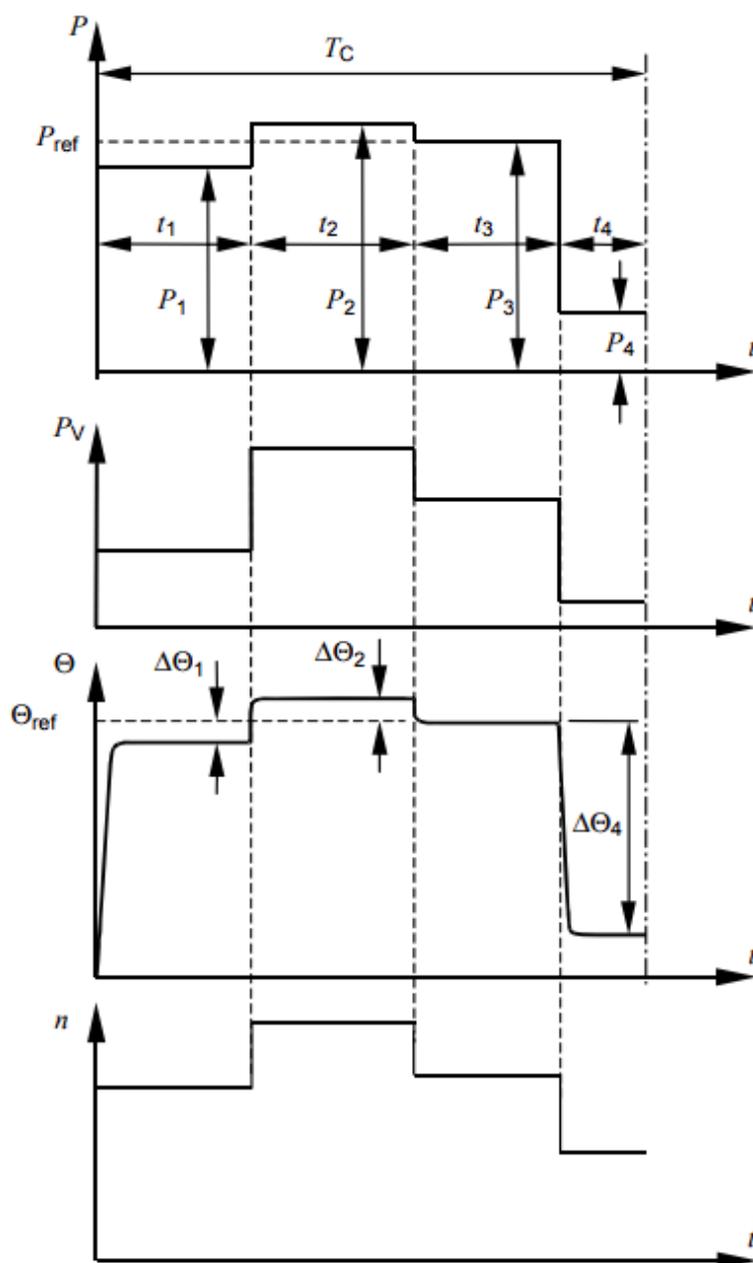
IEC 334/04

Fonte: IEC 60034-1, 2010

Em que  $\Delta t_S$  é o tempo de funcionamento com sobrecarga.

9. Regime tipo S10 – Regime com cargas e rotações constantes distintas: regime que consiste em um número específico de valores distintos de cargas (ou cargas equivalentes) e, se aplicável, rotação, sendo cada combinação carga/rotação mantida por um tempo suficiente para permitir que a máquina alcance o equilíbrio térmico, conforme é mostrado na Figura 11. A carga mínima durante um ciclo de regime pode ter o valor zero (funcionamento em vazio ou repouso desenergizado).

Figura 11: Regime tipo S10 – Regime com cargas constantes distintas



IEC 335/04

Fonte: IEC 60034-1, 2010

Em que  $\theta_{ref}$  é a temperatura na carga de referência, baseada no regime S1,  $t_i$  é o tempo de uma carga constante dentro de um ciclo e  $\Delta\theta_i$  trata-se da diferença entre a elevação de temperatura do enrolamento, para cada variação de carga dentro de um ciclo, e a elevação de temperatura baseada no regime tipo S1 com carga de referência.

A utilização de regime de serviço distinto do informado na placa de identificação pode levar o motor ao sobreaquecimento e conseqüente danos ao mesmo (WEG, 2023). Logo, cada regime é projetado para corresponder a um

conjunto específico de condições operacionais. Caso essas condições não sejam obedecidas, o impacto na eficiência de operação do motor é inevitável.

Dessa forma, para cada demanda específica é possível identificar um regime de serviço da IEC 60034-1 que mais se aproxima da aplicação em questão. Identificar o regime de operação é fundamental para selecionar o motor apropriado para cada aplicação, pois estas máquinas são projetadas para operar de forma otimizadas para determinados regimes.

### **2.3 Métodos de acionamento dos MITs**

O acionamento dos motores trifásicos de indução pode ser feito através de vários métodos, que podem ser classificados basicamente em duas categorias, a partida direta e partida indireta. A mais viável, do ponto de vista econômico, é a partida direta por meio de contadores, pois é a maneira mais simples e econômica de se partir um MIT. Porém, há muitas aplicações requerem partidas mais suaves, portanto, requerendo uma partida indireta da máquina. (Segundo A.; Rodrigues C., 2015).

Para implementação da partida direta é utilizado um contator como dispositivo de manobra e, ao menos, um dispositivo de proteção, que podem ser fusíveis e relés de sobrecarga ou disjuntores motor. Para isso, é importante selecionar esse dispositivo de acordo com a tensão e corrente nominal de alimentação da bobina do motor. (Segundo A.; Rodrigues C., 2015).

A partida direta não é indicada para motores de médio e grande porte, pois podem surgir perturbações na rede de alimentação devido à corrente de pico que surge no início do acionamento, que pode atingir até 900% da corrente nominal. Essa elevação de corrente pode causar acentuada queda de tensão no sistema de alimentação, provocando interferências em outros equipamentos instalados no sistema (Franchi, 2008).

A partida estrela-triângulo é o método de partida indireta mais simples, em que a máquina inicialmente é partida com fechamento das bobinas em estrela Y e em seguida o fechamento é alterado para triângulo  $\Delta$ . O fechamento em estrela deve ser mantido até que a máquina alcance uma velocidade próxima a velocidade nominal, quando, então, esta conexão é desfeita e executada a

ligação em triângulo. Durante a partida em estrela, o conjugado e a corrente de partida ficam reduzidos aproximadamente  $1/3$  de seus valores nominais. Esse método de partida só é recomendado em aplicações onde o conjugado de partida em estrela seja maior que o conjugado da carga do eixo. Portanto, este método só é recomendado para partidas a vazio ou com baixa carga no eixo. (Mamede, 2012).

Outro método que merece destaque para acionamento de um MIT é a utilização de um conversor de frequência. Esse dispositivo eletrônico atua em 2 etapas, onde a primeira consiste na retificação da entrada (alternada), alimentado um barramento CC, e a segunda na inversão da tensão CC para CA, com controle da frequência e da tensão de saída, que passam a ser ajustáveis. Como a velocidade de rotação para um motor de indução depende da frequência da tensão aplicada nas bobinas de armadura, é possível controlar a velocidade do eixo do motor por meio da frequência imposta pelo inversor. “A frequência de operação de um inversor está normalmente entre 0,5 e 400Hz, dependendo do modelo e da marca” (Segundo; Rodrigues, 2015).

Em sistemas de acionamento, inversores de frequência e *softstarters* são amplamente utilizados em motores elétricos de indução trifásicos para substituir sistemas de variação de velocidade mecânicos, como polias e variadores hidráulicos, bem como os motores de corrente contínua, que são mais caros e exigem maior manutenção (Silva, 2011). Além de controlar a velocidade dos motores, uma das funções mais importantes desses dispositivos é a redução da corrente de partida, que minimiza o impacto no sistema elétrico durante a inicialização do motor. Através dessa função, o inversor de frequência e a *softstarter* limitam a corrente inicial, protegendo a rede elétrica de sobrecargas e picos de corrente, o que prolonga a vida útil do motor e evita danos aos componentes elétricos (Franchi, 2008).

Além de controlar a corrente de partida e a velocidade, esses dispositivos também desempenham outras funções importantes, como a proteção contra sobrecargas elétricas e mecânicas, curto-circuito, inversão de fase e rotor bloqueado. Ao integrar funções de proteção e automação, os inversores de frequência e *softstarters* contribuem para a segurança e eficiência dos sistemas industriais. Eles permitem o monitoramento e ajuste de parâmetros

operacionais em tempo real, facilitando a detecção precoce de falhas e reduzindo o tempo de inatividade, o que é essencial para a produtividade e a segurança das operações (Franchi, 2008).

Esses dispositivos eletrônicos também são fundamentais para a automação industrial, permitindo o controle preciso de velocidade e torque em motores de indução, adaptando-se às demandas variáveis dos processos produtivos. Isso resulta em maior eficiência energética e flexibilidade operacional, além de proporcionar um ambiente de trabalho mais seguro e com menor custo de manutenção. Portanto, os inversores de frequência e *softstarters* não apenas substituem sistemas mecânicos ultrapassados, mas também agregam múltiplas funções essenciais para a operação moderna de motores de indução trifásicos, alinhando-se às necessidades de controle, segurança e eficiência em ambientes industriais (Silva, 2011; Franchi, 2008).

Algumas restrições se aplicam à eficiência do MIT quando se utilizam conversores de frequência. O conversor não fornece uma forma de onda perfeitamente senoidal, gerando perdas adicionais devido às distorções harmônicas, que podem variar entre 2% e 5% em condições normais de operação (Franchi, 2008). Além disso, a comutação do conversor em alta frequência pode causar sobretensões e picos de tensão elevados, que afetam o isolamento entre fases, comprometendo a durabilidade do motor.

É importante salientar que o método de partida pode influenciar significativamente o consumo de energia não apenas em motores de grande porte, mas também em situações onde um número elevado de motores menores opera em regime intermitente, com frequentes interrupções ou variações de velocidade durante a operação. Nesses casos, o impacto no consumo de energia ocorre devido aos picos iniciais de corrente que são bastante elevados, resultando em um aumento significativo no consumo energético total.

## **2.4 Indicadores de qualidade de energia**

Segundo Stefan Kohler, 2017, os indicadores de qualidade de energia permitem quantificar os desvios de grandezas elétricas de uma instalação de um padrão ideal, livre de perturbações e seguro para os equipamentos ligados a ele.

Esses desvios podem ser classificados conforme determinados padrões e quantificado conforme indicadores específicos.

Quando os distúrbios que ocorrem nos sistemas podem provocar inúmeras interferências indesejáveis, como acionamentos indevidos de relés, mau funcionamento de equipamentos sensíveis, distorções em equipamentos de medição, podendo ocorrer a interrupção do fornecimento de energia. Há prejuízos tanto para as concessionárias quanto para os consumidores. (Ribeiro, pag. 22, 2015).

A avaliação desses distúrbios é importante para garantir a confiabilidade e a segurança dos equipamentos elétricos, inclusive MITs, que são sensíveis a distúrbio elétricos. Para isso, são utilizados diversos equipamentos de medição e análise de qualidade de energia, como osciloscópios, analisadores de qualidade de energia, medidores de qualidade de energia, entre outros.

Os distúrbios relacionados à qualidade da energia elétrica são prevalentes em instalações industriais e comerciais, que representam as maiores parcelas de consumo de energia no Brasil (EPE, 2022). Os indicadores mais utilizados são: harmônicos de corrente e tensão, variações de tensão de curta duração, cintilação, transientes da forma de onda e fator de potência. Estes serão abordados nas sessões seguintes.

#### 2.4.1 Harmônicos de corrente e tensão

Segundo Paulillo e Teixeira, 2015, os harmônicos são fenômenos contínuos e não devem ser confundidos com fenômenos de curta duração, os quais duram apenas alguns ciclos. Distorção harmônica é um tipo específico de distúrbio elétrico que é normalmente associada à crescente quantidade de acionamentos estáticos, fontes chaveadas e outros dispositivos eletrônicos nas plantas industriais. É gerado por cargas não lineares, como retificadores, inversores, dispositivos eletrônicos de comutação e dispositivos com capacitores.

Essas correntes harmônicas, quando circulam por uma rede elétrica, interagem com as impedâncias da rede, gerando tensões harmônicas. Isso resulta em uma deformação da forma de onda da tensão de alimentação. Essas deformações da tensão podem ter efeitos indesejados, como superaquecimento

de motores, mau funcionamento de equipamentos eletrônicos sensíveis e perdas de eficiência. (Evangelista, 2008).

A PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, trata-se de um documento regulatório com objetivo possibilitar a conexão elétrica ao sistema de distribuição por usuários, fornecida pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Esse documento exige, de forma clara e transparente, que os indicadores de desempenho ou de qualidade sejam atingidos, preservando, dentre outros aspectos, a segurança, a eficiência e a confiabilidade dos sistemas elétricos. O Módulo 8 do PRODIST, denominado 'Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica', em sua versão 1, de dezembro de 2021, estabelece os valores máximos de referência permitidos para as distorções harmônicas totais, conforme tensão nominal de alimentação, como mostra a Tabela 3.

Tabela 3: – Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental)

Indicador	Tensão nominal		
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1,0 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} < V_n < 230 \text{ kV}$
DTT <sub>95%</sub>	10,0%	8,0%	5,0%
DTT <sub>p95%</sub>	2,5%	2,0%	1,0%
DTT <sub>i95%</sub>	7,5%	6,0%	4,0%
DTT <sub>395%</sub>	6,5%	5,0%	3,0%

Fonte: Adaptado de PRODIST, 2021

Com base no PRODIST, o DTT% refere-se à Distorção harmônica total de tensão; DTT<sub>p</sub>% refere-se à Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3; DTT<sub>i</sub>% refere-se à Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3 e DTT<sub>3</sub>%, refere-se à Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3. O termo 95% indica que o valor limite de harmônicas foi superado por apenas 5% das 1008 leituras válidas.

Segundo Evangelista (2008), a presença de harmônicos em um sistema não necessariamente causa danos imediatos, mas no decorrer do tempo os equipamentos expostos a correntes harmônicas podem vir a apresentar sérios problemas. As harmônicas têm impacto econômico considerável, resultando em problemas como:

- Envelhecimento precoce do material que constitui motores, levando a necessidade de substituição mais precoce, o que também representa um custo adicional;

- Sobrecargas da rede, que obrigam a aumentar a potência necessária para manter a carga operando, implicam, a menos que haja um sobredimensionamento das instalações, em perdas suplementares;
- Deformações de corrente que provocam disparos intempestivos dos dispositivos de proteção e a parada das instalações da produção.

O FHT (Fator Harmônico de Tensão) deve ser calculado usando a Equação 15 da ABNT NBR 17094:

$$FHT = \sqrt{\sum_{n=2}^k \frac{U_n^2}{n}} \quad (15)$$

Onde  $U_n$  trata-se do valor por unidade do harmônico de tensão (referido a tensão nominal,  $U_n$ )  $n$  é a ordem do harmônico (não divisível por três, no caso de motores trifásicos) e  $k = 13$ , valor definido pela norma.

Os custos relacionados com o material, as perdas energéticas e as perdas de produtividade ocasionam queda de competitividade para as indústrias.

Em função das cargas existentes no sistema elétrico contendo MITs, manter o controle no nível de distorção harmônica torna-se fundamental. Assim, existem algumas alternativas que podem ser utilizadas para reduzir essa distorção, dentre elas: a inserção de filtros ativos ou passivos próximos às fontes geradoras de harmônicos e a atenuação da circulação de harmônicas de sequência zero, em circuitos trifásicos, com a conexão de um dos lados dos transformadores em triângulo (Bollen, 2000).

Dessa forma, é importante mencionar que para resolver ou reduzir a distorção das harmônicas no sistema é fundamental um estudo prévio da instalação, e por fim, escolher e dimensionar a alternativa mais econômica e eficaz. Em instalações de mais elevada potência esse estudo sempre justifica, pois os ganhos de eficiência energética podem representar economia significativa de energia elétrica.

### 2.4.2 As variações de tensão de curta duração

Edson Martinho define afundamento de tensão de curta duração como a redução no valor eficaz da tensão entre 0,1 e 0,9 p.u., na frequência fundamental, com duração entre 0,5 ciclo e um minuto. O PRODIST, complementa que a Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD) são desvios significativos na amplitude do valor eficaz da tensão durante um intervalo de tempo inferior a três minutos. De acordo com o PRODIST, 2021, as variações de tensão de curta duração são classificadas de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4: Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração

Denominação de acordo com a Duração da Variação	Duração da Variação	Desvio
Interrupção Momentânea de Tensão	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 p.u
Afundamento Momentâneo de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
Elevação Momentânea de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior a 1,1 p.u
Interrupção Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Inferior a 0,1 p.u
Afundamento Temporário de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
Elevação Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior a 1,1 p.u

Fonte: Adaptado de PRODIST, 2021

Para o cálculo das variações de tensão de curta duração, são consideradas as terminologias apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5: Terminologia aplicável para calcular o VTCD

Identificação de Terminologia	Sigla
Varição de Tensão de Curta Duração	VTCD
Interrupção Momentânea de Tensão	IMT
Afundamento Momentâneo de Tensão	AMT
Elevação Momentânea de Tensão	EMT
Interrupção Temporária de Tensão	ITT
Afundamento Temporária de Tensão	ATT
Elevação Temporária de Tensão	ETT
Amplitude do evento de VTCD	$V_e$
Duração do evento de VTCD	$\Delta t_e$
Frequência de ocorrências de eventos de VTCD	$f_e$
Fator de Impacto	$FI$
Fator de Impacto base	$FI_{BASE}$

Fonte: Adaptado de PRODIST, 2021

O cálculo de amplitude de eventos de VTCD é feito conforme a Equação 16. Em que  $V_e$  é a amplitude do evento de VTCD, em porcentagem,  $V_{res}$  é a tensão residual do evento de VTCD, em Volts e  $V_{ref}$  é a tensão de referência em Volts.

$$V_e = \frac{V_{res}}{V_{ref}} \times 100 \quad (16)$$

A duração do evento VTCD é dado pela Equação 16.  $\Delta t_e$  encontra-se em milissegundos,  $t_f$  e  $t_i$  indicam o instante final e inicial do evento de VTCD, respectivamente, conforme a Equação 17.

$$\Delta t_e = t_f - t_i \quad (17)$$

Em que  $f_e$  indica a frequência de ocorrências de eventos VTCD e  $n$  a quantidade desses eventos registrados no período de avaliação, apresentada na Equação 18.

$$f_e = n \quad (18)$$

Os efeitos transitórios devido a afundamentos de tensão na máquina assíncrona dependem de vários elementos, como a magnitude e duração do afundamento, os parâmetros elétricos da máquina, a carga e inércia mecânica do motor, variação do ângulo de fase da tensão, entre outros. Logo, os efeitos dos afundamentos de tensão impactam na eficiência do MIT, pois ocorrem perdas de velocidade durante o afundamento e picos de conjugado e de corrente no instante inicial e final da queda de tensão (Llerena, 2006).

#### 2.4.3 Cintilação – *flicker*

“A flutuação de tensão ou efeito *flicker* é um fenômeno caracterizado pela variação aleatória, repetitiva ou esporádica, do valor eficaz ou de pico da tensão instantânea.” (PRODIST, 2021). Segundo Paulillo e Teixeira, a flutuação de tensão pode ser causada por diversas fontes, como cargas de comutação, cargas de arco, variações de corrente de carga, entre outras.

Cargas industriais que exibem variações contínuas e rápidas na magnitude da corrente de carga podem causar variações na tensão que são frequentemente referidas como *flicker* ou oscilação. Dos itens de avaliação da qualidade da tensão, o efeito *flicker* apresenta destacada importância, uma vez que pesquisas mostram que seus principais efeitos se manifestam sobre as pessoas na forma de incômodo visual, irritação, perda de concentração e, nos casos extremos, sob a forma de problemas neurológicos. (Paulillo; Teixeira, pag. 36, 2010).

Segundo a Eletrobrás, 2004, o *flicker* é uma oscilação visual percebida por pessoas expostas a luzes que apresentam flutuações na sua intensidade. Isso ocorre porque a retina do olho humano é sensível às mudanças rápidas de

intensidade luminosa. Quando a variação de tensão da rede elétrica é percebida como variação de brilho da lâmpada, pode causar desconforto visual. Os principais efeitos nos sistemas elétricos, resultados das flutuações de tensão, são:

- Oscilações de potência e torque das máquinas elétricas;
- Queda de rendimento dos equipamentos elétricos;
- Interferência nos sistemas de proteção;
- Efeito *flicker* ou cintilação luminosa.

Para avaliar o *flicker*, é utilizado a severidade de flutuação de tensão de curta duração ( $P_{st}$ ), que é uma medida ponderada no tempo da percepção subjetiva de cintilação em função da frequência da oscilação de tensão. A norma IEC 61000-4-15 estabelece limites para o  $P_{st}$  em diferentes situações de aplicação para iluminação, a fim de evitar o desconforto visual e garantir a segurança e o conforto dos usuários.

Na Tabela 6 é resumida a terminologia aplicável às formulações de cálculo de sensação luminosa, com a identificação da grandeza e simbologia.

Tabela 6: Terminologia da sensação luminosa

Identificação da Grandeza	Símbolo
Severidade de Flutuação de Tensão de Curta Duração	$P_{st}$
Severidade de Flutuação de Tensão de Longa Duração	$P_{lt}$
Valor do indicador $P_{st}$ que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas	Pst95%

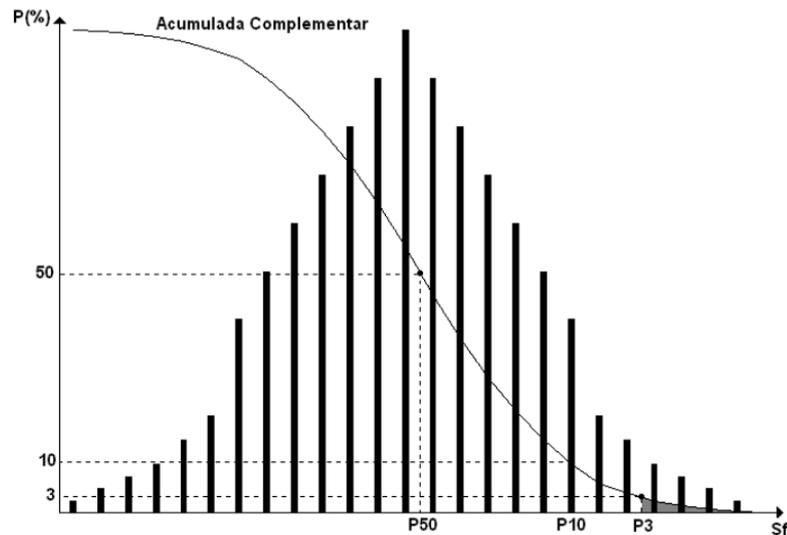
Fonte: Adaptado de IEC 61000-4-15.

A expressão para o cálculo da Severidade de Flutuação de Tensão de Curta Duração ( $P_{st}$ ) é dada pela Equação 19:

$$P_{st} = \sqrt{0,0314P_{0,1} + 0,0525P_1 + 0,0657P_3 + 0,28P_{10} + 0,08P_{50}} \quad (19)$$

Onde  $P_i$  ( $i = 0,1; 1; 3; 10; 50$ ) corresponde ao nível de flutuação de tensão que foi ultrapassado durante  $i$  % do tempo, obtido a partir da função de distribuição acumulada complementar, como é mostrado na Figura 12, de acordo com a IEC 61000-4-15. *Flickermeter – Functional and Design Specifications*.

Figura 12: Distribuição acumulada complementar da sensação de cintilação



De forma complementar, o  $P_{lt}$  refere-se a um valor representativo de doze amostras consecutivas de  $P_{st}$ , e é dado pela seguinte Equação 20:

$$P_{lt} = \sqrt{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} (P_{sti})^3} \quad (20)$$

A  $P_{st}$  representa a severidade dos níveis de cintilação luminosa associados à flutuação de tensão verificada num período contínuo de 10 (dez) minutos. Da mesma forma, a  $P_{lt}$  representa a severidade dos níveis de cintilação luminosa associados à flutuação de tensão verificada num período contínuo de 2 (duas) horas (ANEEL, 2017).

Do ponto de vista do rendimento do MIT, quando a tensão da rede elétrica oscila, podem correr flutuações na corrente elétrica que alimenta os motores. Essas flutuações resultam em variações na velocidade de rotação e no torque do motor, o que pode levar a um aumento no consumo de energia e a uma redução na eficiência operacional do MIT. Além disso, o *flicker* pode provocar o aquecimento excessivo do motor, aumentando o desgaste dos componentes e reduzindo a vida útil do equipamento. Essas variações de tensão são frequentemente causadas pela partida direta de muitos MITs em um curto intervalo de tempo, o que sobrecarrega a rede elétrica e gera instabilidade (Bollen, 2000).

#### 2.4.4 Transientes

Os transientes e outros distúrbios de forma de onda são indicadores de qualidade de energia que se referem a variações temporárias e repentinas na forma de onda da tensão ou corrente elétrica. Esses distúrbios transientes podem ser causados por diversas fontes, como comutação de cargas, descargas elétricas atmosféricas, falhas de equipamentos, contato de galhos de árvores com linhas de energia, entre outros (Ribeiro, 2015).

Segundo Paulillo, 2013, a duração de um transiente geralmente é muito pequena, mas de grande importância, uma vez que submetem equipamentos a grandes solicitações de tensão e/ou corrente que impactam especialmente na eficiência dos MITs, reduzindo sua vida útil e elevando o consumo elétrico dessas máquinas, em especial para motores de grande porte. Existem dois tipos de transientes: os impulsivos, causados por descargas atmosféricas, e os oscilatórios, causados por chaveamentos de cargas indutivas ou capacitivas. Os efeitos desses distúrbios podem ser atenuados com filtros ativos ou passivos, supressores. Esses distúrbios podem ser evitados com filtros supressores de surtos e transformadores isolados.

#### 2.4.5 Sub e sobretensão

A partida de um motor elétrico pode solicitar o sistema de maneira severa, causando perturbações prejudiciais à instalação. Em alguns casos, é necessário realizar um acionamento simultâneo, de dois ou mais motores, o que agrava ainda mais as condições de sistema de suprimento (Mamede, 2012).

Subtensões e sobretensões referem-se a qualquer variação na tensão elétrica 10% abaixo ou 10% acima do valor nominal, respectivamente, que persista por mais de três minutos. Esses distúrbios podem ser causados por sobrecargas em equipamentos e condutores, flutuações de grandes cargas, transformadores mal ajustados, condutores desenergizados ou defeituosos, e conexões elétricas inadequadas (Bollen, 2000).

Bollen complementa que as subtensões podem resultar em um desempenho ineficiente dos motores de indução trifásicos (MITs), causando aumento no consumo de corrente, aquecimento excessivo e redução da vida útil

do motor. Sobretensões, por outro lado, podem levar ao isolamento elétrico e ao desgaste prematuro dos componentes do motor, além de aumentar o risco de falhas catastróficas.

Em relação à eficiência dos MITs, Paulillo, 2013, observa que distúrbios de tensão podem provocar uma redução na velocidade do motor e operações inadequadas, resultando na diminuição da vida útil do equipamento. A correta regulação da tensão é, portanto, fundamental para assegurar a eficiência e a longevidade dos MITs.

#### 2.4.6 Desequilíbrios de tensão

“O desequilíbrio de tensão é o fenômeno caracterizado por qualquer diferença verificada nas amplitudes entre as três tensões de fase de um determinado sistema trifásico, e/ou na defasagem elétrica de 120° entre as tensões de fase do mesmo sistema.” (PRODIST, 2017).

As características de desempenho de um motor de indução trifásico dependem de um conjunto de grandezas eletromecânicas e térmicas, que definem o comportamento operacional sob determinadas condições. Dessa maneira, quando as tensões de alimentação apresentam desequilíbrios, seja em módulo ou em ângulo, ocorrem alterações nas características térmicas, elétricas e mecânicas dos motores de indução, afetando o seu desempenho e comprometendo a sua vida útil (Paulillo, 2013).

Os desequilíbrios de tensão ocorrem por diversas razões, dentre as quais se podem citar a utilização de cargas monofásicas distribuídas de forma desigual entre as três fases, impedâncias assimétricas de transformadores e de linhas de transmissão, motores elétricos com impedâncias desequilibradas, bancos de capacitores assimétricos, entre outros (Nascimento, 2016).

Para quantificar o desequilíbrio de tensão, adotam-se os seguintes indicadores, conforme a Tabela 7 do PRODIST:

Tabela 7: Terminologia para o cálculo de desequilíbrio de tensão.

<b>Identificação da grandeza</b>	<b>Símbolo</b>
Fator de desequilíbrio de tensão	FD
Magnitude da tensão eficaz de sequência negativa – frequência fundamental	$V_-$

Magnitude da tensão eficaz de sequência positiva – frequência fundamental	$V_+$
Magnitudes das tensões eficazes de linha – frequência fundamental	$V_{ab}, V_{bc}, \text{ e } V_{ca}$
Fator de desequilíbrio de tensão que supera 5% das leituras válidas, em janelas de 1008 medições	FD95%

Fonte: Adaptado de PRODIST, 2021

A expressão para o cálculo de desequilíbrio da tensão é dada pela Equação 21.

$$FD (\%) = \frac{V_-}{V_+} \times 100 \quad (21)$$

Segundo o PRODIST, pode-se utilizar a Equação 21, ou de forma alternativa a Equação 22.

$$FD(\%) = 100 \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (22)$$

Onde  $\beta$  é dado pela Equação 23.

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad (23)$$

Os motores trifásicos de corrente alternada devem estar aptos para operar em um sistema de tensões trifásicas com uma componente de sequência negativa que não exceda 1 % da componente de sequência positiva, durante um período prolongado, ou 1,5 % durante um período curto, não superior a alguns minutos, e uma componente de sequência zero que não exceda 1 % da componente de sequência positiva (ABNT NBR 17094-1, 2018).

Quando as tensões de linha aplicadas aos motores de indução apresentam esses tipos de variações, a primeira consequência é a deformação do campo magnético girante. Neste caso, é inevitável a produção de esforços mecânicos axiais e radiais sobre o eixo, com o aparecimento de vibrações, ruídos, batimento, desgaste e o aquecimento excessivo dos mancais em consequência de correntes parasitas que podem aparecer no sistema eixo-mancais-terra (Paulillo, pag. 46, 2013).

A deformação do campo magnético girante resulta da composição dos campos de sequência positiva e negativa. Quando uma dessas componentes possui amplitude ou frequência diferente uma da outra, ocorre um desequilíbrio magnético no motor (Paulillo, 2013). Consequentemente, a elevação de temperatura do motor operando com uma determinada carga e sob determinado desequilíbrio magnético, resulta em superaquecimento do motor devido ao

excesso de efeito Joule nos enrolamentos, e conseqüentemente a perda de eficiência da máquina e a diminuição da sua vida útil.

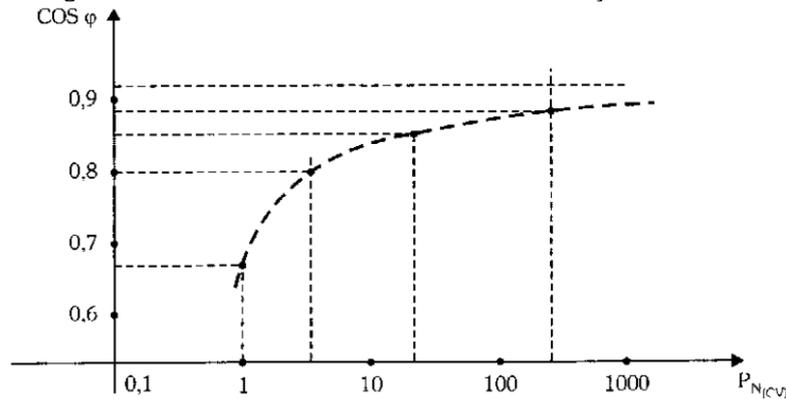
Estudos indicam que um pequeno desequilíbrio de 3,5% na tensão pode aumentar as perdas do motor de indução trifásico em até 20%. Um desequilíbrio de 5% ou mais pode rapidamente danificar o motor. De acordo com a norma NBR 7097/1996, é necessário aplicar fatores de redução na potência disponível no eixo de motores categoria N quando alimentados por tensões desequilibradas, para evitar que a elevação da temperatura admissível seja excedida. Para outras categorias, recomenda-se consultar o fabricante (ELETROBRÁS, 2004).

Segundo a Eletrobrás (2004), variações na amplitude da tensão afetam diretamente a eficiência e o fator de potência dos motores elétricos. Normalmente, esses motores são projetados para suportar variações de até 10% acima ou abaixo da tensão nominal. Pequenas variações, entre 1% e 2%, também são prejudiciais, pois aumentam o consumo de energia e reduzem a vida útil do motor devido ao aquecimento gerado pelas perdas internas. Portanto, a rede deve ser monitorada regularmente e desequilíbrios na tensão superiores a 1% devem ser corrigidos.

#### 2.4.7 O Fator de Potência (FP)

“Assim como qualquer carga ligada a rede elétrica, os motores de indução trifásicos possuem fator de potência característico. A tendência do fator de potência é ser maior à medida que a potência nominal da máquina aumenta.” (Franchi, pag. 105, 2008). Essa relação usualmente segue o padrão apresentado no gráfico da Figura 13.

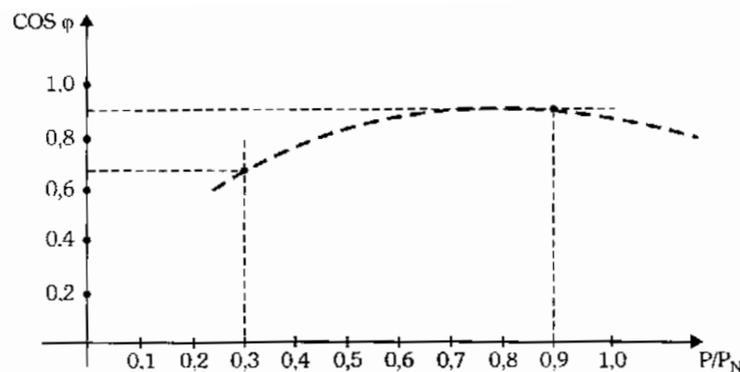
Figura 13: Curva de Fator de Potência em relação a Potência nominal



Fonte: Franchi, 2008

À medida que se aplica carga ao rotor da máquina, a corrente da armadura aumenta e a defasagem entre a tensão aplicada nos terminais e a corrente que circula na armadura diminui. Logo, conforme a carga no motor é elevada o FP aumenta, como pode ser visto no gráfico da Figura 14 (Franchi, 2008).

Figura 14: Curva do FP em relação a Potência solicitada ao rotor



Fonte: Franchi, 2008

Franchi, 2008, conclui que o fator de potência tende a aumentar com o acréscimo da carga no eixo do rotor, até 90% da carga nominal, onde é alcançado o limite de capacidade. Os motores de indução pequenos tendem a ter um fator de potência mais baixo do que motores maiores quando operam no mesmo nível de carga. Isso se deve principalmente à maior proporção relativa de corrente de magnetização necessária em motores menores, que não contribui para o trabalho útil e, assim, reduz o fator de potência.

#### 2.4.8 Variação de frequência

“O sistema de distribuição e as instalações de geração conectadas a ele devem, em condições normais de operação e regime permanente, operar dentro dos limites de frequência, situados entre 59,9 Hz e 60,1 Hz”. (PRODIST, 2017).

Segundo o Órgão Nacional do Sistema Elétrico – ONS, responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional - SIN, basicamente existem 2 indicadores de variação de frequência, que são o Desempenho da Frequência em Regime Permanente – DFP e Desempenho da Frequência Durante Distúrbios – DFD.

O DFP tem o objetivo de avaliar a capacidade e a eficiência do SIN em responder às demandas do sistema elétrico, tais como variações de carga, variações de geração e mudanças de topologia da rede, mantendo a frequência dentro dos limites pré-estabelecidos. O percentual de DFP contabilizado em intervalos de 10 (dez) minutos, calculado conforme a Equação 24.

$$DFP(\%) = \left(1 - \frac{n}{144}\right) \times 100 \quad (24)$$

Em que  $n$  é o número de intervalos de 10 (dez) minutos, considerando um total de 144 intervalos diários, nos quais a integral do módulo do desvio de frequência,  $A$ , foi superior a 0,4 Hz.min, que pode ser calculado através da Equação 25.

$$A = \int |\Delta f(t)| \times dt \quad (25)$$

Onde:

$A$  = Integral do módulo do desvio da frequência a cada 10 minutos em Hz.min;

$\Delta f$  = Desvio de frequência =  $f - f_0$ ;

$t$  = Tempo (minutos).

As variações de frequência durante distúrbios são desconsideradas para cálculo do indicador DFP. A integral do módulo do desvio de frequência calculada nos 10 (dez) minutos coincidirem com o início do distúrbio. Não é considerada para cálculo do indicador DFP, se o valor calculado for superior a 1,0 Hz.min.

Nesse caso o número de intervalos de 10 (dez) minutos utilizado na fórmula acima é substituído por 144, subtraído do número de intervalos em que tenham ocorrido distúrbios que satisfaçam as condições anteriores, ao longo do dia. (ONS, 2010).

O segundo indicador de desempenho da frequência é o DFD. O DFD corresponde a uma avaliação qualitativa do desempenho da frequência durante distúrbios. Em função do atendimento aos limites estabelecidos na Tabela 8, considerando os valores apurados no período de 1 (um) ano, o indicador DFD permite classificar o desempenho qualitativo da frequência como adequado ou não.

Tabela 8: Limites para avaliação qualitativa do desempenho da frequência durante distúrbios, em janela de 1 ano.

<b>Desempenho</b>	<b>Tempo acumulado máximo de exposição a desvios de frequência (s)</b>
$f > 66,0$ Hz	0
$63,5$ Hz $< f \leq 66,0$ Hz	30
$62,5$ Hz $< f \leq 63,5$ Hz	150
$60,5$ Hz $\leq f < 62,0$ Hz	270
$58,5$ Hz $\leq f < 59,5$ Hz	390
$57,5$ Hz $\leq f < 58,5$ Hz	45
$56,5$ Hz $\leq f < 57,5$ Hz	15
$f < 56,5$ Hz	0

Fonte: ONS, 2010

Complementarmente, o PRODIST denota que, havendo necessidade de corte de geração ou de carga, para permitir a recuperação do equilíbrio carga-geração, durante os distúrbios no sistema de distribuição, a frequência:

- a) não pode exceder 66 Hz ou ser inferior a 56,5 Hz em condições extremas;
- b) pode permanecer acima de 62 Hz por no máximo 30 (trinta) segundos e acima de 63,5 Hz por no máximo 10 (dez) segundos;
- c) pode permanecer abaixo de 58,5 Hz por no máximo 10 (dez) segundos e abaixo de 57,5 Hz por no máximo 05 (cinco) segundos.

A variação de frequência da rede não influencia na eficiência energética dos MITs, desde que os outros indicadores de qualidade de energia sejam satisfeitos.

## 2.5 Influência da temperatura ambiente na eficiência de MITs

A temperatura ambiente pode afetar significativamente a eficiência energética dos motores de indução trifásicos (MIT), uma vez que a temperatura está ligada ao desempenho do motor. Quando a temperatura ambiente é elevada, a eficiência energética do motor diminui, pois, a eficiência da troca de calor da máquina fica prejudicada, elevando as perdas por efeito joule. Por outro lado, quando a temperatura ambiente é baixa, próxima à temperatura nominal de operação, a eficiência do motor aumenta devido às perdas por efeito Joule no enrolamento do estator e nos enrolamentos do rotor serem menores (Bulgarelli, 2006).

Segundo o guia de especificações da WEG, para analisar a viabilidade do uso de um motor em uma determinada aplicação, deve-se levar em consideração alguns parâmetros, entre os quais os principais são a altitude em que o motor será instalado e a temperatura do meio refrigerante.

Usualmente, o meio refrigerante é o próprio ar ambiente, pois requer uma tecnologia menos avançada, e que é apropriada na maioria das aplicações. Conforme a NBR 17094-1, a condição usual de serviço no meio refrigerante não deve ultrapassar a temperatura de 40 °C e não deve ser inferior a -15 °C para qualquer máquina, exceto em máquinas com:

- a) potência nominal superior a 3,3 kW/rpm;
- b) potência nominal inferior a 600 W;
- c) mancal de deslizamento;
- d) água como fluido refrigerante primário ou secundário.

A temperatura do ar ambiente no local de funcionamento para as máquinas com pelo menos uma das características citadas (nos itens a, b, c e d) não pode ser inferior a 0 °C. Os motores que trabalham em temperatura abaixo da mínima (-15 °C), tendem a apresentar os seguintes problemas, segundo o Guia de especificação fornecido pela WEG:

- Excessiva condensação, exigindo drenagem adicional ou instalação de resistência de aquecimento, caso o motor fique longos períodos parado.

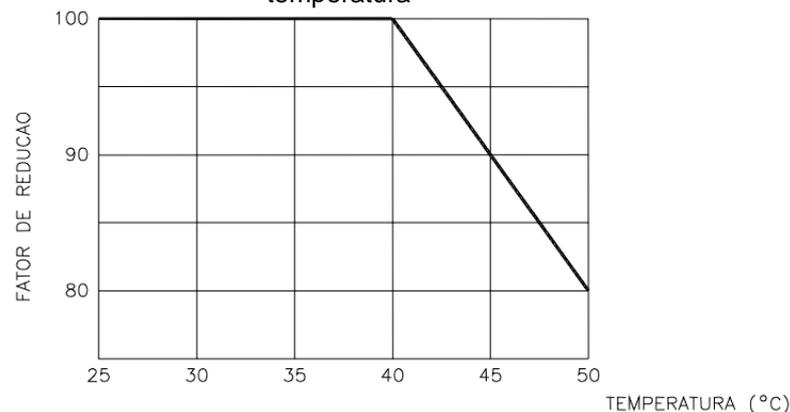
- Formação de gelo nos mancais, provocando endurecimento das graxas ou lubrificantes nos mancais, exigindo o emprego de lubrificantes especiais ou graxa anticongelante.

Em motores que operam a temperaturas ambientes superiores a 40 °C, o enrolamento pode atingir temperaturas prejudiciais à isolação. Este fato tem que ser compensado por um projeto especial do motor, usando materiais isolantes especiais ou sobredimensionamento do motor.

Quando a máquina opera com temperatura ambiente igual ou superior a 40 °C, ocorre uma redução no limite da potência nominal que a máquina pode desenvolver. Em geral, máquinas elétricas como motores, transformadores, inversores e *softstarters* tendem a perder eficiência energética quando operam em temperaturas elevadas. Nesses casos, também ocorre uma redução da potência máxima disponível, visando garantir a operação segura do equipamento.

Esse comportamento é ilustrado em um documento fornecido pela WEG, que trata da eficiência energética em aplicações de motores elétricos. Nele, é apresentada uma curva que demonstra o fator de redução de potência em função do aumento da temperatura, conforme observado no gráfico da Figura 15. O Fator de redução encontrado com base nos testes realizados pela fabricante é de, aproximadamente, de 2% a cada °C, depois dos 40 °C.

Figura 15: Curva de redução de potência nominal em função do aumento da temperatura



Fonte: Módulo 06, WEG, 2002

Além disso, a temperatura pode influenciar na resistência de isolamento no motor. A resistência de isolamento da maioria dos materiais varia inversamente com a temperatura. Por isso, a norma NBR 17094-3 propõe uma

correção no valor medido da resistência para temperatura de 40 °C, conforme o gráfico da Figura 16, para a determinação correta na resistência do isolamento, dada pela Equação 26:

$$R_{40^{\circ}\text{C}} = K_{t\ 40^{\circ}\text{C}} \times R_t \quad (26)$$

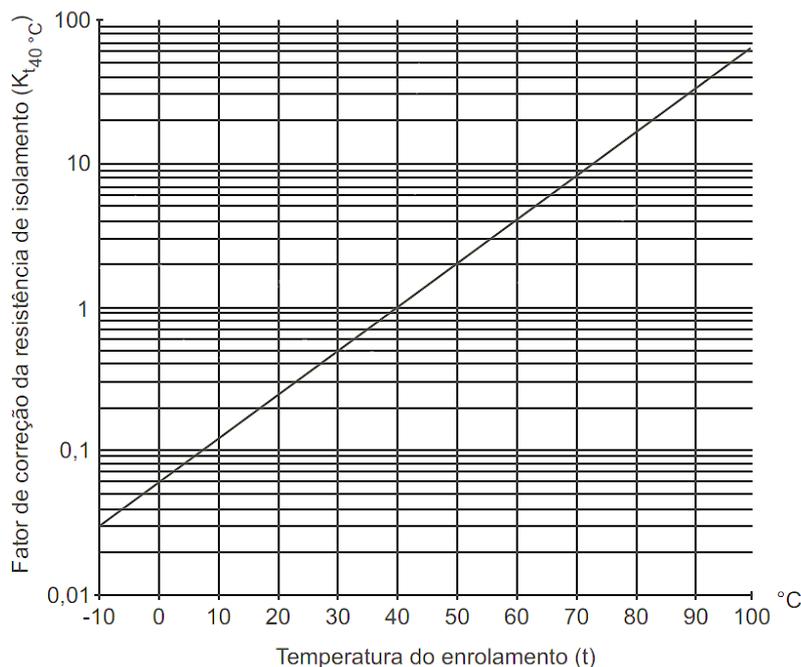
Onde:

$R_{40^{\circ}\text{C}}$  = resistência de isolamento corrigida a 40 °C, expressa em (M $\Omega$ );

$K_{t\ 40^{\circ}\text{C}}$  = fator de correção da resistência de isolamento na temperatura t a 40 °C, figura (20);

$R_t$  = resistência de isolamento medida à temperatura t, expressa em (M $\Omega$ );

Figura 16: Variação aproximada da resistência de isolamento com a temperatura em máquinas girantes.



Fonte: Adaptado de NBR 17094-3, 2018

Segundo Gieras, 2020, a redução da potência nominal permitida em motores de indução trifásicos (MITs) tem um impacto direto na sua eficiência energética. Essa alteração no valor máximo de FP pode ser influenciada por outros fatores, como a temperatura ambiente.

Estudos mostram que a temperatura ambiente elevada pode causar uma redução na eficiência da troca de calor da bobina e, conseqüentemente, reduzir a eficiência energética dos motores. Isso ocorre porque motores operando em

temperaturas mais altas necessitam dissipar mais calor, o que pode levar a um desempenho menos eficiente e a uma diminuição do fator de potência. Assim, é essencial considerar a interação entre a redução da potência nominal e as condições ambientais, para garantir uma operação eficiente dos MITs (Gieras, 2020).

Dessa forma, observa-se que a temperatura é um parâmetro importante e deve ser levada em consideração nos projetos de dimensionamento dos MITs, seleção do regime de serviço, entre outros, para determinar qual máquina ser utilizada, dependendo da necessidade da aplicação. (Bulgarelli, 2006).

### **3 ESTUDO APLICADO**

Neste capítulo são descritas as metodologias adotadas para realizar um estudo aplicado, por meio de ensaios, para avaliar a influência da temperatura ambiente, métodos de partida e regimes de carga na eficiência energética dos Motores de Indução Trifásicos.

Em um ambiente controlado, foram realizados ensaios laboratoriais com o objetivo de verificar a influência da temperatura ambiente na eficiência energética. Esses ensaios consideraram condições de operação e foram fundamentais para entender como a variação de temperatura pode afetar o desempenho do motor.

Devido às limitações de tempo de simulação, optou-se por trabalhar com dinâmicas de operação por regime de carga, em vez de regime de serviço. O regime de carga refere-se ao padrão de ciclos periódicos de aplicação de carga no eixo do motor, mantendo sempre a máquina ligada, enquanto o regime de serviço também pode englobar ciclos de acionamentos e desligamento periódicos da máquina.

Posteriormente, investigam-se os efeitos de três diferentes regimes de carga, com o motor operando sob variações específicas de carga por períodos determinados. Isso permite observar como o MIT se comporta sob diferentes condições de trabalho e identificar a relação dessas condições com a eficiência energética.

Por fim, conduz-se um ensaio comparativo entre a partida direta, partida estrela-triângulo e a partida com inversor, explorando neste último diferentes tempos de aceleração e desaceleração do MIT. Este teste visa identificar qual método de partida proporciona melhor eficiência energética e menores impactos sobre a operação do motor.

#### **3.1 Materiais**

Para realizar os ensaios, além do MIT, são utilizados um freio eletromagnético, para simular as cargas dos diferentes regimes de carga, lâmpadas incandescentes para alterar a temperatura na periferia da carcaça do

motor, inversor de frequência para realizar partidas com diferentes rampas de aceleração e desaceleração. Além disso, equipamentos para medições elétricas e temperatura, como osciloscópio, voltímetros, amperímetro, termômetro e os contadores para realização da partida estrela-triângulo. Os equipamentos selecionados foram:

- Motor de Indução Trifásico A (especificações na Tabela 09);
- Motor de Indução Trifásico B (especificações na Tabela 09);
- Cabos de conexão;
- Fonte de alimentação regulável trifásica (0 a 380 Vca);
- Fonte de alimentação regulável monofásica (0 a 250 Vca);
- Multímetro digital (Fabricante: Minimapa, Modelo: ET-2082E);
- Freio eletromagnético de 0 a 10 N.m (Freio de *Foucaut*);
- Osciloscópio Digital (Fabricante: Tektronix, Modelo: TBS 1152B);
- Inversor de frequência (Fabricante: WEG, Modelo: CFW100);
- Lâmpadas incandescentes de 60 W;
- Termostato (Fabricante: Minimapa, Modelo: ET-2082E);
- Tacômetro digital (Fabricante: VICTOR, Modelo: DM6236P);
- Disjuntor motor trifásico de 4-6 A;
- Disjuntor monopolar de 6 A;
- Contadores Tripolar 2NA + 2NF;
- Botões Pulsadores 1NF + 1NF;
- Relé Temporizador (Fabricante: Clip, Modelo: CLE);

As especificações nominais dos motores utilizados nos ensaios contidas na Tabela 9.

Tabela 9: Especificação nominal dos MITs utilizados nos ensaios

<b>Especificação</b>	<b>Motor A</b>	<b>Motor B</b>
Numero de polos	4	4
Tensão de Alimentação	220/380 V	220/380 V
Corrente	2,10/1,22 A	1,11/0,64 A
Potência	1,5 cv	0,25 cv
Frequencia	60 Hz	60 Hz
Velocidade de rotação	1760 RPM	1695 RPM
Máximo fator de potência	0,69	0,68
Rendimento	67%	64%

Fonte: Autor, 2024

A escolha e a utilização cuidadosa desses dispositivos são essenciais para assegurar a confiabilidade dos dados medidos.

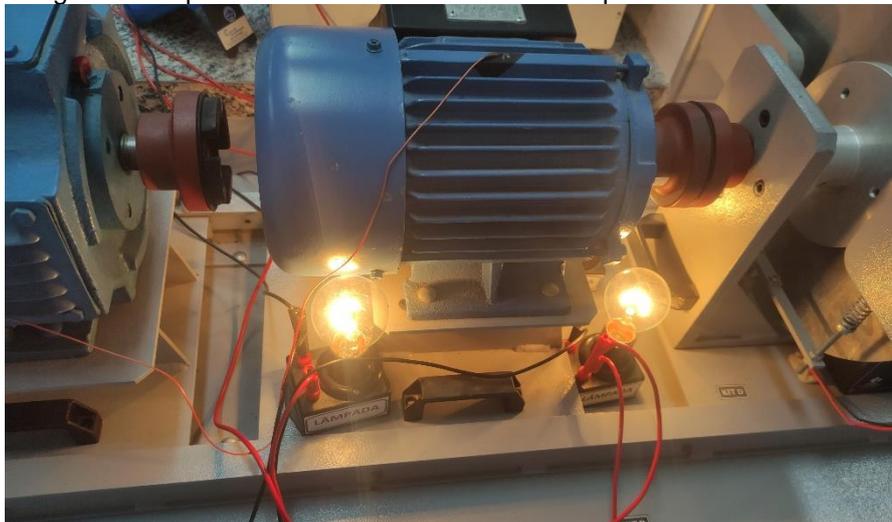
### 3.2 Metodologia aplicada aos ensaios

Dentre os equipamentos utilizados nos ensaios, incluíram dois MITs. As especificações técnicas de cada um desses motores estão listadas na Tabela 9. As duas máquinas são configuradas para fechamento em estrela, operando com uma tensão de linha de 380 Vca, na partida direta.

O Motor A foi utilizado para determinar a influência da temperatura ambiente e do regime de carga na eficiência do MIT, enquanto o Motor B foi necessário devido a uma limitação do inversor de frequência disponível para os ensaios, que não tem potência suficiente para acionar o Motor A de forma adequada. Dessa forma, o Motor B permitiu a análise da influência de diferentes métodos de partida, garantindo a viabilidade dos ensaios.

Foram utilizadas quatro lâmpadas incandescentes, posicionadas equidistantes, para controlar a temperatura ao redor do motor, monitorada por um termostato. A elevação da temperatura é obtida através da elevação da tensão de alimentação das lâmpadas, gerando mais calor, conforme mostrado na Figura 17. Para evitar a dissipação desse calor e garantir a eficácia da simulação, foi utilizada uma caixa de papelão, que ajuda a reter o calor no ambiente de teste.

Figura 17: Aquecimento do MIT através das lâmpadas incandescentes.



Fonte: Autor, 2024

Utilizou-se o freio magnético, conforme mostrado na Figura 18, para simular a carga do eixo da máquina, permitindo acrescentar cargas a partir da elevação da tensão de excitação da bobina, de 0 a 190 Vcc, que corresponde a uma variação linear de torque, de 0 a 10 N.m no eixo do motor.

Um osciloscópio digital foi utilizado para registrar a corrente demandadas pelo MIT, de modo a permitir o cálculo da energia total consumida durante as simulações.

Figura 18: Freio Ferromagnético utilizado nos ensaios para regime de carga



Fonte: Autor, 2024

O osciloscópio utilizado é do tipo digital, com uma largura de banda de 150 MHz e até 2 GB/s de taxa de amostragem, pode ser observado na Figura 19. As aquisições são realizadas sempre em janelas de 25 segundos (s), tempo necessário para análise de todos os ensaios a serem realizados.

Figura 19: Ocisoscópio para aquisição de dados para análise dos ensaios



Fonte: Autor, 2024

Durante esse período, foram registrados 2500 valores, correspondendo à quantidade de amostras do osciloscópio que foi requisitada para análise. Realiza-se a integração da corrente de linha no tempo, ao longo da janela de aquisição, para se contabilizar a energia consumida. Considera-se que as máquinas operam sempre em equilíbrio de fase e, portanto, a aquisição da corrente de apenas uma das linhas é suficiente para realizar o estudo comparativo de eficiência energética destas, o que envolve a aplicação de integração numérica no intervalo de tempo correspondente a aquisição de dados.

Para alcançar maior representatividade estatística, para cada influência a ser avaliada foram realizados 5 ensaios idênticos. O período de amostra é levado em consideração nos cálculos de integral para obter o consumo de corrente durante cada teste dos respectivos ensaios.

Para o cálculo da eficiência, é necessário calcular o trabalho realizado por energia total consumida. Se o ensaio foi realizado com carga aplicada no eixo, essa carga também deve ser considerada, pois é determinante para a análise da eficiência do MIT, já que a carga no eixo define o trabalho realizado pela máquina (torque x deslocamento angular).

Outro parâmetro importante é a potência dos motores utilizados nos ensaios. Conforme indicado na Tabela 09, o motor A possui uma potência de 1,5 cv, enquanto o motor B tem uma potência de apenas 0,25 cv, sendo assim seis vezes menor. Para assegurar uma comparação justa entre os resultados, é necessário ajustar os valores de energia consumida do motor B, multiplicando-os por 6, de modo a equilibrar as diferenças de potência entre os motores.

Para calcular o Consumo Normalizado (CN), expresso em miliampere por volt (mA/V), do motor operando a vazio, utiliza-se a Equação 27.

$$CN_{vazio} = \frac{C}{A_T} \quad (27)$$

Onde:

$C$ : consumo, em A x h;

$A_T$ : integral da tensão aplicada, no tempo.

Quando há aplicação de carga no eixo do MIT, utiliza-se a Equação 28, onde o CN, expresso em A/V.m.h, considera a carga aplicada como parâmetro fundamental.

$$CN_{carga} = \frac{C}{A_T \times A_c} \quad (28)$$

Onde:

$C$ : consumo, em A x h;

$A_T$ : integral da tensão aplicada, no tempo;

$A_c$ : integral da carga, em N.m, no tempo.

Para garantir uma comparação justa entre diferentes condições de operação, foi estabelecida a Métrica de Eficiência Energética (MEE), que leva em conta variáveis como o percentual de tempo em que o motor está acionado ou parado, além das diferenças de potência do MIT. Essa métrica permite uma análise mais precisa e equilibrada, facilitando a avaliação das diversas situações de operação.

Com intuito de realizar uma comparação justa das eficiências energéticas entre os diferentes tipos de influência, definiu-se uma métrica, chamada de Métrica de Eficiência Energética (MEE), que considera o Consumo de Energia Normalizado em cada teste feito ( $CN_n$ ), conforme o cálculo apresentado na Equação 29.

$$MEE_{Ensaio} = CN_{max} - CN_n \quad (29)$$

Onde:

$CN_{max}$ : maior valor de Consumo Energético Normalizado teórico, baseado nos resultados obtidos em todos os ensaios;

$CN_n$ : Consumo Energético Normalizado do teste em questão;

$n$ : testes realizados em cada ensaio, (1) para Temperatura ambiente, (2) para Regime de Carga e (3) para Métodos de Acionamento.

Após a realização dos ensaios, verificou-se que o maior valor de CN alcançado foi de 1,447. Optou-se por adotar o Consumo Normalizado Máximo,  $CN_{max}$ , como 1,5. Com base nesse parâmetro, a MEE pode ser determinada

conforme mostrado na Equação 29, para todos os ensaios realizados neste trabalho.

Com a metodologia de ensaio estabelecida para a aquisição dos dados, torna-se possível realizar uma análise comparativa eficaz. O primeiro ensaio foca na medição da energia consumida e na avaliação da eficiência do motor sob diferentes temperaturas ambiente, mantendo uma carga constante no eixo da máquina.

### 3.2.1 Ensaio 1: Influência da temperatura ambiente na eficiência no MIT

No primeiro ensaio, busca-se avaliar o impacto da temperatura ambiente na eficiência do MIT. Para isso, optou-se por avaliar a eficiência energética do motor operando em ambientes com temperatura que variam de 10 em 10 graus. Para essa análise, a temperatura na periferia da carcaça do motor foi ajustada para 20, 30, 40 e 50 °C.

Para aferição de temperatura, utiliza-se um termostato posicionado em contato com a aleta central superior da máquina. É fundamental que essa posição seja a mesma em todos os ensaios de temperatura, para evitar imprecisões ou comparações injustas nos testes.

A temperatura de 20 °C é alcançada com o auxílio de um ar-condicionado, e para as temperaturas mais elevadas, de 30, 40 e 50°C, são alcançadas através do ajuste de corrente de alimentação de 4 lâmpadas incandescentes de 60 W, posicionadas equidistantes entre si, a 4 cm da carcaça do motor. O conjunto motor/lâmpadas é coberto por uma caixa de papelão, como pode ser observada na Figura 20.

Figura 20: Aquecimento para o ensaio com temperatura mais elevada

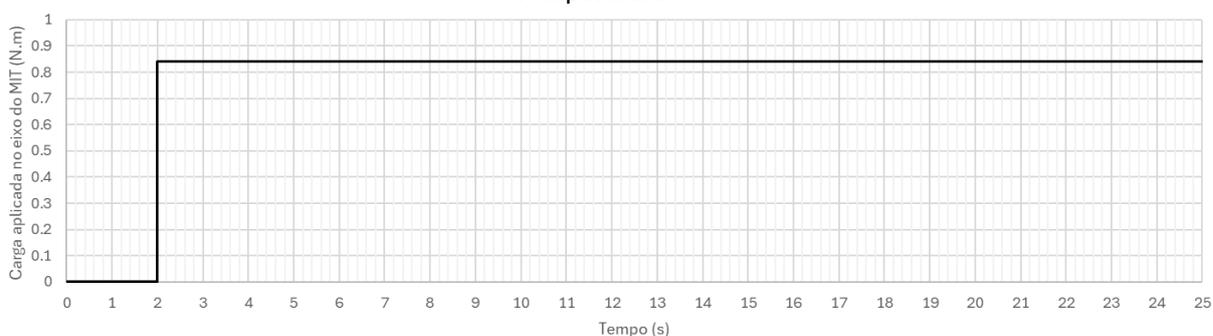


Fonte: Autor, 2024

Com o controle da temperatura na periferia da carcaça, é possível realizar o ensaio da influência da temperatura ambiente na eficiência do MIT. É esperado que o consumo energético do motor aumente com a elevação da temperatura, principalmente depois que a temperatura ultrapassar temperatura a máxima permitida pelo fabricante, em condições normais de operação, que é de 44 °C, conforme indicado na placa de informações do motor.

É importante mencionar que se aguarda um intervalo de cerca de 5 minutos entre os ensaios, permitindo que a temperatura dentro da caixa alcance o equilíbrio térmico, evitando inconsistências nos resultados. Além disso, para melhorar a observação das diferenças de consumo, o motor foi operado com uma carga constante de 0,84 N.m (Newton x metro) no eixo, conforme é mostrado Figura 21.

Figura 21: Aplicação da Carga no Eixo do Motor – Ensaio da Influencia da Temperatura



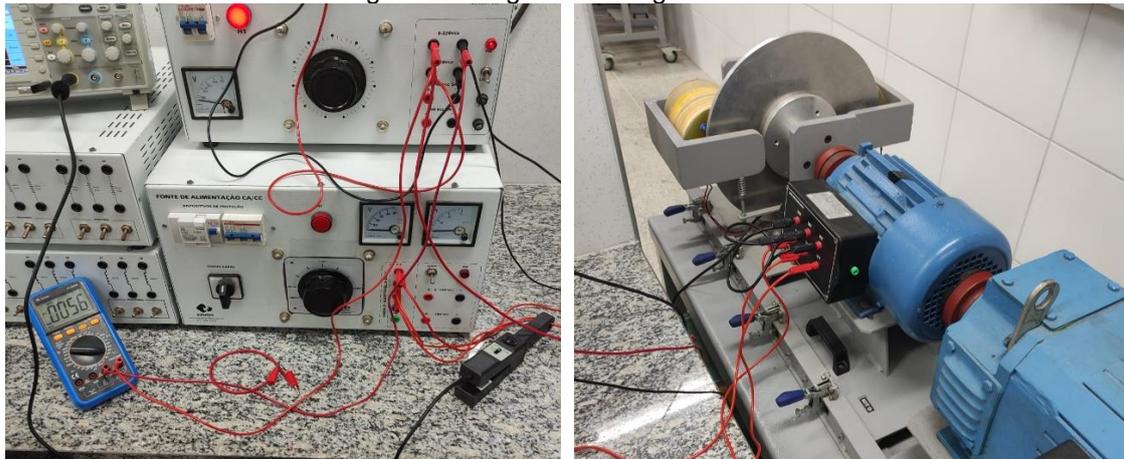
Fonte: Autor, 2024

Realiza-se todos os ensaios com a mesma condição de carga e pelo mesmo intervalo de tempo permite comparar a eficiência energética para os diferentes cenários, visto que o trabalho realizado pelo motor pode ser considerado o mesmo para todos os ensaios. A carga aplicada no eixo é feita por meio de um freio ferromagnético magnético, como explicado anteriormente.

### 3.2.2 Ensaio 2: Influência do regime de carga na eficiência no MIT

Nesta etapa, a metodologia adotada visa avaliar a influência do regime de carga na eficiência energética do MIT. A Figura 22 ilustra a montagem experimental realizada em laboratório, onde são conduzidas simulações e aquisições de dados específicos para essa análise. Os resultados obtidos serão comparados com os de outros testes, permitindo uma avaliação abrangente da eficiência sob diferentes condições de operação.

Figura 22: Regime de Carga no Eixo do Motor

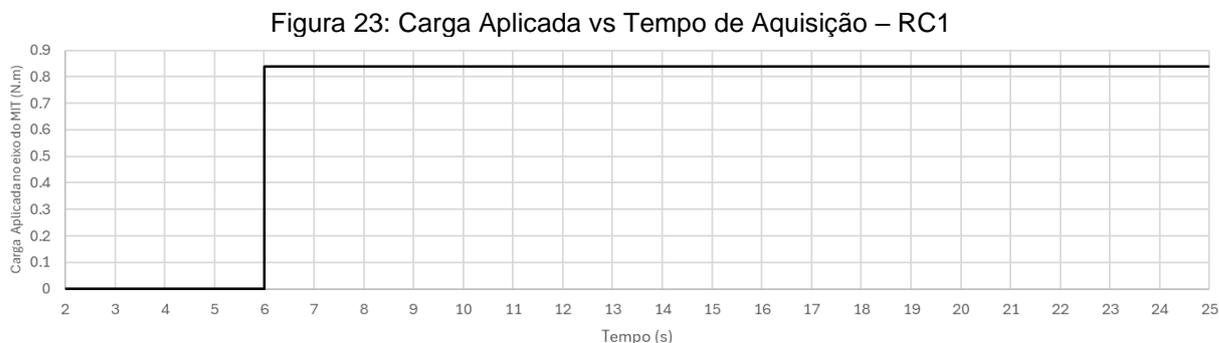


Fonte: Autor, 2024

Os regimes de carga escolhidos para as análises de eficiência do motor são: Regime de Carga1 (RG1), Regime de Carga 2 (RG2), Regime de Carga 3 (RG3). Realizam-se 5 testes para cada regime, para calcular a média da energia convertida em trabalho em cada um deles, para, a partir da Equação 29, para realizar o cálculo da do motor para cada regime de carga.

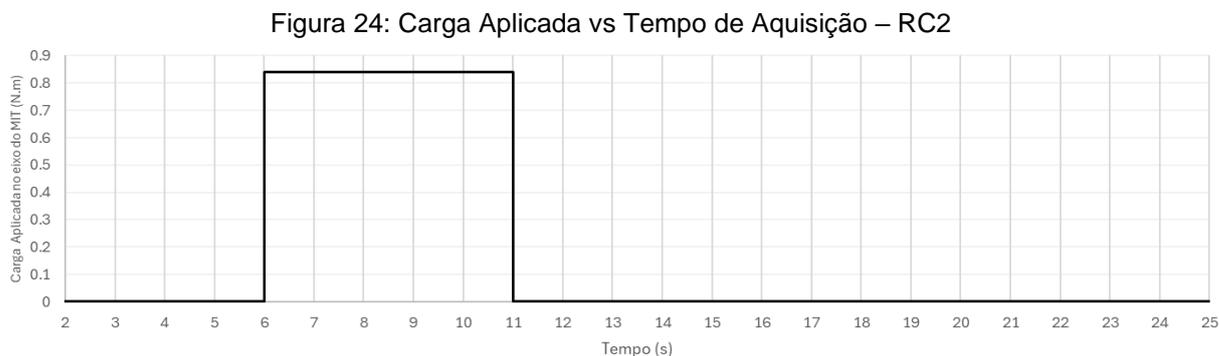
Para todos os regimes de carga, aplicou-se a carga nominal do motor, informada pela fabricante, utilizando-se o freio eletromagnético. Enfatiza-se que a carga é aplicada apenas depois de 6 segundos após o início da aquisição da corrente de linha do motor.

Para a simulação do Regime de Carga 1 (RC1), o motor é ligado e a carga é aplicada no eixo do motor. Essa carga é mantida constante a partir de 6 s até completar o 25 s de aquisição, tempo de amostra utilizado para análise, conforme é mostrado na Figura 23.



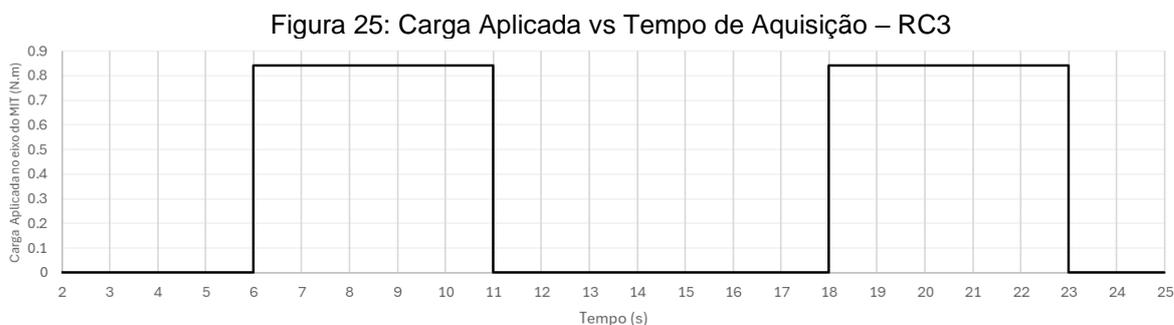
Fonte: Autor, 2024

No Regime de Carga 2 (RC2), O MIT é operado a vazio durante 4 segundos e em seguida a carga é aplicada por 5 segundos. Posteriormente a carga é removida e o eixo do motor é mantido sem carga até completar o período de amostragem de 25 s, conforme pode ser visto na Figura 24.



Fonte: Autor, 2024

Na última simulação, agora para o Regime de Carga 3 (RC3) que consiste em ciclos periódicos de 5 s com carga seguidos de 7 s sem carga, como pode ser observado na Figura 25.



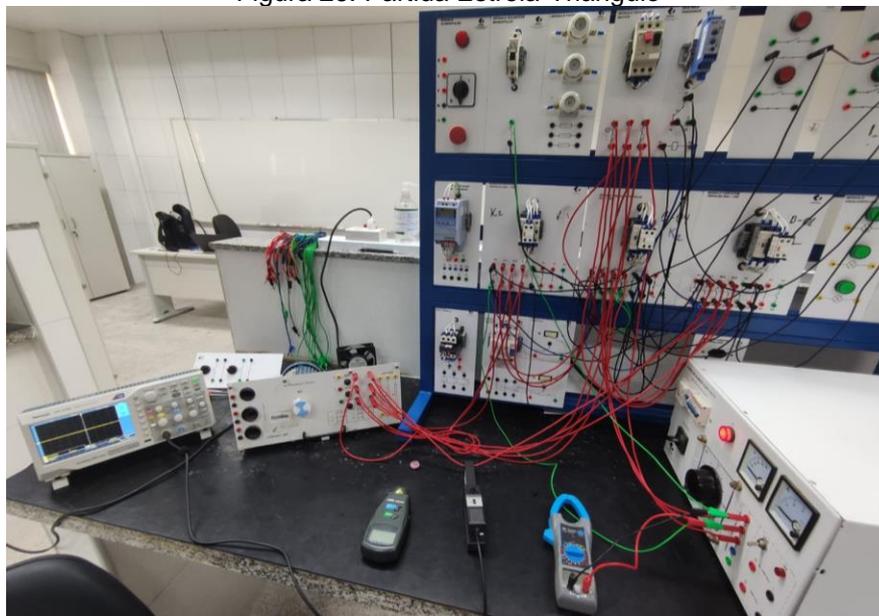
Fonte: Autor, 2024

Para garantir uma análise comparativa justa, é necessário ajustar o valor do consumo do motor obtido na janela de aquisição. Como no RC1 a carga é aplicada no eixo por um tempo maior, o consumo de energia é maior em comparação aos demais regimes de carga. A energia consumida em cada ensaio é normalizada pela integral de carga aplicada pelo tempo, como é mostrada na Equação 28, para se quantificar a eficiência energética. Desta forma se obtém valores referentes a eficiência energética do motor, e não ao consumo de energia.

### 3.2.3 Ensaio 3: Influência do método de acionamento no MIT

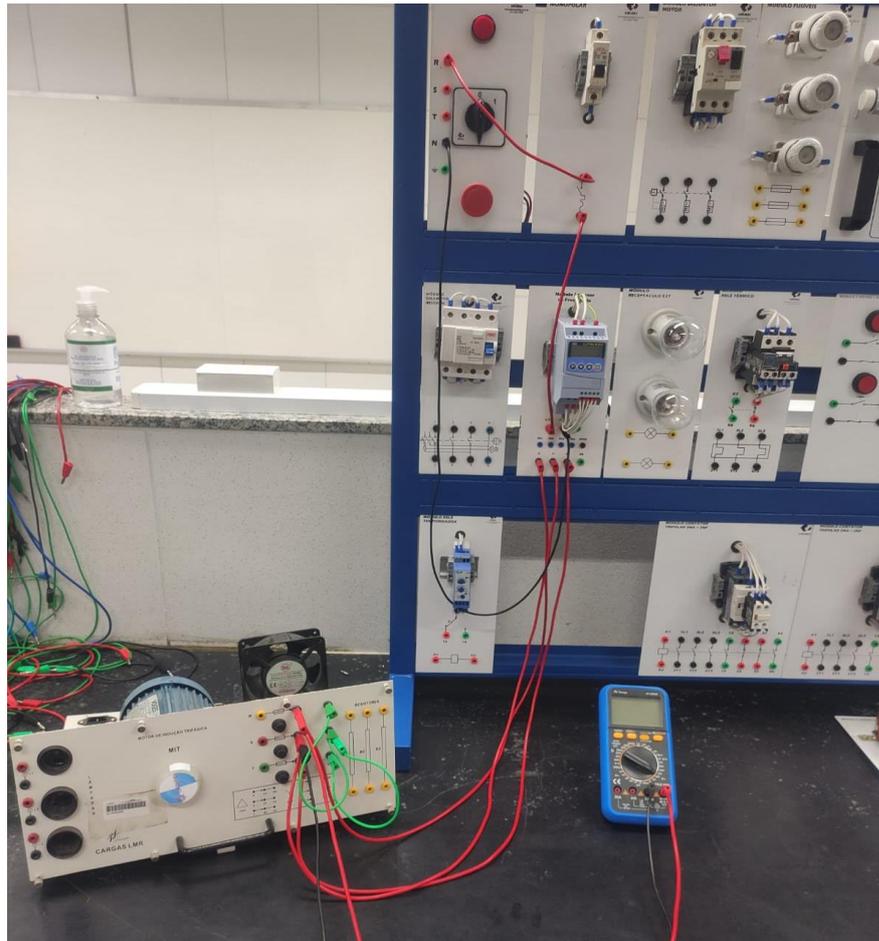
O terceiro tipo de ensaio aborda a influência do método de acionamento na eficiência dos motores de indução trifásicos, concentrando-se na comparação entre a partida direta, partida estrela-triângulo e a partida com o inversor de frequência, para diferentes configurações de rampa de subida e descida do motor. As fotos dos circuitos de comandos utilizados para implementar os métodos de partida são apresentadas nas Figuras 26 e 27.

Figura 26: Partida Estrela-Triângulo



Fonte: Próprio Autor

Figura 27: Circuito para o ensaio sobre a influência do método de acionamento na eficiência do MIT – Partida com Inversor

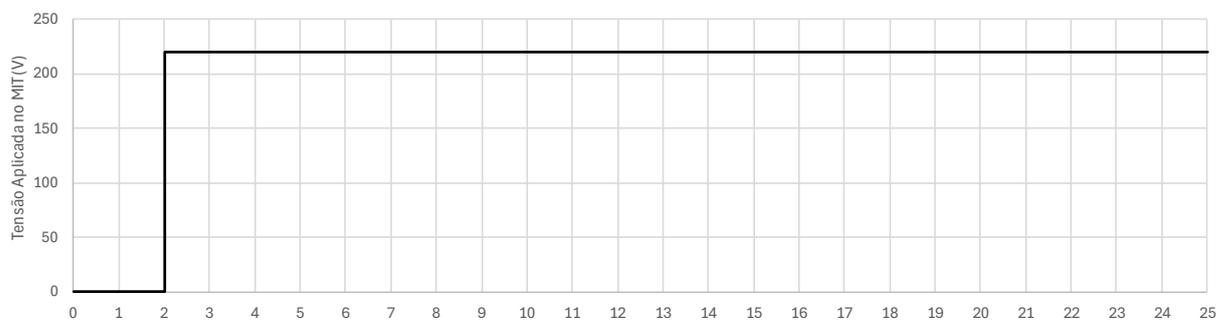


Fonte: Próprio Autor

Nestes ensaios não é aplicada carga no eixo do motor. A métrica adotada para a comparação da eficiência energética é normalizar a energia total consumida pelo motor pela área do gráfico de tensão aplicada ao MIT (em Volts) versus tempo (em segundos), como é mostrado na Equação 27.

Na Figura 28 é mostrado a tensão aplicada ao motor, ao longo do tempo, para o método de acionamento por partida direta.

Figura 28: Tensão Aplicada vs Tempo de Aquisição – Partida Direta

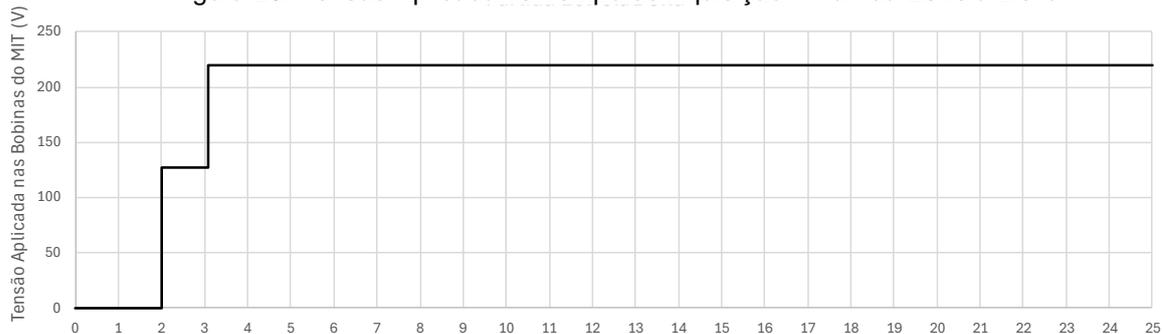


Fonte: Autor, 2024

A eficiência energética é medida levando em consideração a quantidade de energia consumida em relação ao trabalho realizado (trabalho = força x deslocamento). Para simplificar o cálculo, desconsidera-se a força desenvolvida no eixo do motor, já que não é possível medir essa força em tempo real, pois em todos os ensaios o motor gira a vazio. Portanto, considera-se que há uma proporcionalidade entre a integral da velocidade no tempo, que corresponde ao deslocamento angular total no intervalo de tempo considerado, e o trabalho realizado. Isso permite uma comparação mais justa da eficiência energética.

Para a partida estrela-triângulo, deve-se observar qual o tempo de comutação foi determinado com base no tempo em que o motor é acionado e chega na sua velocidade de rotação nominal, que é de 1,21 s. Como a comutação deve ser realizada com o passar de pelo menos 90% do tempo total de partida, optou-se por realizar a comutação de estrela para triângulo em 1,09s após o instante inicial da partida em estrela. Na Figura 29 pode se observar a variação da tensão aplicada sobre as bobinas do motor. Após a comutação para triângulo, o motor permanece ligado por 23 segundos, antes de ser desligado. Esse ciclo foi repetido cinco vezes, para se medir o consumo médio de energia durante esses 5 ensaios. Este valor médio é utilizado para o cálculo da métrica de eficiência energética.

Figura 29: Tensão Aplicada vs Tempo de Aquisição – Partida Estrela-Delta



Fonte: Autor, 2024

Nos ensaios seguintes, o motor é acionado através de um inversor, sendo aplicadas diferentes rampas de aceleração e desaceleração, seguindo os padrões apresentados nas Figuras 30, 31, 32, 33, 34 e 35.

Os valores de tempo das rampas de aceleração e desaceleração aplicados ao motor, de modo que as áreas dos gráficos de tensão em função do tempo ( $V \times t$ ) permaneçam iguais, estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10: Configuração das rampas por meio do inversor de frequência

Variações	Tempo do Motor Ligado (s)	Tempo Rampa de Subida (s)	Tempo Rampa de Descida (s)
Ensaio 1	18,5	1	2
Ensaio 2	19	2	3
Ensaio 3	20	4	5

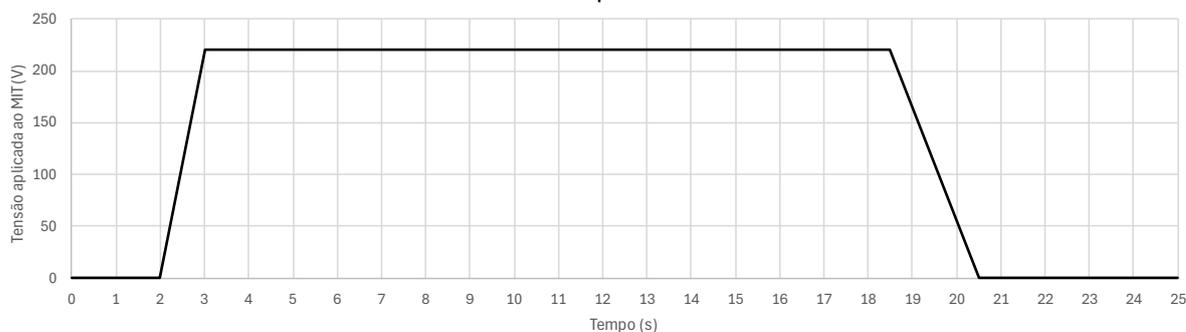
Fonte: Autor, 2024

O objetivo de imprimir acelerações e desacelerações mais ou menos severas é avaliar a influência dessas condições de operação na eficiência energética do motor. Os inversores de frequência e *softstarters* nunca alcançam 100% de eficiência, o que contribui para uma ligeira redução na eficiência energética geral de operação dos motores.

No entanto, eles oferecem a vantagem de reduzir a corrente de partida, um fator que impacta significativamente a eficiência energética nos casos de partidas diretas, onde o pico de torque de partida é proporcionalmente menor que o pico de corrente. Essa redução da corrente de partida (e de parada) depende diretamente do tempo de rampa de aceleração e frenagem configurado nos dispositivos.

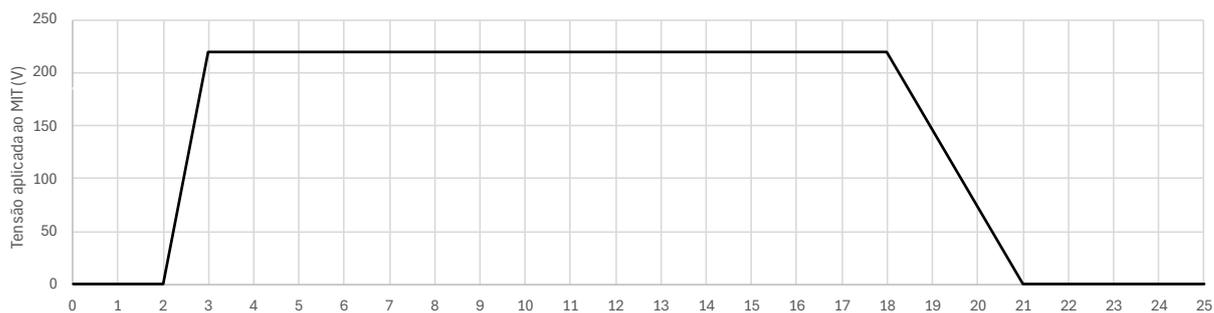
Assim, levanta-se a hipótese, a ser validada pelos ensaios deste trabalho, de que existe um tempo mínimo de aceleração e frenagem em que a redução do pico de corrente compensa a perda de eficiência inerente ao processamento de energia pelo inversor, tornando este método de partida mais eficiente do que a partida direta em termos de eficiência energética.

Figura 30: Tensão Aplicada vs Tempo de Aquisição – Partida com Inversor para Descida Rápida



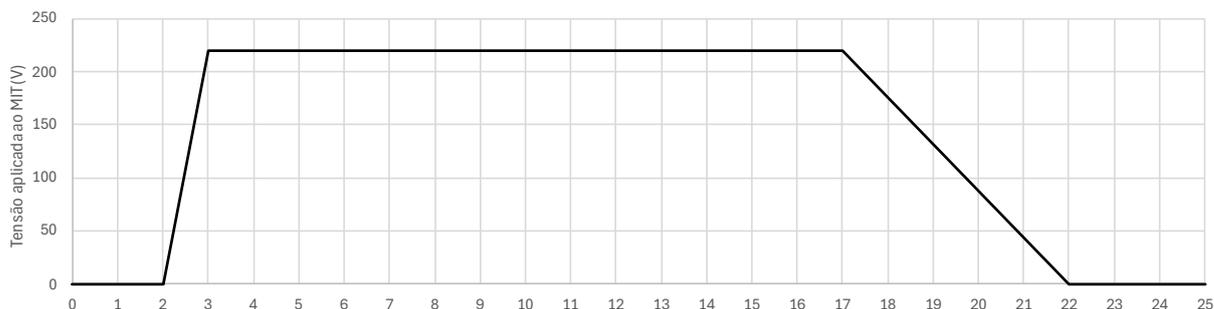
Fonte: Autor, 2024

Figura 31: Tensão Aplicada vs Tempo de Aquisição – Partida com Inversor para Descida Intermediária



Fonte: Autor, 2024

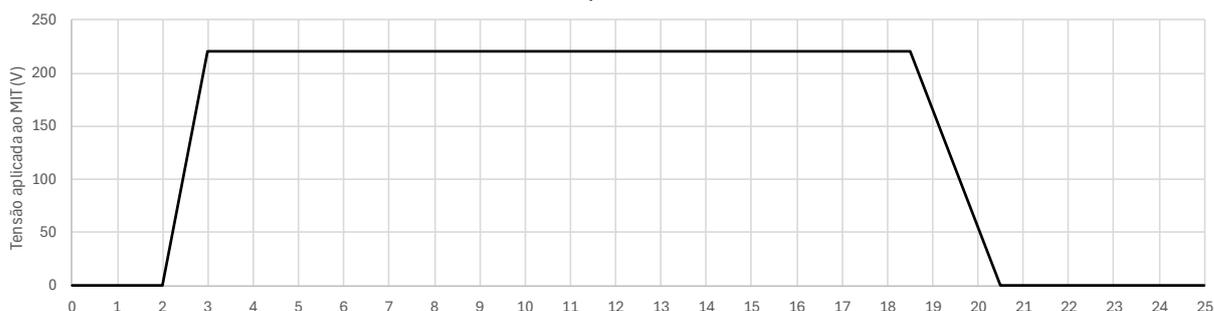
Figura 32: Tensão Aplicada vs Tempo de Aquisição – Partida com Inversor para Descida Lenta



Fonte: Autor, 2024

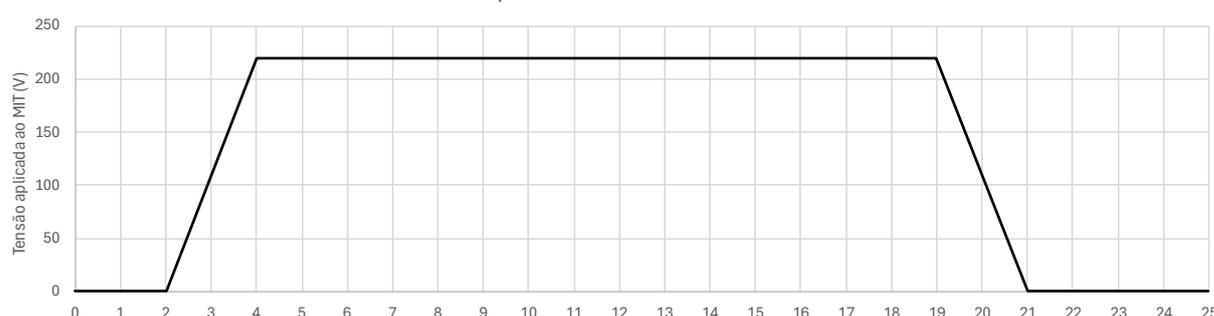
Nos gráficos das Figuras 33 a 35 são apresentadas a evolução da tensão aplicada ao motor ao longo do tempo nos ensaios onde se alteram apenas os tempos de rampa de desaceleração.

Figura 33: Tensão Aplicada vs Tempo de Aquisição – Partida com Inversor para Subida Rápida



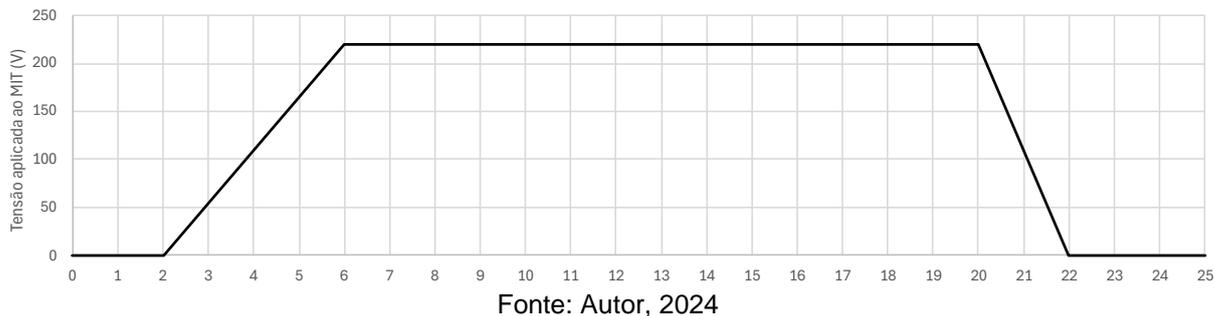
Fonte: Autor, 2024

Figura 34: Tensão Aplicada vs Tempo de Aquisição – Partida com Inversor para Subida Intermediária



Fonte: Autor, 2024

Figura 35: Tensão Aplicada vs Tempo de Aquisição – Partida com Inversor para Subida lenta



Optou-se por utilizar rampas de aceleração e desaceleração de modo que as áreas dos gráficos de tensão em função do tempo permanecessem constantes. Essa escolha foi feita para garantir uma comparação mais justa entre os diferentes cenários de operação, permitindo que as variáveis fossem analisadas de maneira equilibrada e consistente ao longo dos ensaios.

Portanto, com a metodologia e os procedimentos apresentados neste capítulo, é possível realizar os ensaios necessários para avaliar o impacto na eficiência dos MITs sob diferentes condições de operação, acionamento e regime. No capítulo seguinte, serão realizadas as análises e comparações com base nos resultados obtidos.

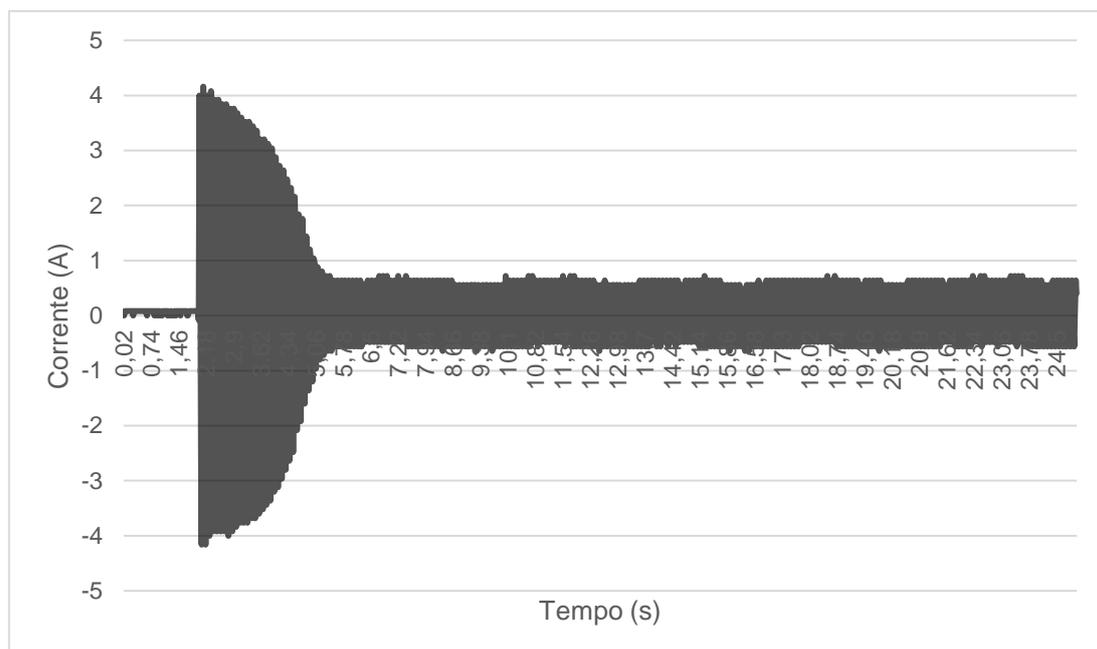
## 4 RESULTADOS

Nesse capítulo são apresentados os resultados obtidos após a realização dos ensaios descritos no capítulo anterior, assim como as respectivas análises destes. Para cada análise é considerado o valor médio do resultado de 5 ensaios consecutivos, que seguem sempre o mesmo protocolo, como forma de avaliar os resultados com maior relevância estatística.

### 4.1 Eficiência vs temperatura ambiente

Para a avaliação da influência da temperatura na eficiência dos MITs nota-se que os dados nominais fornecidos pelo fabricante consideram a operação da máquina em uma temperatura ambiente de 20°C, sendo esta, a temperatura de referência. Na Figura 36, observa-se o gráfico médio da corrente em ampere (A) pelo tempo em segundos (s) para o período de aquisição.

Figura 36: Gráfico da corrente média consumida no MIT - Temperatura de 20°C



Fonte: Autor, 2024

Nota-se que o gráfico apresenta-se coerente, tendo em vista que demonstra um pico de corrente RMS (*Root Mean Square*) acima dos 4 A, equivalente a 3,28 vezes a corrente nominal do MIT utilizado no ensaio. Após o transitório a corrente estabiliza em uma faixa de 0,4 a 0,6. Esse valor é inferior ao valor de placa, pois no ensaio o motor opera com carga no eixo menor que a

nominal. O consumo total energia para cada teste realizado, em ampere-hora são calculados conforme a equação 25.

O valor de interesse para este estudo é o valor do consumo de energia normalizado. Este é calculado a partir da divisão do consumo (Ah) pelo resultado da integração do valor da carga aplicada no eixo ao longo do tempo de ensaio. eixo da máquina, de acordo com a Figura 21 em N.m.s e o resultado da integral da tensão aplicada ao motor ao longo do tempo de ensaio. Os valores obtidos estão compilados na Tabela 11.

Tabela 11: Resumo dos testes realizados (Temperatura ambiente 20°C)

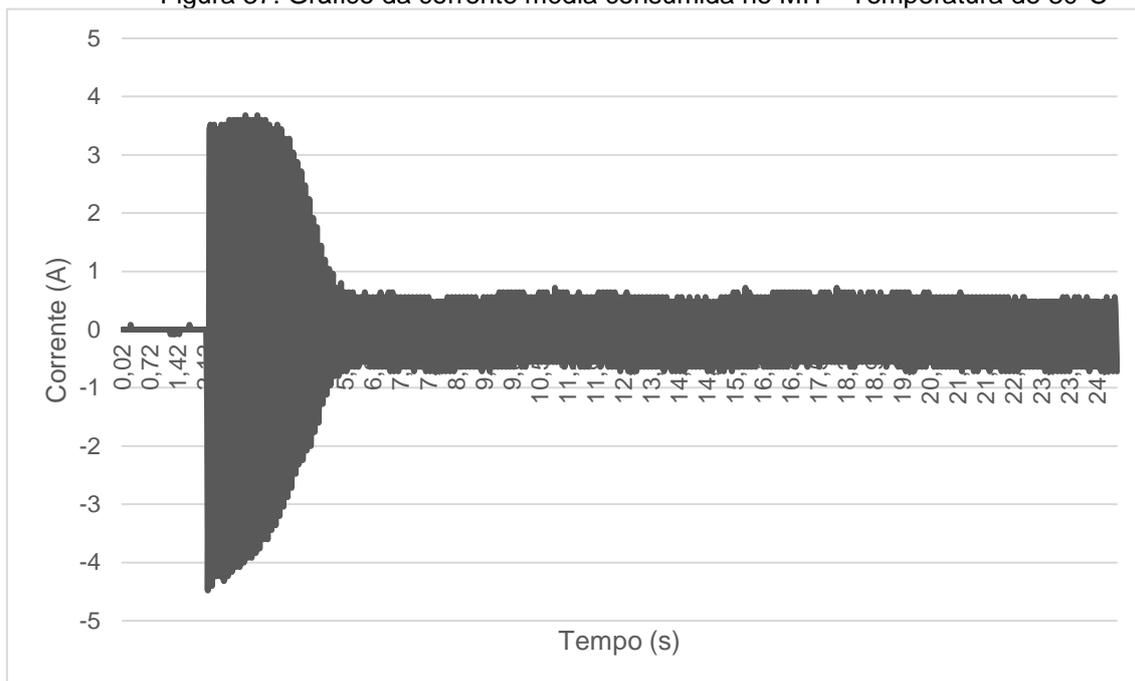
Ensaio	Temperatura do MIT (°C)	Energia Consumida no MIT (mAh)	CN do MIT (A/V.m.h)	MEE do MIT (A/V.m.h)
Ensaio 01	20,1	4,076	0,313	1,187
Ensaio 02	20,4	4,092	0,314	1,186
Ensaio 03	20,5	4,196	0,322	1,178
Ensaio 04	20,3	4,105	0,315	1,185
Ensaio 05	20,3	4,091	0,314	1,186
<b>Média</b>	<b>20,3</b>	<b>4,112</b>	<b>0,316</b>	<b>1,184</b>

Fonte: Autor, 2024

Com os dados obtidos e calculados, observa-se que CN médio da máquina foi de 0,316 A/V.m.h, enquanto o MEE foi de 1,184 A/V.m.h realizando ensaios de 23 segundos de operação do motor, cada. Como a temperatura ambiente é a mais baixa entre os ensaios realizados, espera-se que o CN da máquina seja menor dentre todos os ensaios dessa categoria, pois a troca de calor entre as bobinas de armadura e o ambiente é mais eficiente, o que deve melhorar o rendimento da máquina.

Para o ensaio com a temperatura ambiente 10°C acima da temperatura do ensaio anterior, espera-se um consumo energético ligeiramente maior. Como explicitada na seção 3.2.1, a temperatura ambiente máxima recomendada para operação do MIT pela fabricante é de 44°C, que é relativamente distante da temperatura desse ensaio. Logo, a energia normalizada média demandada pelo motor é praticamente a mesma do ensaio anterior. A evolução da corrente no tempo pode ser observada no gráfico da Figura 37.

Figura 37: Gráfico da corrente média consumida no MIT - Temperatura de 30°C



Fonte: Autor, 2024

Conforme o primeiro ensaio, observa-se um leve aumento no valor médio da energia consumida na Tabela 12, esse comportamento pode ser atribuído a elevação de temperatura ambiente.

Tabela 12: Resumo dos testes realizados (Temperatura ambiente 30°C)

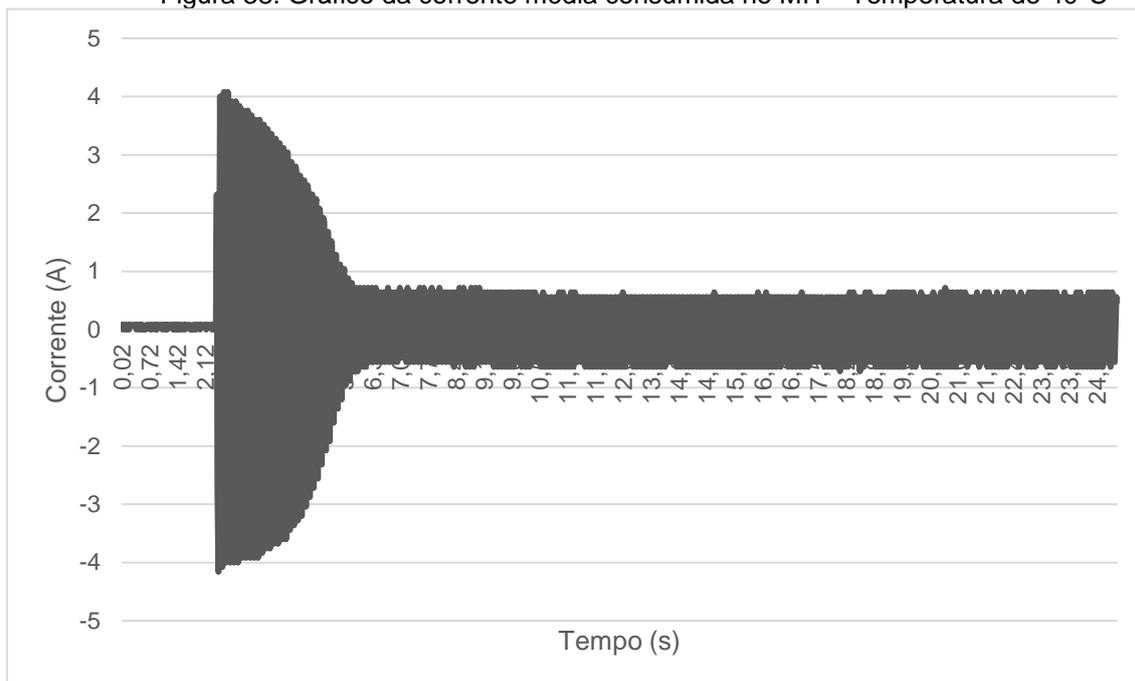
Ensaio	Temperatura do MIT (°C)	Energia Consumida no MIT (mAh)	CN do MIT (A/V.m.h)	MEE do MIT (A/V.m.h)
Ensaio 01	30,1	4,129	0,317	1,183
Ensaio 02	30,3	4,158	0,319	1,181
Ensaio 03	30,2	4,138	0,318	1,182
Ensaio 04	30,4	4,145	0,318	1,182
Ensaio 05	30,5	4,190	0,322	1,178
<b>Média</b>	<b>30,3</b>	<b>4,152</b>	<b>0,319</b>	<b>1,181</b>

Fonte: Autor, 2024

Nesta faixa de temperatura ambiente, a MEE, destacada na tabela, apresentou uma redução de cerca de 0,25%. Esse resultado é esperado, visto que a temperatura mais elevada do meio refrigerante compromete a troca térmica, porém, como ainda é abaixo da temperatura limite aconselhada pelo fabricante, essa influência não é significativa.

No ensaio subsequente, a temperatura ambiente foi elevada para 40°C, e o comportamento da corrente do motor está registrado no gráfico da Figura 38.

Figura 38: Gráfico da corrente média consumida no MIT - Temperatura de 40°C



Fonte: Autor, 2024

Nessa temperatura ambiente observa-se novamente um aumento da energia consumida pela máquina, representando um aumento no consumo energético normalizado da máquina. Os resultados do consumo de energia, CN e MEE estão apresentados na Tabela 13. Vale ressaltar que a temperatura de operação ainda está abaixo da temperatura máxima suportada pela máquina, logo, o sistema de resfriamento deve garantir uma troca de calor que preserve a vida útil da máquina, e, portanto, não se espera uma elevação considerável do consumo de energia.

Tabela 13: Resumo dos testes realizados (Temperatura ambiente 40°C)

Ensaio	Temperatura do MIT (°C)	Energia Consumida no MIT (mAh)	CN do MIT (A/V.m.h)	MEE do MIT (A/V.m.h)
Ensaio 01	40	4,190	0,322	1,178
Ensaio 02	40,1	4,286	0,329	1,171
Ensaio 03	40,3	4,129	0,317	1,183
Ensaio 04	40,2	4,220	0,324	1,176
Ensaio 05	40,4	4,077	0,313	1,187
<b>Média</b>	<b>40,2</b>	<b>4,180</b>	<b>0,321</b>	<b>1,179</b>

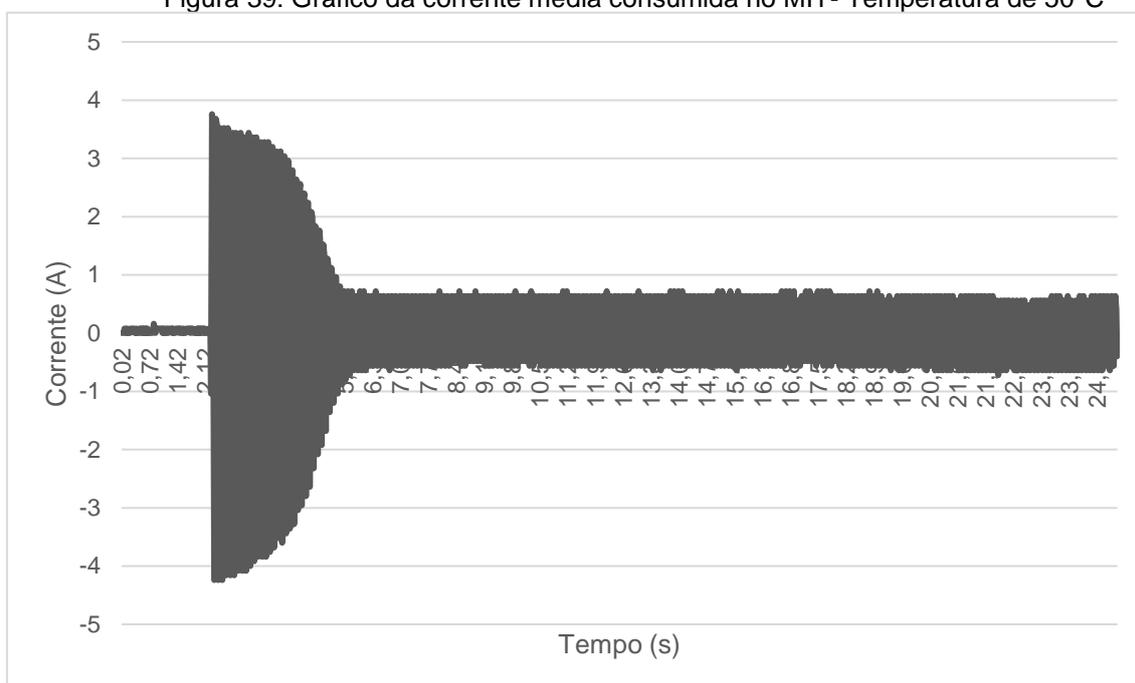
Fonte: Autor, 2023

Esse consumo normalizado representa uma diminuição de 0,42% do MEE em comparação ao ensaio realizado a uma temperatura ambiente de 20°C. Esses resultados são coerentes, uma vez que o aumento da temperatura ambiente reduz a capacidade de dissipação de calor, o que eleva as perdas internas do motor, principalmente nas bobinas e no núcleo. Conseqüentemente,

há um aumento no consumo energético e uma redução na eficiência, conforme previsto na literatura apresentada no Capítulo 2, porém ainda não significativo, visto que a temperatura ainda é segura para o motor, conforme informa o fabricante.

No ensaio final, realizado a uma temperatura ambiente de 50°C, verificou-se um aumento mais expressivo no consumo de energia pelo motor. Esse comportamento, conforme ilustrado na Figura 39 e detalhado na Tabela 14, reflete a crescente dificuldade na dissipação de calor e o impacto disto na performance térmica do motor.

Figura 39: Gráfico da corrente média consumida no MIT- Temperatura de 50°C



Fonte: Autor, 2024

Neste ensaio, o motor operou acima da temperatura máxima indicada pelo fabricante, o que resultou em perdas por efeito joule significativas devido à elevação da temperatura. O consumo energético e o índice de eficiência, obtidos nos cinco testes, estão registrados na Tabela 14, onde é possível observar claramente o impacto negativo das altas temperaturas no desempenho do motor.

Tabela 14: Resumo dos testes realizados (Temperatura ambiente 50°C)

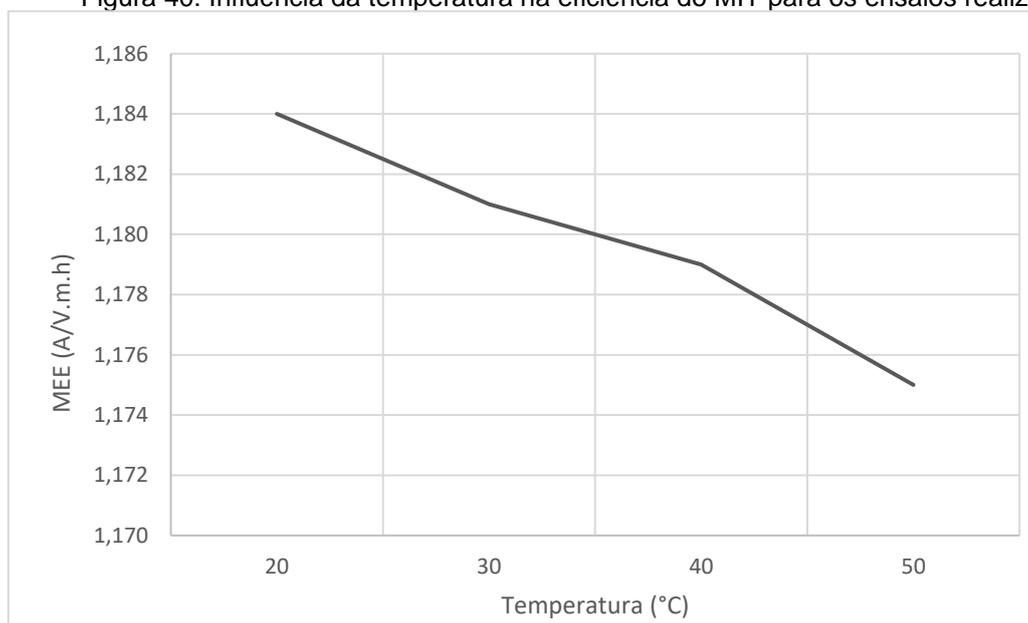
Ensaio	Temperatura do MIT (°C)	Energia Consumida no MIT (mAh)	CN do MIT (A/V.m.h)	MEE do MIT (A/V.m.h)
Ensaio 01	50,1	4,269	0,328	1,172
Ensaio 02	50,3	4,297	0,330	1,170
Ensaio 03	50,5	4,280	0,328	1,172
Ensaio 04	50,7	4,127	0,317	1,183

Ensaio 05	51	4,223	0,324	1,176
<b>Média</b>	<b>50,5</b>	<b>4,239</b>	<b>0,325</b>	<b>1,175</b>

Fonte: Autor, 2024

Para este ensaio, a energia média consumida pelo MIT foi de 4,239 mAh, o que representa uma elevação de 2,99% no consumo energético e uma queda de 0,76% na MEE em comparação ao primeiro ensaio. Esta elevação do consumo é significativa, o que é esperado, visto que o motor está operando acima da temperatura segura informado pelo fabricante. Os resultados para estes ensaios realizados para verificar a MEE da temperatura na eficiência do MIT estão compilados na tabela contida na Figura 40.

Figura 40: Influência da temperatura na eficiência do MIT para os ensaios realizados



Fonte: Autor, 2024

Ao concluir a análise da influência da temperatura ambiente na eficiência dos MITs, os dados obtidos ao longo dos ensaios evidenciam a relação direta entre a elevação da temperatura e o aumento no consumo energético da máquina. Observa-se que, à medida que a temperatura ambiente se elevava, o índice de influência na eficiência também aumenta, destacando a importância de manter um controle térmico adequado para otimizar o desempenho dos MITs.

Os resultados demonstraram coerência com a teoria, apresentada no Capítulo 2 deste trabalho, reforçando a necessidade de considerar a temperatura ambiente nos parâmetros operacionais e nos projetos de sistemas que utilizam MITs. Assim, pode-se concluir que a eficiência energética dos motores pode ser significativamente impactada pela temperatura, reforçando a relevância de

estratégias eficazes de gestão térmica para garantir um desempenho sustentável e eficiente dos sistemas industriais que utilizam esses motores.

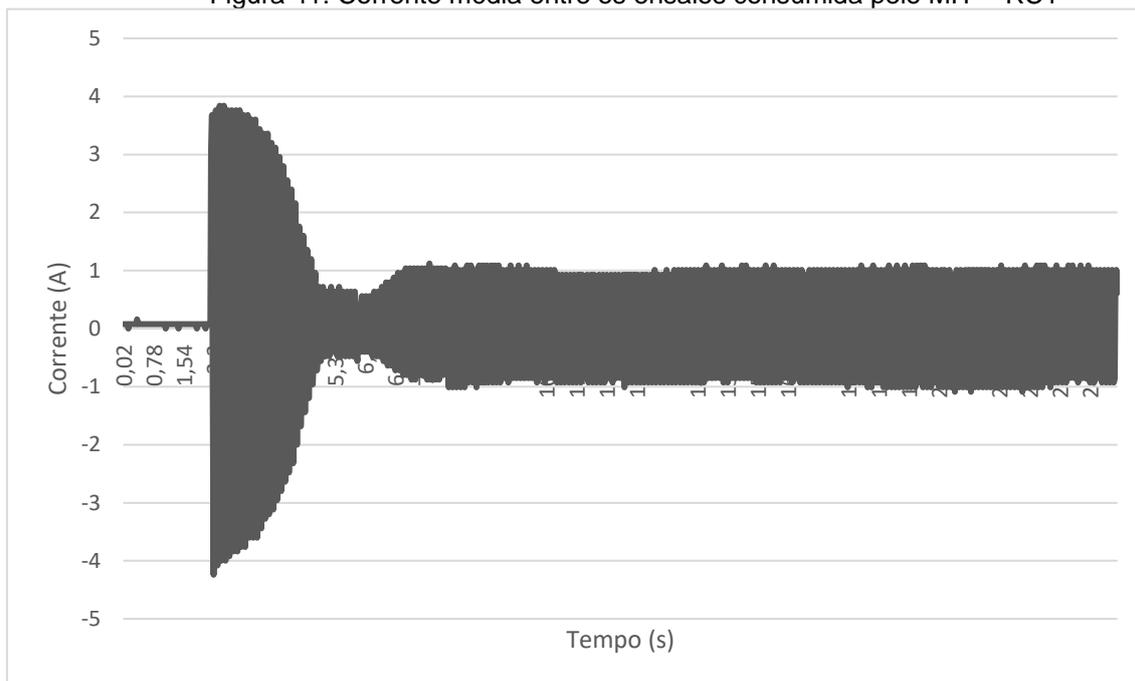
#### **4.2 Eficiência vs regime de carga**

Os diferentes regimes de carga impõem ao MIT condições específicas de sobrecarga transitória e refrigeração, pois provocam variações na carga do eixo e, conseqüentemente, na velocidade, em intervalos de tempo distintos. A severidade e a duração dos regimes transitórios, bem como a velocidade desenvolvida pela máquina e sua capacidade de refrigeração, influenciam diretamente no rendimento da máquina, conforme discutido no Capítulo 2 deste trabalho.

Os resultados apresentados nesta seção permitem entender como a dinâmica da aplicação de carga imposta à máquina, de acordo com os padrões de regime de carga já definidos anteriormente, influencia diretamente no rendimento e, conseqüentemente, na eficiência energética desses motores. A aplicação de apenas três regimes de carga se deve ao fato de que as cargas aplicadas neles são constantes, o que simplifica a execução e a observação de seu impacto na eficiência do motor.

Para verificar a influência da aplicação da carga no eixo do MIT na eficiência energética, seguem-se os critérios descritos na seção 3.2.2. Os dados de corrente média consumida nos ensaios são coletados para o primeiro regime de operação, o Regime de Carga 1 (RC1) e estão apresentados no gráfico da Figura 41.

Figura 41: Corrente média entre os ensaios consumida pelo MIT – RC1



Fonte: Autor, 2024

O comportamento do gráfico para o RC1 é semelhante ao observado no ensaio sobre a influência da temperatura, onde se aplica uma carga de 0,84 N.m no eixo do motor. Neste regime, não ocorrem interrupções na aplicação da carga durante o funcionamento do motor. Os resultados obtidos estão compilados na Tabela 15.

Tabela 15: Resumo dos testes realizados (Regime de Carga 1)

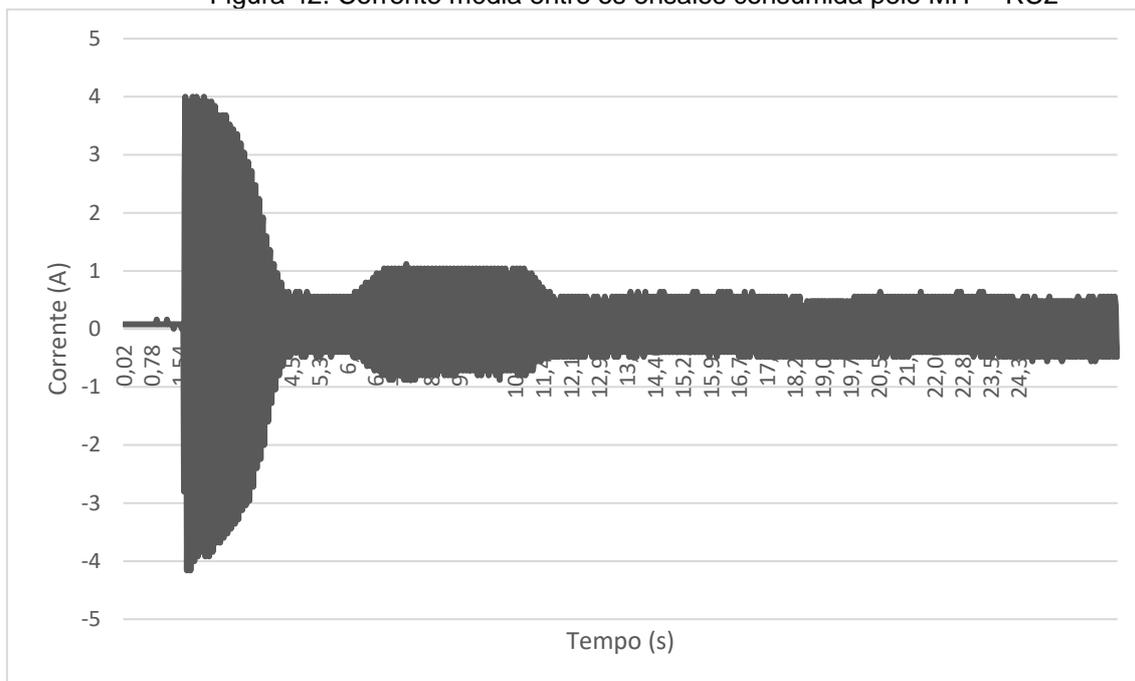
Ensaio	Energia Consumida no MIT (mAh)	IE do MIT (A/V.m.h)	MEE do MIT (A/V.m.h)
Ensaio 01	5,794	0,538	0,962
Ensaio 02	5,767	0,536	0,964
Ensaio 03	5,782	0,537	0,963
Ensaio 04	5,773	0,536	0,964
Ensaio 05	5,815	0,540	0,960
<b>Média</b>	<b>5,839</b>	<b>0,538</b>	<b>0,962</b>

Fonte: Autor, 2024

O valor médio do índice da MEE da máquina, obtido nesse ensaio, foi de 0,962 A/V.m.h. Esse resultado estabelece uma base de comparação para a avaliação da influência dos diferentes regimes de carga nos ensaios subsequentes. Nos próximos ensaios, espera-se uma redução no valor da MEE, dado que a carga de 0,84 N.m no eixo do motor é aplicada por um período mais curto. Isso sugere que o motor não opera por mais tempo em condição de menor fator de potência e menor rendimento.

No Regime de Carga 2 (RC2), onde a carga no eixo é aplicada por apenas 5 segundos, observa-se uma diferença significativa na MEE em comparação ao RC1. Essa variação é claramente observada no gráfico da Figura 42, que ilustra a corrente média consumida pelo MIT durante o ensaio para o RC2.

Figura 42: Corrente média entre os ensaios consumida pelo MIT – RC2



Fonte: Autor, 2024

Observa-se um aumento no consumo de energia durante o período em que a carga é aplicada à máquina. Após o desligamento do freio eletromagnético, a amplitude da corrente consumida reduz, conforme esperado. A Tabela 16 apresenta os valores relevantes para a análise, com destaque para a MEE.

Tabela 16: Resumo dos testes realizados – Regime de Carga 2)

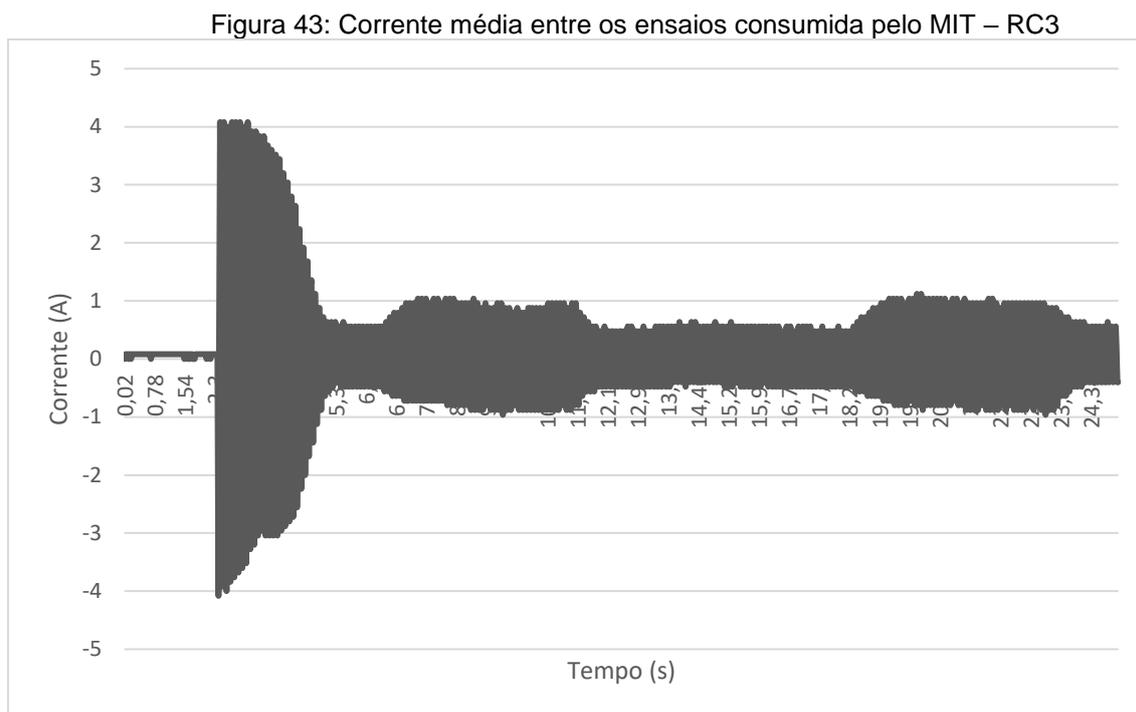
Ensaio	Energia Consumida no MIT (mAh)	CN do MIT (A/V.m.h)	MEE do MIT (A/V.m.h)
Ensaio 01	4,099	1,447	0,053
Ensaio 02	4,048	1,429	0,071
Ensaio 03	4,099	1,447	0,053
Ensaio 04	4,043	1,427	0,073
Ensaio 05	4,023	1,420	0,080
<b>Média</b>	<b>4,062</b>	<b>1,434</b>	<b>0,066</b>

Fonte: Autor, 2024

A MEE alcança apenas 0,066 A/V.m.h, representando uma redução de 93,14% em relação ao RC1. Isso ocorre devido ao curto período de aplicação da carga, o que faz com que o motor opere, na maior parte do tempo, a vazio. Nessa

condição, o fator de potência do motor é muito baixo, resultando em uma eficiência energética também reduzida.

Em seguida, para o Regime de Carga 3 (RC3), aplica-se uma carga de 0,84 N.m, conforme descrito na Figura 24 da seção 3.2.2. O gráfico da Figura 43 mostra a amplitude da corrente média consumida pela máquina em dois ciclos desse regime de carga.



Fonte: Autor, 2024

Para este regime espera-se que a MEE seja mais próxima do ensaio com RC1, já que o motor opera por mais tempo com a carga próxima a nominal em seu eixo, esses resultados estão compilados na Tabela 17, e discutidos em seguida.

Tabela 17: Resumo dos testes realizados – Regime de Carga 3)

Ensaio	Energia Consumida no MIT (mAh)	CN do MIT (A/V.m.h)	MEE do MIT (A/V.m.h)
Ensaio 01	4,195	0,741	0,759
Ensaio 02	4,146	0,732	0,768
Ensaio 03	4,152	0,733	0,767
Ensaio 04	4,137	0,730	0,770
Ensaio 05	4,182	0,738	0,762
<b>Média</b>	<b>4,162</b>	<b>0,735</b>	<b>0,765</b>

Fonte: Autor, 2024

Como esperado, a MEE no RC3 é mais próxima ao valor obtido no RC1, com uma queda de apenas 20,48%. Os resultados compilados para este de estudo, pode ser observado na Tabela 18.

Tabela 18: Influência do regime de carga na eficiência do MIT

<b>Ensaio</b>	<b>Regime 1</b>	<b>Regime 2</b>	<b>Regime 3</b>
Ensaio 01	0,962	0,053	0,759
Ensaio 02	0,964	0,071	0,768
Ensaio 03	0,963	0,053	0,767
Ensaio 04	0,964	0,073	0,770
Ensaio 05	0,960	0,080	0,762
<b>Média</b>	<b>0,962</b>	<b>0,066</b>	<b>0,765</b>

Fonte: Autor, 2024

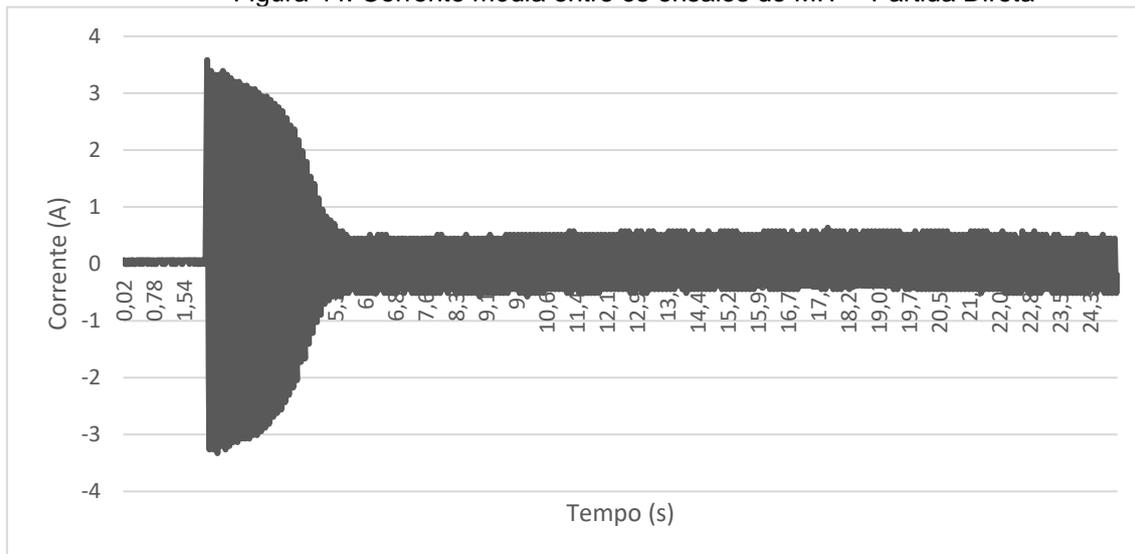
Conclui-se que, nos três regimes de carga aplicados neste trabalho, há uma relação direta entre o tempo de aplicação de carga no eixo do motor e sua eficiência energética. Além disso, existe uma relação direta entre a quantidade de carga no eixo e o fator de potência, assim como a eficiência energética da máquina, desde que a carga não ultrapasse a capacidade nominal do motor. Quanto mais próxima a carga estiver do valor nominal, e quanto maior o tempo de atuação desta, maior será a eficiência energética do motor. Em seguida, verifica-se a influência dos métodos de acionamento na eficiência dos MITs.

### 4.3 Eficiência vs método de acionamento

Para analisar a influência do método de acionamento na eficiência energética do MIT, seguindo a teoria apresentada na seção 3.2.3, inicialmente, contabiliza-se o consumo e, em seguida, a eficiência energética do motor B durante a partida direta e operando a vazio. Este método de partida é adotado como referência para comparação com os demais métodos de acionamento.

Essa abordagem permite avaliar a forma como diferentes técnicas de partida afetam o consumo de energia e a eficiência energética do motor. A média das correntes registradas nos 5 ensaios são apresentadas no gráfico da Figura 44.

Figura 44: Corrente média entre os ensaios do MIT – Partida Direta



Fonte: Autor, 2024

No gráfico é possível observar o comportamento padrão de partida direta de MITs, com um pico de corrente no instante da partida, seguido de uma redução, até nível de corrente na faixa da corrente nominal. Os resultados e as métricas de interesse estão compilados na Tabela 19.

Tabela 19: Resumo dos testes realizados – Partida Direta

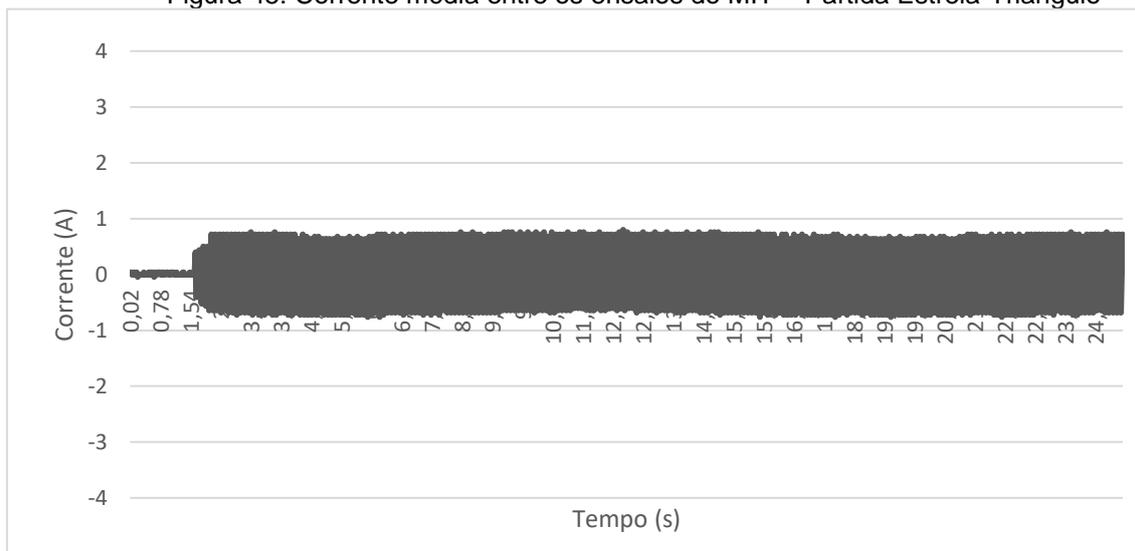
Ensaio	Energia Consumida no MIT (mAh)	CN do MIT (mA/V)	MEE do MIT (mA/V)
Ensaio 01	3,484	0,413	1,087
Ensaio 02	3,416	0,405	1,095
Ensaio 03	3,484	0,413	1,087
Ensaio 04	3,488	0,414	1,086
Ensaio 05	3,423	0,406	1,094
<b>Média</b>	<b>3,459</b>	<b>0,410</b>	<b>1,090</b>

Fonte: Autor, 2024

O valor médio da MEE do MIT neste ensaio foi de 1,090 mA/V, este é o valor de referência para comparação com demais ensaios. Com base na literatura apresentada no Capítulo 2, espera-se que este seja o método menos eficiente, devido ao pico de corrente na partida do motor, que é bem superior, em relação a valores nominais, que o pico de torque que a máquina desenvolve, o que reduz a eficiência geral.

O teste com a partida em configuração Estrela-Triângulo foi realizado. Espera-se observar um pico de corrente reduzida, com uma partida mais suave, o que deve resultar em um aumento na MEE em comparação à partida direta. A Figura 45 mostra o consumo médio de corrente entre os ensaios realizados.

Figura 45: Corrente média entre os ensaios do MIT – Partida Estrela-Triângulo



Fonte: Autor, 2024

O gráfico indica uma atenuação da corrente de partida antes da comutação de Estrela para Triângulo, corroborando a coerência dos ensaios com os conceitos discutidos nos capítulos anteriores. A Tabela 20 resume os resultados obtidos, destacando a MEE como o principal parâmetro em estudo.

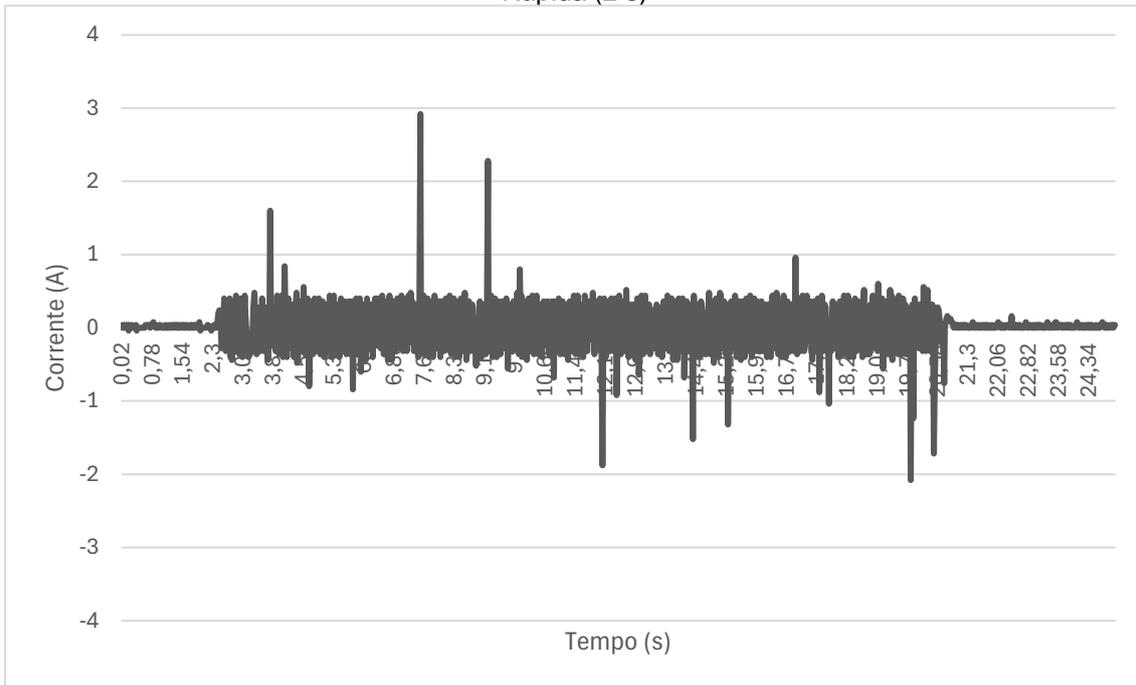
Tabela 20: Resumo dos testes realizados – Partida Estrela-Triângulo

Ensaio	Energia Consumida no MIT (mAh)	CN do MIT (mA/V)	MEE do MIT (mA/V)
Ensaio 01	3,176	0,383	1,117
Ensaio 02	3,238	0,390	1,110
Ensaio 03	3,175	0,383	1,117
Ensaio 04	3,207	0,387	1,113
Ensaio 05	3,151	0,380	1,120
<b>Média</b>	<b>3,189</b>	<b>0,384</b>	<b>1,116</b>

Fonte: Autor, 2024

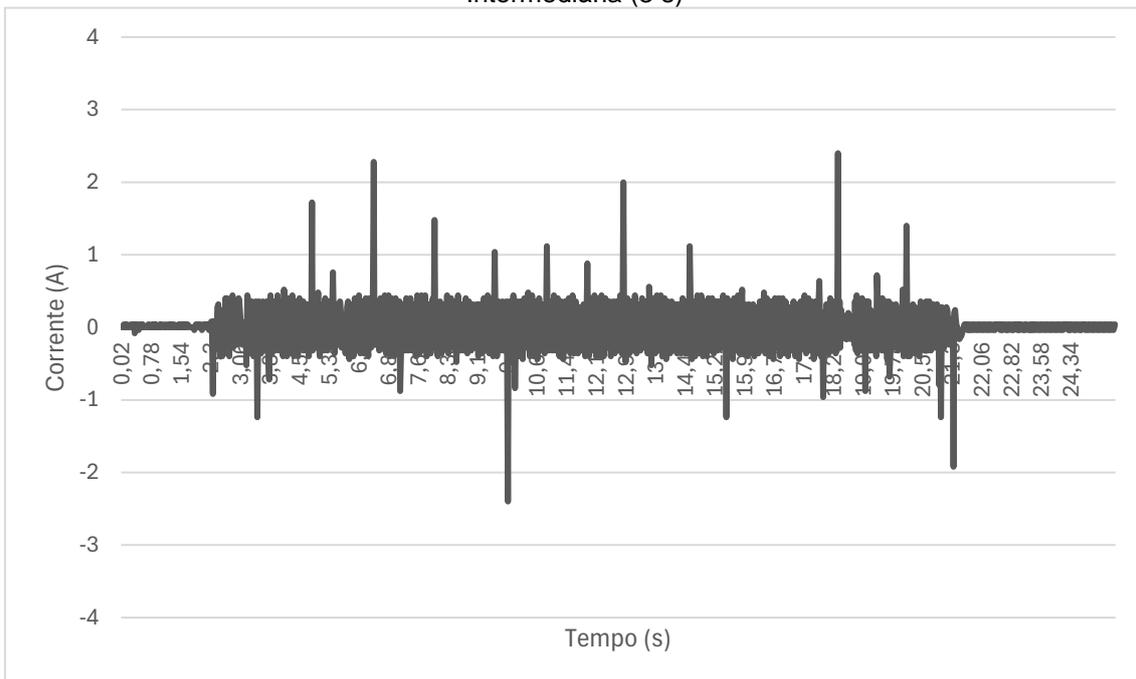
Como esperado, a partida Estrela-Triângulo resultou em um aumento na MEE, de aproximadamente 2,3% em relação à partida direta. Os resultados a seguir são referentes aos ensaios com partida através de inversor de frequência, com variações dos tempos de rampa de subida e descida. Os gráficos da corrente média consumida para os ensaios com variação de tempo da rampa de descida são mostrados nas Figuras 46, 47 e 48.

Figura 46: Corrente média entre os ensaios do MIT – Variação da Rampa de Descida Rápida (2 s)



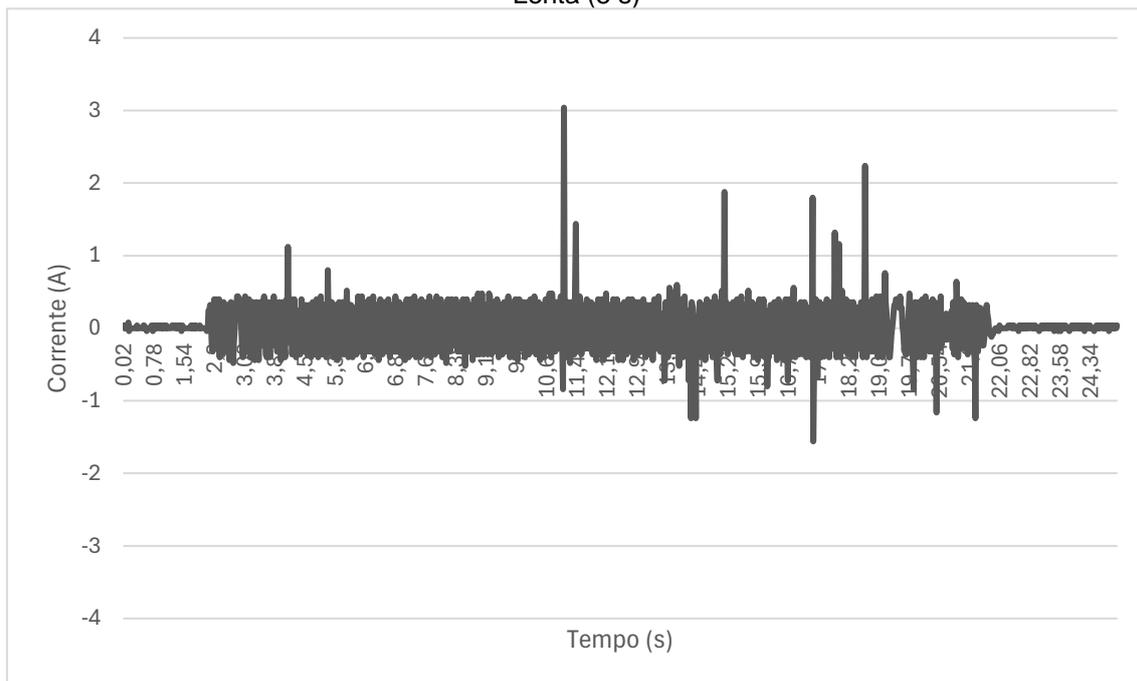
Fonte: Autor, 2024

Figura 47: Corrente média entre os ensaios do MIT – Variação da Rampa de Descida Intermediária (3 s)



Fonte: Autor, 2024

Figura 48: Corrente média entre os ensaios do MIT – Variação da Rampa de Descida Lenta (5 s)



Fonte: Autor, 2024

Durante o período de aquisição, observaram-se picos intermitentes de corrente, causados por ruídos gerados pelo inversor, que resultam em harmônicos na rede. Esse comportamento é esperado, conforme foi abordado no capítulo 2. É importante salientar que o surgimento destes harmônicos pode influenciar, além da condição de carregamento elétrico de outros equipamentos, na eficiência energética destes, porém esse trabalho se limita a avaliar apenas a eficiência energética do MIT ensaiado. A Tabela 21 apresenta os resultados obtidos através dos cálculos discutidos nos capítulos anteriores.

Tabela 21: Resumo dos testes realizados (MEE – Variação da Rampa de Descida)

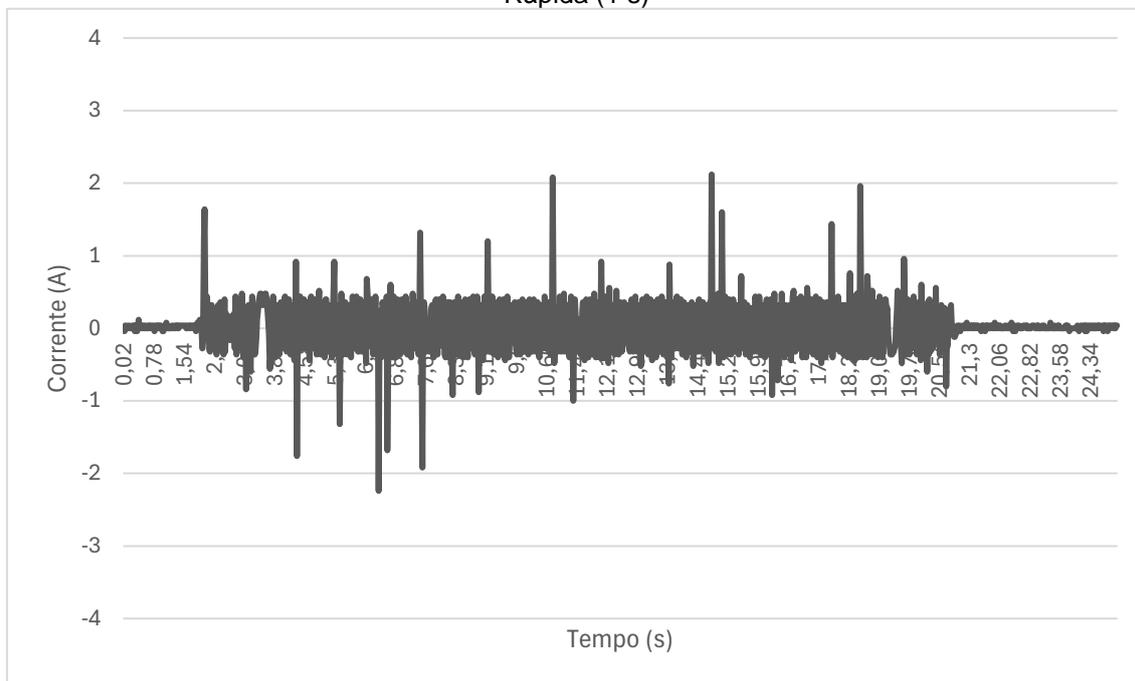
Ensaio	Métrica de Eficiência Energética (mA/V)		
	Rápida – 2 s	Intermediária – 3 s	Lenta – 5 s
Ensaio 01	1,248	1,233	1,214
Ensaio 02	1,249	1,229	1,211
Ensaio 03	1,248	1,236	1,211
Ensaio 04	1,263	1,237	1,217
Ensaio 05	1,253	1,230	1,217
<b>Média</b>	<b>1,252</b>	<b>1,233</b>	<b>1,214</b>

Fonte: Autor, 2024

Nos testes com rampa de descida rápida, houve um ganho de 12,94% na MEE, seguido por 11,6% com rampa intermediária e 10,21% com rampa lenta. Isso indica que, para o MIT testado, a rampa de descida rápida oferece maior eficiência. Em seguida, analisou-se a MEE com variação da rampa de subida,

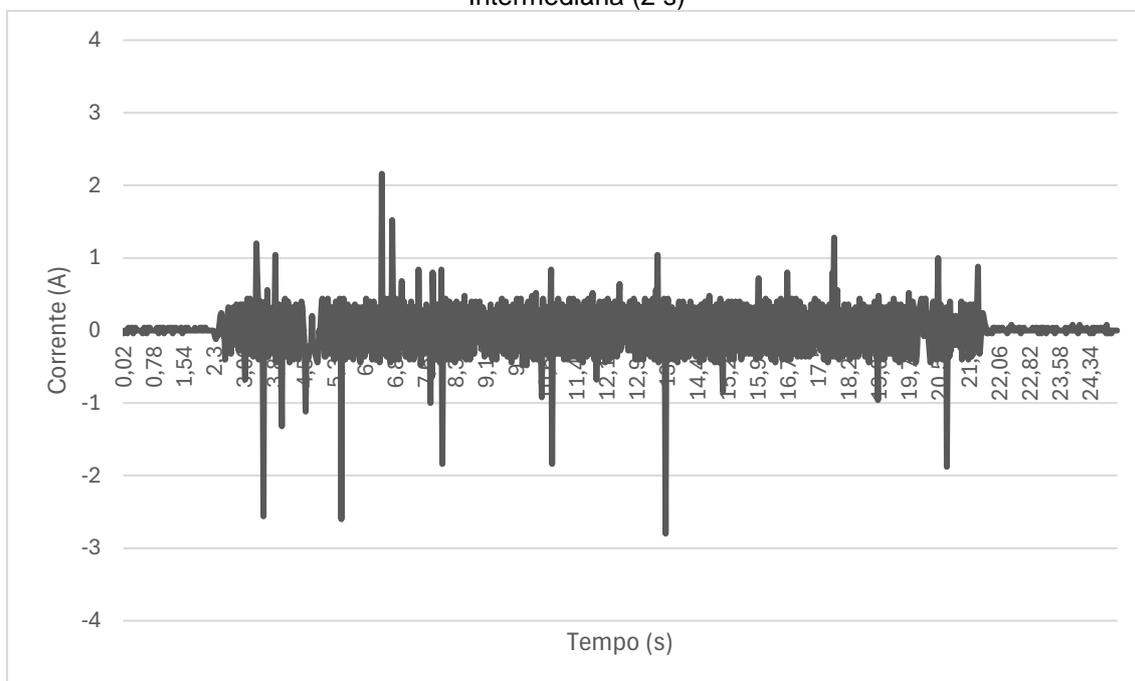
conforme os critérios do Capítulo 3, especialmente a Tabela 10. Os gráficos da corrente consumida estão nas Figuras 49, 50 e 51.

Figura 49: Corrente média entre os ensaios do MIT – Variação da Rampa de Subida Rápida (1 s)



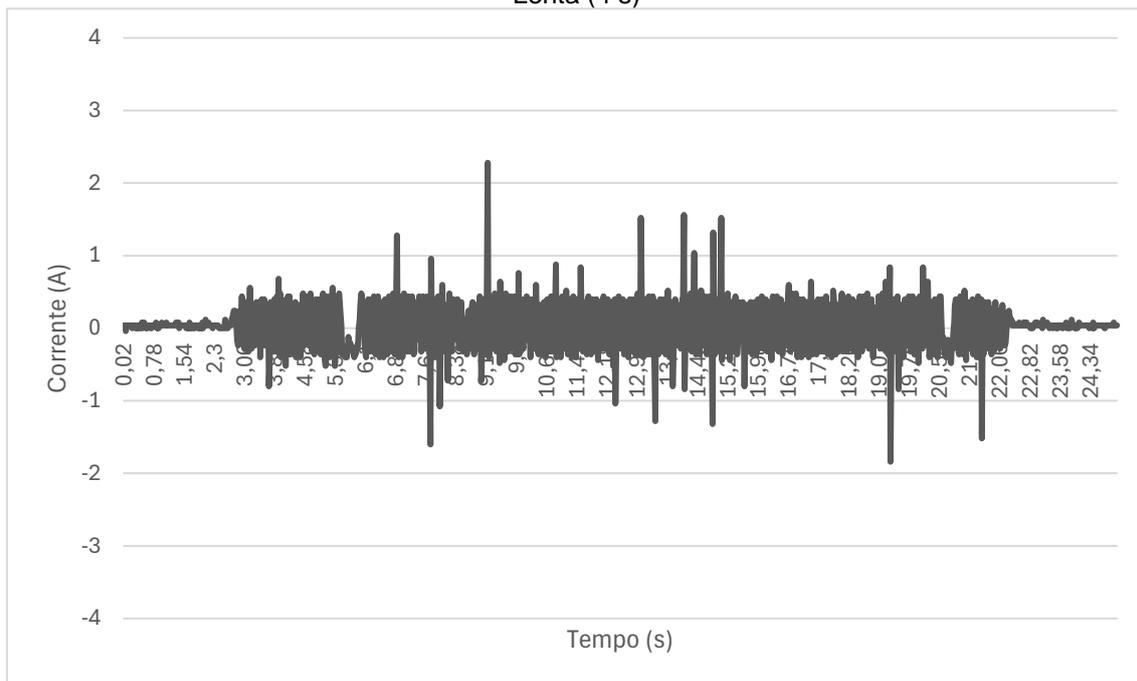
Fonte: Autor, 2024

Figura 50: Corrente média entre os ensaios do MIT – Variação da Rampa de Subida Intermediária (2 s)



Fonte: Autor, 2024

Figura 51: Corrente média entre os ensaios do MIT – Variação da Rampa de Subida Lenta (4 s)



Fonte: Autor, 2024

A Tabela 22 resume os resultados relativos à MEE do MIT, com base nos cálculos aplicados. Em seguida, discute-se a influência desses resultados.

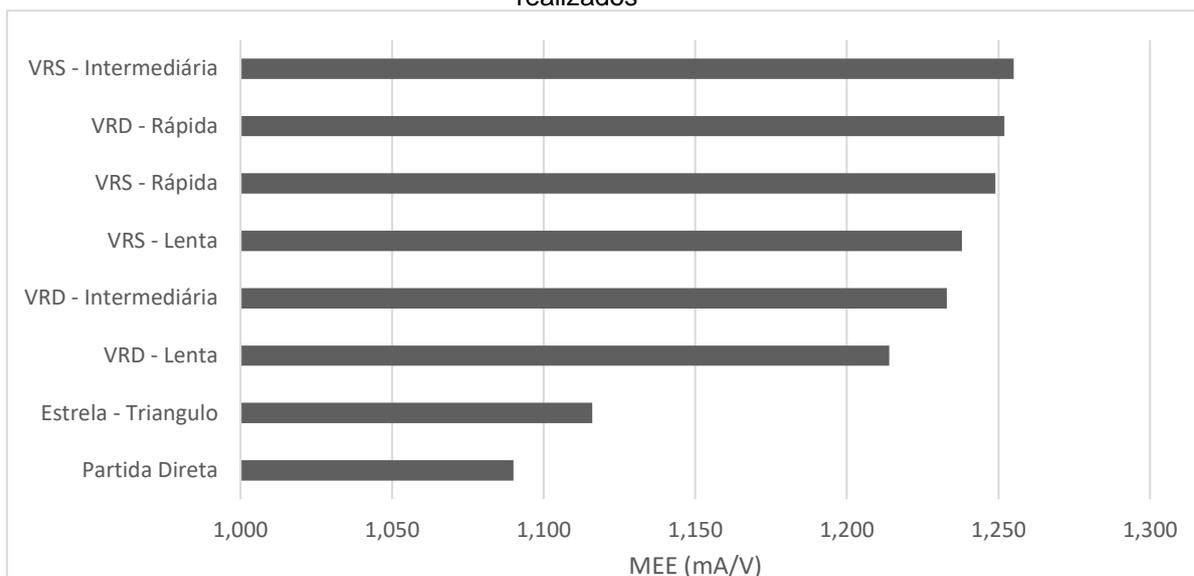
Tabela 22: Resumo dos testes realizados - MEE para a Variação da Rampa de Subida

Testes	Métrica de Eficiência Energética (mA/V)		
	Rápida – 1 s	Intermediária – 2 s	Lenta – 4 s
Teste 01	1,250	1,250	1,242
Teste 02	1,252	1,252	1,252
Teste 03	1,214	1,263	1,229
Teste 04	1,262	1,256	1,236
Teste 05	1,265	1,254	1,234
<b>Média</b>	<b>1,249</b>	<b>1,255</b>	<b>1,238</b>

Fonte: Autor, 2024

Para variação da Rampa de Subida, observa-se que o valor da MEE é maior na rampa de subida intermediária, com um ganho de 13,14%, seguido por 12,73% para rampa rápida e 11,95% para rampa lenta em relação ao ensaio de referência. Os resultados obtidos de MEE nos ensaios realizados para este estudo em relação à Variação de Rampa de Subida (VRS) e Variação de Rampa de Descida (VRD) estão compilados na Figura 52.

Figura 52: Influência do tipo de acionamento na eficiência do MIT para os ensaios realizados



Fonte: Autor, 2024

Conclui-se que, nos ensaios realizados para avaliar a influência do tipo de acionamento na eficiência do MIT, a variação da rampa de subida ajustada para 2 segundos no inversor proporcionou a melhor eficiência energética para o motor ensaiado. Esse resultado é coerente, visto que o motor tende a sofrer mais durante a partida, devido ao pico de corrente elevado.

No entanto, o ajuste adequado do tempo de aceleração no inversor minimiza esse pico, resultando em maior eficiência energética em comparação com os outros métodos testados. É importante destacar que o tempo da rampa, tanto de partida quanto de parada, afeta diretamente a atenuação da corrente. No caso específico da partida, a integração da corrente pelo tempo da rampa pode resultar em valores diferentes de energia consumida, influenciando diretamente o valor da MEE.

Portanto, os valores obtidos neste estudo são válidos apenas para o motor testado. No entanto, motores de mesmo porte e eficiência similar devem alcançar valores de MEE próximos, desde que as rampas de aceleração e frenagem sejam configuradas de forma equivalente. No capítulo seguinte, serão apresentadas as considerações finais em relação aos testes realizados.

#### **4.4 Considerações finais**

Este estudo sobre a eficiência energética dos MITs para diferentes condições de operação revelou que fatores como temperatura ambiente, regime de carga e tipo de acionamento exercem influência significativa sobre a eficiência da máquina. A partir desses resultados, destaca-se a importância de otimizar o uso desses equipamentos, que consiste em ajustar suas condições operacionais de maneira a maximizar o rendimento energético. Isso inclui operar os motores dentro de faixas de temperatura controladas, utilizar regimes de carga próximos ao valor nominal e selecionar o tipo de acionamento mais eficiente para cada aplicação. Otimizar o uso também envolve ajustar corretamente o tempo de aceleração e frenagem nos inversores de frequência, minimizando os picos de corrente, e, conseqüentemente, reduzindo as perdas energéticas. Tais práticas não só aumentam a eficiência energética, como também prolongam a vida útil dos motores, resultando em uma operação mais sustentável e econômica para o setor industrial.

## 5 CONCLUSÃO

A pesquisa realizada neste trabalho confirma a importância de otimizar as condições operacionais dos Motores de Indução Trifásicos para maximizar a eficiência energética. Os resultados obtidos demonstram que variáveis como a temperatura ambiente, o regime de carga e o método de acionamento têm um impacto significativo na eficiência dos MITs, justificando a importância de estudos detalhados para uma boa avaliação na gestão energética desses motores. Com isso, o estudo contribui para um bom entendimento sobre práticas mais eficientes e sustentáveis no uso de energia elétrica na indústria.

A justificativa central deste trabalho é a necessidade de compreender as variáveis que afetam a eficiência dos MITs, visando a promoção de práticas mais sustentáveis e econômicas. Os objetivos específicos definidos para este trabalho foram atendidos, visto que os resultados alcançados permitem validar as hipóteses estabelecidas preliminarmente.

A metodologia utilizada, baseada em ensaios experimentais, se mostrou adequada para atingir os objetivos propostos. Contudo, algumas limitações foram observadas, como a dificuldade de replicar as condições exatas de operação industrial em um ambiente controlado. Essas limitações sugerem que futuros estudos poderiam explorar métodos mais avançados de ensaio, que simulem ambientes industriais, ou ampliar a amostragem de condições operacionais.

Em particular, identificou-se que o ajuste do tempo de aceleração no inversor é importante para melhorar a eficiência energética do motor, destacando-se como um aspecto relevante para a prática industrial.

Por fim, recomenda-se a continuidade das investigações sobre a eficiência energética dos MITs, especialmente no que se refere ao impacto de novas tecnologias de acionamento e materiais mais eficientes para troca de calor com o meio refrigerante, que possam contribuir ainda mais para a sustentabilidade energética.

## 5.1 Contribuições do trabalho

Este trabalho contribuiu significativamente para a compreensão prática de como fatores como temperatura ambiente, regime de carga e métodos de acionamento influenciam a eficiência energética de Motores de Indução Trifásicos (MITs). Ao longo dos ensaios realizados, observou-se que esses parâmetros influenciam diretamente o desempenho energético dos MITs, corroborando as previsões teóricas e as informações apresentadas na literatura. Além disso, os resultados obtidos demonstraram coerência com estudos anteriores, reforçando a importância de uma abordagem criteriosa e metodológica para otimizar a eficiência energética em ambientes industriais. Assim, este estudo não apenas valida teorias existentes, mas também oferece *insights* práticos que podem ser aplicados para melhorar a eficiência de sistemas que adotam MITs em contextos reais.

## 5.2 Sugestão de trabalhos futuros

O estudo desenvolvido neste trabalho pode ser complementado futuramente com os seguintes temas:

- Avaliação a influência dos regimes de serviço e outros métodos de partida na eficiência dos MITs.
- Avaliação da eficiência de métodos avançados de controle de velocidade para motores de indução trifásicos, considerando as limitações dos sistemas de acionamento eletrônicos modernos;
- Investigação do uso de materiais mais eficientes e resistentes para o projeto de componentes críticos do motor de indução trifásico, como o rotor, estator e carcaça, a fim de aumentar a eficiência e a vida útil do motor;
- Estudos sobre a otimização do projeto de motores de indução trifásicos, incluindo a análise de geometrias de estator e rotor, dimensionamento de componentes, seleção de materiais e configurações de bobinamento;

- Estudos sobre a aplicação de técnicas para identificar o nível de qualidade de energia, assim como relacionar esse fator com a eficiência energética dos MITs;

## REFERÊNCIAS

1. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Anexo VIII da Resolução Normativa nº 956, de 7 de dezembro de 2021: Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. *Módulo 8 – Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica*. Brasília: ANEEL, 2021. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20241095.pdf>>. Acesso em: 1 de ag. 2024.
2. BOLLEN, M. H. J. *Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions*. IEEE Press, 2000.
3. ELETROBRAS. *Eficiência Energética em Motores Elétricos*. 2004.
4. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Balanço Covid-19 - Impactos nos mercados de energia no Brasil: 1º semestre de 2020. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-covid-19-impactos-nos-mercados-de-energia-no-brasil-1-semester-de-2020>>. Acesso em: out. 2023.
5. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *Balanço Energético Nacional (BEN) 2023: Ano base 2022*. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br>>. Acesso em: out. 2023.
6. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *Painel de Monitoramento do Consumo de Energia Elétrica*. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/consumo-de-energia-eletrica>>. Acesso em: out. 2023.
7. EVANGELISTA, L. *Efeitos das Distorções Harmônicas (Tensões e Correntes) e Desequilíbrios (Tensões) em Medidores Eletrônicos Trifásicos de Energia Elétrica Ativa*. Ilha Solteira - SP, nov. 2008.
8. FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY. *Máquinas Elétricas*. 7. ed. Tradução: AMGH. São Paulo: McGraw-Hill, 2014.
9. FRANCHI, C. M. *Acionamentos Elétricos*. Volume 4. São Paulo: Editora Érica Ltda, 2008.
10. GERBRAS. *Redução da potência útil de um motor para evitar sobreaquecimento*, pag. 72. NBR 17094-1. Tolerâncias, pag. 61, mesma norma. Disponível em: <<https://www.gebras.com/gebras/news-item.php?id=1120>>. Acesso em: out. 2023.

11. GIERAS, J. F. *Energy Efficiency and Conservation in Electric Motors*. CRC Press, 2020.
12. GUIMARÃES, H. O. *Acionamentos de Motores Elétricos*. Londrina, Paraná: Distribuidora Educacional S.A., 2018.
13. INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE). IEEE Std 1453-2015. *Recommended Practice for Measurement and Limits of Voltage Fluctuations and Associated Light Flicker on AC Power Systems*. New York: IEEE, 2015.
14. INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE). *Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators*. New York: IEEE, 2004.
15. KÖHLER, Stefan. *Tensões e correntes harmônicas: parâmetros de controle, medições e normalização*. Alemanha, 2017. Disponível em: <[https://www.arandanet.com.br/revista/em/materia/2017/06/27/tensoes\\_e\\_correntes.html](https://www.arandanet.com.br/revista/em/materia/2017/06/27/tensoes_e_correntes.html)>. Acesso em: 26 out. 2023.
16. LU, Bin; HABETLER, T. G.; HARLEY, T. G. A Survey of Efficiency-Estimation Methods for In-Service Induction Motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 42, n. 4, p. 924-933, jul./ago. 2006.
17. MAMIZADER, A.; ISKENDER, I. Designing of Induction Motor Efficiency Monitoring System Without Using Torque meter and Speed Sensor. Turquia, 2017.
18. MARTINHO, E. *Distúrbios da Energia Elétrica: Efeitos dos Distúrbios, Diagnósticos, Soluções e Normalizações*. 3. ed. São Paulo: Editora Érica, 2009.
19. PAULILLO, G.; TEIXEIRA, M.; BACCA, I. *Qualidade da Energia Elétrica*. São Paulo, 2010.
20. PAULILLO, G.; TEIXEIRA, M. *Qualidade de energia*. Cap. VII, edição 84. jan. 2013.
21. RAJ, C. T.; SRIVASTAVA, S. P.; AGARWAL, P. Energy Efficient Control of Three-Phase Induction Motor - A Review. *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, v. 1, n. 1, p. 1793-8198, abr. 2009.
22. SANTANA, E. S.; JÚNIOR, I. J. S. *Circuitos Elétricos e Eletrotécnica - Fundamentos e Aplicações*. 2. ed. São Paulo: agosto, 2021.

23. SEGUNDO, A. K. R.; RODRIGUES, C. L. C. *Eletrônica de Potência e Acionamentos Elétricos*. Rede e-Tec Brasil, Minas Gerais, 2015.
24. WEG Motors. *Guia de Especificação Motores Elétricos*. Santa Catarina, 2023. Disponível em: [motores@weg.net](mailto:motores@weg.net). Acesso em: out. 2023.
25. WEG Motores. Disponível em: [www.weg.net](http://www.weg.net). Acesso em: out. 2023.