

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

MATHEUS AMARAL ALVES

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS OPERANDO
COM TENSÕES DESEQUILBRADAS**

Uberlândia

2022

MATHEUS AMARAL ALVES

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS OPERANDO
COM TENSÕES DESEQUILBRADAS**

Trabalho apresentado como requisito de avaliação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Coutinho Gomes

Assinatura do Orientador

Uberlândia

2022

MATHEUS AMARAL ALVES

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS OPERANDO
COM TENSÕES DESEQUILBRADAS**

Trabalho apresentado como requisito de
avaliação na disciplina Trabalho de Conclusão
de Curso do Curso de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Uberlândia.

Uberlândia, 27 de dezembro de 2021

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Eduardo Tavares

Prof. Dr. Augusto Wohlgemuth Fleury Veloso da Silveira

Dedico este trabalho aos meus pais, José Alves Caixeta e Lindaura Amaral Alves pelo apoio, carinho e compreensão, à toda minha família pelo incentivo e aos meus amigos pelo apoio e pelo amparo durante toda essa trajetória.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me dar forças e permitir conquistar mais uma vitória nessa etapa da minha vida.

Ao Prof. Dr. Luciano Coutinho Gomes pelo apoio, pela paciência e pelos ensinamentos, durante a orientação para a execução do projeto de pesquisa.

Aos companheiros de iniciação científica Mateus Beletti e Bruno Lemos, ao mestrando Vinícius Marcos Pinheiro e ao doutorando Cássio Alves de Oliveira pela parceria, pelo apoio e pela amizade, fatores esses que foram fundamentais para o sucesso na realização do projeto.

À toda a equipe do Laboratório de Acionamentos Elétricos pelo suporte em diversos momentos em que surgiram dificuldades.

Em especial aos meus pais, minha irmã e toda minha família e amigos pelo apoio e companheirismo durante cada etapa da graduação.

Por fim, a todos que estiveram direto ou indiretamente envolvidos na realização deste trabalho.

RESUMO

As máquinas de indução são equipamentos elétricos robustos e de simples utilização, por isso são um dos equipamentos mais presentes nas plantas industriais de todo o mundo. Nos últimos anos, com o aumento do uso de equipamentos eletrônicos, houve um aumento considerável no número de estudos de qualidade de energia elétrica, o que acabou evidenciando diferentes condições de operação que as máquinas elétricas estão expostas durante sua operação e trazendo a necessidade de uma constante evolução na qualidade das máquinas e no aprimoramento do seu dimensionamento. Com o presente trabalho, almeja-se realizar o acionamento de um motor de indução trifásico submetido a diferentes fatores de desequilíbrio de tensão e operando com diferentes condições de carga no seu eixo. Dessa forma, através dos ensaios realizados, fez-se possível verificar quais as variações ocorreram no funcionamento da máquina para tais condições de operação, especialmente no que tange ao torque, rendimento, velocidade e demais aspectos pertinentes ao funcionamento de um motor.

Palavras-chave: desequilíbrio de tensão, qualidade de energia, eficiência energética, motor de indução trifásico, máquinas elétricas rotativas

ABSTRACT

Induction machines are robust and easy-to-use electrical equipment, that's why they are one of the most used equipment in industrial plants all over the world. In recent years, with the rise use of electronic equipment, there has been a growing increase in electricity quality studies showing different operating conditions that electrical machines are exposed during the operation and bringing the need for a constant evolution in the quality of machines and improvement in their dimensioning. With the present work, the aim is to carry out the activation of a three-phase induction motor subjected to different forms of voltage unbalance and operating with different load conditions on its axis. Thus, through the tests carried out, it was possible to verify the variations in the operation of the machine for such operating conditions, especially with regard to torque, efficiency, speed and other aspects relevant to the operation of an engine.

Keywords: voltage unbalances, power quality, energy efficiency, three-phase induction motor, electrical machines.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Consumo de Energia Elétrica por setor | 13 |
| Figura 2 - Diagrama Fasorial de Tensões Equilibradas..... | 17 |
| Figura 3 - Sequência de fases do Teorema de Fortescue..... | 19 |
| Figura 4 - Circuito Equivalente por fase do Motor de Indução..... | 26 |
| Figura 5 - Circuito Equivalente por fase (sequência positiva) | 27 |
| Figura 6 - Circuito Equivalente por fase (sequência negativa) | 27 |
| Figura 7 - Circuito Equivalente por fase (sequência zero) | 27 |
| Figura 8 - Plataforma de Ensaios..... | 31 |
| Figura 9 - Plataforma de ensaios utilizada..... | 32 |
| Figura 10 - Fonte Programável AMETEK, modelo CSW11100..... | 34 |
| Figura 11 - Máquina de Corrente Contínua LAVILL | 35 |
| Figura 12 - Banco de Resistências | 36 |
| Figura 13 - Transdutor de conjugado T22 | 37 |
| Figura 14 - Código para leitura de torque no LABView | 38 |
| Figura 15 - Tela de leitura do torque | 38 |
| Figura 16 - Fluxo de Potência em um MIT | 39 |
| Figura 17 - MIT ensaiado | 42 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Limites de Desequilíbrio de Tensão..... | 23 |
| Tabela 2 - Parâmetros da fonte programável..... | 33 |
| Tabela 3 - Parâmetros da máquina de corrente contínua..... | 34 |
| Tabela 4 - Parâmetros do MIT ensaiado..... | 41 |
| Tabela 5 – Tensões aplicadas no ensaio com desequilíbrio de amplitude..... | 42 |
| Tabela 6 - Composição de tensões fase-fase – ensaio com desequilíbrio de amplitude | 42 |
| Tabela 7 - Fatores de desequilíbrio calculados – ensaio com desequilíbrio de amplitude | 43 |
| Tabela 8 – Tensões aplicadas no ensaio com desequilíbrio de ângulo de fase | 43 |
| Tabela 9 - Composição de tensões fase-fase – ensaio com desequilíbrio de ângulo de fase ... | 43 |
| Tabela 10 - Fatores de desequilíbrio – ensaio com desequilíbrio de ângulo de fase..... | 44 |
| Tabela 11 - Ensaio 110% de carga e alimentação nominal | 45 |
| Tabela 12 - Ensaio 110% de carga e alimentação desequilibrada..... | 45 |
| Tabela 13 - Rendimentos para ensaio com 110% de carga | 47 |
| Tabela 14 - Ensaio com carga e alimentação nominais..... | 47 |
| Tabela 15 - Ensaio com carga nominal e alimentação desequilibrada | 48 |
| Tabela 16 - Rendimentos para ensaio com carga nominal | 49 |
| Tabela 17 - Ensaio 90% de carga e alimentação nominal | 49 |
| Tabela 18 - Ensaio 90% de carga e alimentação desequilibrada..... | 49 |
| Tabela 19 - Rendimentos para ensaio com 90% de carga | 50 |
| Tabela 20 - Ensaio 80% de carga e alimentação nominal | 51 |
| Tabela 21 - Ensaio 80% de carga e alimentação desequilibrada..... | 51 |
| Tabela 22 - Rendimentos para ensaio com 80% de carga | 52 |
| Tabela 23 - Resumo dos resultados obtidos | 53 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

BEN - Balanço Energético Nacional

CIGRÉ - Comitê Nacional Brasileiro de Produção e Transmissão de Energia Elétrica

IEEE - Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos

LAcE - Laboratório de Acionamentos Elétricos

MCC - Máquina de corrente contínua

MIT - Motor de indução trifásico

NEMA - *National Electrical Manufacturers Association*

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico

PAC - Ponto de Acoplamento Comum

PRODIST - Procedimentos de Distribuição

SEP - Sistema Elétrico de Potência

Sumário

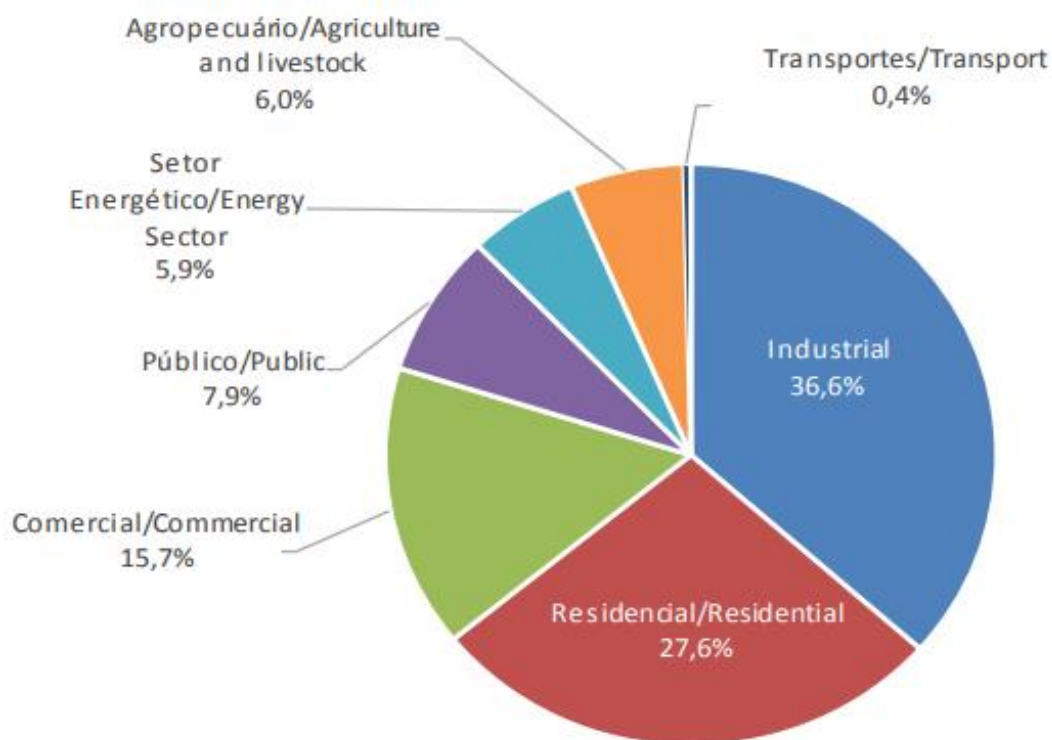
| | | |
|---------|---|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 13 |
| 1.1 | Objetivo..... | 14 |
| 2 | QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA | 16 |
| 2.1 | Desequilíbrio de Tensão | 17 |
| 2.1.1 | Cálculos do desequilíbrio de tensão..... | 18 |
| 2.1.1.1 | Componentes Simétricas..... | 18 |
| 2.1.1.2 | Método de CIGRÉ..... | 21 |
| 2.1.1.3 | Método de NEMA..... | 21 |
| 2.1.1.4 | Método do IEEE..... | 22 |
| 2.1.2 | Normas acerca de desequilíbrios de tensão | 22 |
| 2.1.2.1 | IEC 61000-4-30..... | 22 |
| 2.1.2.2 | PRODIST - ANEEL..... | 22 |
| 2.1.2.3 | Procedimentos de Rede - ONS..... | 23 |
| 2.1.2.4 | IEEE 1159-2009..... | 23 |
| 2.1.2.5 | NEMA MG1 2006..... | 24 |
| 3 | EFEITOS DO DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO NO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO..... | 25 |
| 3.1 | Circuito Equivalente do Motor de Indução Trifásico | 26 |
| 3.2 | Circuito Equivalente do MIT com Desequilíbrio de Tensão | 27 |
| 4 | MATERIAIS E MÉTODOS | 31 |
| 4.1 | Plataforma de Ensaio..... | 31 |
| 4.2 | Fonte Programável | 32 |
| 4.3 | Máquina de Corrente Contínua..... | 34 |
| 4.4 | Transdutor de Conjugado..... | 36 |
| 4.5 | Motor de Indução Trifásico | 39 |
| 4.6 | Montagem dos ensaios..... | 40 |

| | | |
|-----|---|----|
| 5 | ESTUDO DE CASO | 45 |
| 5.1 | Ensaio motor operando com 110% da carga nominal | 45 |
| 5.2 | Ensaio motor operando com carga nominal..... | 47 |
| 5.3 | Ensaio motor operando com 90% da carga nominal | 49 |
| 5.4 | Ensaio motor operando com 80% da carga nominal | 51 |
| 5.5 | Considerações Finais | 52 |
| 6 | CONCLUSÕES..... | 55 |
| 7 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 57 |

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, o setor industrial é o responsável pela maior parte do consumo de energia elétrica do país. Segundo o Balanço Energético Nacional (BEN) de 2021, o consumo desse setor correspondeu a 36,6% de todo consumo de eletricidade no país no último ano. Seguido pelo consumo residencial (27,6%) e comercial (15,7%). Dentro do setor industrial, de acordo com o Ministério de Minas e Energia (MME), estima-se que cerca de 68% do consumo de energia elétrica seja proveniente forças motrizes, especialmente, de motores de indução trifásicos (MIT).

Figura 1 - Consumo de Energia Elétrica por setor



Fonte: BEN 2021

Dessa forma, é possível inferir que os MITs são um dos equipamentos que mais consomem energia elétrica do país. Embora seja uma máquina com bom rendimento, essa característica varia com diversos fatores, entre eles: o superdimensionamento, rebobinamento dos enrolamentos, ventilação do ambiente, a qualidade da energia utilizada para sua alimentação, entre outros fatores.

Quando se trata dos aspectos ligados a qualidade de energia “em motores de indução trifásicos, os problemas citados provocam alterações de performance, aumentando as perdas, reduzindo o rendimento, o fator de potência, e até mesmo a potência disponível para a carga”

(SILVA, 2012, p. 23). Dessa feita, tratando-se de um equipamento tão importante para a sociedade, é imprescindível estudar como ele se comporta frente as diferentes situações de operação, especialmente aquelas oriundas de uma alimentação não ideal, e ainda vistas sobre distintas óticas de carga que possam estar impostas em seu eixo.

Por outro lado, é importante compreender quais aspectos geram impactos na qualidade da energia elétrica entregue aos consumidores. No Brasil, o processo para que a energia chegue até o consumidor final passa pelas seguintes etapas: geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Tratando-se de um país com dimensões continentais, esses processos acabam impactando ainda mais na qualidade da energia elétrica entregue aos consumidores, devido à sua grande extensão e complexidade, bem como a enorme variedade de cargas conectadas. Nos últimos anos tem-se presenciado também um crescente aumento no uso de gerações distribuídas por todo o país, o que também traz uma parcela de contribuição para o impacto negativo na qualidade da energia. Em ambos os casos, o impacto negativo pode ocorrer de diversas formas, como: variações de tensão, distorções harmônicas, desequilíbrios de tensão, entre outras. Além da ocorrência durante o processo de entrega da energia, esses fenômenos também podem ocorrer dentro da própria instalação do consumidor, principalmente pelo dimensionamento do sistema, pelas características das cargas instaladas e da forma como estão conectadas, podendo gerar desbalanceamento nas fases, componentes harmônicas, etc.

Diante dos fenômenos citados, destaca-se a distorção harmônica, visto que ela promove a distorção das formas de ondas das correntes presentes no MIT, provocando, assim como nos desequilíbrios, a redução do rendimento e vida útil, além do surgimento de vibrações e ruídos nos motores.

Outro fenômeno que também necessita de estudos é o desequilíbrio de tensão carece de atenção especial, pois, quando presente na alimentação de um MIT, ele pode resultar num alto desequilíbrio das correntes, que por sua vez faz com que haja a redução da vida útil, do rendimento e do conjugado médio da máquina. Por isso, esse foi o fenômeno escolhido para estudo desse trabalho.

Dessa feita, para garantir que a operação correta e com bom rendimento dos equipamentos elétricos, além de reduzir os riscos de defeitos, é de fundamental importância a existência de indicadores e normas que regulamentem a qualidade do serviço de energia elétrica.

1.1 Objetivo

Diante do exposto e da importância das máquinas de indução, com presente trabalho almeja-se realizar o acionamento de um motor de indução trifásico submetido a diferentes

formas de desequilíbrio de tensão e operando com diferentes condições de carga no seu eixo. Dessa feita, identificar quais as variações no funcionamento da máquina para tais as condições de operação empregadas, especialmente no que tange ao torque, rendimento, velocidade e demais aspectos pertinentes ao funcionamento de um motor.

Para atingir o objetivo proposto neste trabalho, serão apresentados nos próximos capítulos uma revisão bibliográfica das normas técnicas vigentes que determinam os limites de desequilíbrios de tensões permitidos para redes elétricas, bem como o detalhamento das metodologias de cálculo de desequilíbrios empregadas em cada uma das normativas apresentadas. Ademais, é exposta uma revisão dos conceitos de motores de indução de trifásicos para operação em condições normais de alimentação, bem como para condições de operação com alimentação não ideal.

2 QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

Os sistemas elétricos de potência (SEP) são extremamente dinâmicos e estão sujeitos a diversos tipos de distúrbios e eventos a todo instante, tais como descargas atmosféricas, curtos-circuitos, chaveamentos, energização de banco de capacitores, presença de cargas não lineares. Esses últimos resultam diretamente em uma alteração na qualidade da energia elétrica entregue ao consumidor final.

Os estudos de qualidade de energia tratam dos fenômenos que impactam na amplitude e forma de onda da tensão e da corrente. Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a qualidade da energia precisa ser avaliada em:

- Qualidade do produto: manutenção da conformidade de tensão em regime permanente e ausência de perturbações;
- Qualidade do serviço: trata da continuidade do fornecimento de energia;
- Qualidade no atendimento ao consumidor.

Os distúrbios mais presentes na rede são as variações de tensão de curta e longa duração, as primeiras são aquelas que apresentam uma variação no valor eficaz da tensão durante um intervalo pequeno de tempo, e são causadas por curto-circuitos na rede ou por altas correntes de energização de equipamentos – como a corrente de *Inrush* de transformadores e de partida de motores. As segundas são aquelas que geram uma alteração no valor eficaz da tensão por um intervalo de tempo superior a 3 minutos, segundo o módulo 8 do PRODIST, ou superior a 1 minuto, de acordo com o definido no submódulo 2.9 dos procedimentos de rede da ONS. As variações de tensão de longa duração são decorrentes das saídas de grandes cargas da rede, carregamento excessivo de alimentadores, conexão ou desligamento de banco de capacitores, entre outros fatores.

Já os desequilíbrios de tensão ou corrente são ocasionados principalmente pela presença de cargas desbalanceadas nos sistemas elétricos e também pela existência de sistemas assimétricos, isto é, linhas de transmissão e distribuição, transformadores, motores e demais equipamentos que possuem impedâncias diferentes entre suas fases e, conseqüentemente, fazem com que o sistema tenha impedância diferente para suas três fases. As cargas trifásicas são ligeiramente desbalanceadas devido aos aspectos físicos construtivos das mesmas, como nos enrolamentos das bobinas de um motor ou de um transformador. Além disso, existem ainda cargas monofásicas e bifásicas conectadas ao sistema, que caso não sejam devidamente balanceadas podem causar desequilíbrios nos alimentadores. Ademais, o crescente aumento da

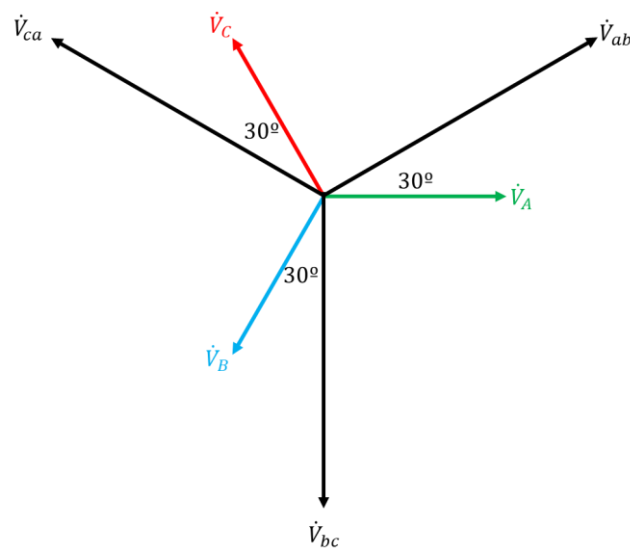
geração distribuída em todo o país pode originar um desbalanço de cargas ainda maior no sistema, visto que elas podem ocasionar uma variação na carga vista pelos alimentadores e demais componentes do sistema elétrico. Por fim, outros fatores que podem impactar no desequilíbrio de tensão são: assimetria entre impedâncias do sistema, interrupção em bancos de capacitores, entre outros.

Para garantir que haja um limite nas variações de qualidade de energia existem normas e indicadores, que buscam manter as alterações em uma faixa que não acarrete danos físicos ou materiais aos usuários e equipamentos do sistema elétrico. No Brasil, a ANEEL é o órgão responsável pela regulamentação e fiscalização desses índices, desde a geração, transmissão até a distribuição.

2.1 Desequilíbrio de Tensão

Um sistema com tensões equilibradas é aquele em que as três fases possuem o mesmo módulo de tensão e defasagem de 120° , conforme mostrado na figura 2:

Figura 2 - Diagrama Fasorial de Tensões Equilibradas



Fonte: O autor.

Porém essa condição nem sempre é respeitada, ocasionando os chamados desequilíbrios em um sistema elétrico. Esses desequilíbrios podem ser definidos como variações nos padrões trifásicos de um SEP, isto é, ocasiões em que as três fases apresentam módulos diferentes entre si, defasagem angular diferente de 120° ou ainda ambos os fatores simultaneamente.

“Dois tipos de desequilíbrio de uma rede são importantes: o desequilíbrio estrutural e o desequilíbrio funcional” (LIMA, 2016, p. 40). O primeiro é praticamente constante e se refere

as estruturas físicas dos equipamentos e linhas instalados, os quais farão com que haja um desequilíbrio no sistema, ainda que as cargas e correntes estejam perfeitamente equilibradas. Já o segundo ocorre de forma aleatória, uma vez que está ligado a conexão das cargas monofásicas, que por sua vez possuem ciclos de demanda variáveis.

As principais fontes causadoras de desequilíbrios nos sistemas elétricos são:

- Cargas monofásicas e bifásicas distribuídas de forma inadequada;
- Cargas trifásicas desequilibradas (forno a arco, por exemplo);
- Geração distribuída;
- Assimetria entre as impedâncias de cada fase do sistema, causada por transformadores assimétricos, linhas não transpostas e demais elementos sem simetria;
- Desequilíbrio na compensação de capacitores trifásicos, na maioria das vezes ocasionada por fusíveis queimados;
- Ligação delta aberto de transformadores.

Como medida de contorno para esses efeitos negativos algumas técnicas são usualmente aplicadas, como: chaveamento controlado de reatores, aplicação de reguladores monofásicos de tensão, redistribuição de cargas monofásicas e geração distribuída e utilização de compensadores passivos e estáticos.

Dessa feita, para realizar a análise de desequilíbrio de tensão em um sistema elétrico é necessário determinar o fator de desequilíbrio (FD) da mesma. Esse fator pode ser determinado através das técnicas mostradas a seguir neste capítulo.

2.1.1 Cálculos do desequilíbrio de tensão

Os fenômenos de desequilíbrio de tensão possuem característica de longa duração e podem ser analisados de quatro formas distintas, são elas: componentes simétricas, método de CIGRÉ, método de NEMA e o método do IEEE.

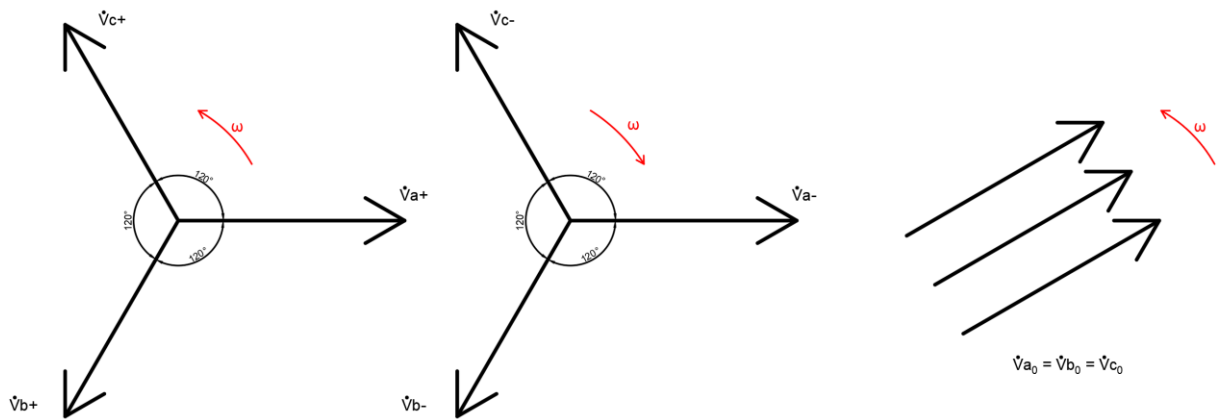
2.1.1.1 Componentes Simétricas

O método de análise de componentes simétricas foi apresentado pela primeira vez em 1918, por Charles LeGeyt Fortescue. Essa metodologia de análise consiste em dividir um sistema trifásico desequilibrado em três novos sistemas equilibrados, intitulados de sequências: positiva, negativa e zero. É importante ressaltar que essas componentes não existem fisicamente, visto que elas são apenas uma estratégia matemática para análise de um circuito

elétricos.

A primeira componente é representada por três fasores de mesmo módulo, com defasagem de 120° e sequência de fases igual a original do sistema. As componentes de sequência negativa também possuem módulos iguais entre si, defasagem de 120° , porém com sequência inversa a da anterior. Por fim, as componentes de sequência zero são representadas por três fasores com módulos e ângulos iguais. A figura 3 traz os dígramas fasoriais para cada uma das sequências abordadas no Teorema de Fortescue.

Figura 3 - Sequência de fases do Teorema de Fortescue



Fonte: o autor

As tensões nesse sistema podem ser encontradas através da seguinte matriz de decomposição:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{V}_{a0} \\ \dot{V}_{a+} \\ \dot{V}_{a-} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Consequentemente, para o cálculo de cada uma das tensões tem-se as relações:

$$\dot{V}_{a+} = \frac{(\dot{V}_a + a\dot{V}_b + a^2\dot{V}_c)}{3} \quad (2.2)$$

$$\dot{V}_{a-} = \frac{(\dot{V}_a + a^2\dot{V}_b + a\dot{V}_c)}{3} \quad (2.3)$$

$$\dot{V}_{a0} = \frac{(\dot{V}_a + \dot{V}_b + \dot{V}_c)}{3} \quad (2.4)$$

Para as demais fases basta usar as seguintes relações:

$$V_{b+} = a^2 V_{a+} \text{ ou } V_{c+} = a V_{a+} \quad (2.5)$$

$$V_{b-} = a V_{a-} \text{ ou } V_{c-} = a^2 V_{a-} \quad (2.6)$$

$$V_{c0} = V_{b0} = V_{a0} \quad (2.7)$$

Sendo:

a - $1 \angle 120^\circ$;

V_a - Tensão de Fase Va [V];

V_b - Tensão de Fase Vb [V];

V_c - Tensão de Fase Vc [V];

V_{a+} - Componente Simétrica de Sequência positiva da tensão Va [V];

V_{a-} - Componente Simétrica de Sequência negativa da tensão Va [V];

V_{a0} - Componente Simétrica de Sequência zero da tensão Va [V];

Através da análise das componentes simétricas mostrada é possível mensurar o fator de desequilíbrio através da equação:

$$FD = \frac{V_-}{V_+} \quad (2.8)$$

Em que o V_- representa a componente de sequência negativa da tensão, enquanto o V_+ representa a componente de sequência positiva. Essa mesma razão pode ser utilizada para encontrar o desequilíbrio entre as correntes de um sistema.

Esse método tem boa precisão e permite calcular de forma satisfatória um circuito elétrico desequilibrado, por isso, dentre os métodos apresentados neste trabalho esse é o mais aplicado, e ainda por ser a metodologia abordada nas normas de qualidade de energia elétrica da ANEEL.

Embora seja amplamente utilizado, o método de componentes simétricas envolve operações com números complexos, o que em algumas situações práticas do cotidiano pode não ser o ideal. De acordo com Lima (2016), uma forma análoga de encontrar o fator de desequilíbrio, sem uso de números complexos, se dá através da equação:

$$FD = 82 * \frac{\sqrt{V_{abe}^2 + V_{bce}^2 + V_{cae}^2}}{V_m} \quad (2.9)$$

Para a qual:

$$V_{abe} = V_{ab} - V_m \text{ [V];}$$

$$V_{bce} = V_{bc} - V_m \text{ [V];}$$

$$V_{cae} = V_{ca} - V_m \text{ [V];}$$

V_m - Média aritmética dos módulos das tensões de linha [V].

Essa é uma das alternativas que podem utilizadas para determinar o fator de desequilíbrio em um sistema. Existem ainda outras formas de determinar esse fator, essas metodologias serão enunciadas adiante.

2.1.1.2 Método de CIGRÉ

O Comitê Nacional Brasileiro de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (CIGRÉ-Brasil) é uma sociedade sem fins lucrativos, criada em 1971, com o objetivo de promover o desenvolvimento da engenharia no Brasil. Através do CIGRÉ, desenvolveu-se outra forma de mensurar o nível de desequilíbrio de um sistema, esse método é adotado nos Procedimentos de Distribuição da ANEEL (PRODIST) e no Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), e foi proposto pelo C04, através da seguinte equação:

$$FD = 100 \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (2.10)$$

Em que β é dado por:

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad (2.11)$$

Este equacionamento é apenas um desenvolvimento da expressão utilizada pelo método de componentes simétricas, todavia tem aplicação simplificada e mais prática, visto que faz uso apenas de valores de tensões de linha, sem necessidade de se conhecer os ângulos. Ainda que os cálculos sejam simplificados, esse método é uma excelente forma de se calcular o desequilíbrio, o que explica sua utilização pelos órgãos brasileiros.

2.1.1.3 Método de NEMA

“O método NEMA é definido como a relação entre o máximo desvio entre as tensões de linha e a média das tensões, e a média aritmética dos módulos das tensões” (LELES, 2008).

Para esse método o fator de desequilíbrio é definido pela equação:

$$FD = \frac{\Delta V}{V_m} * 100 \quad (2.12)$$

Em que:

ΔV - máximo desvio das tensões de linha em relação ao valor médio [V];

V_m - média aritmética dos módulos das tensões de linha [V].

2.1.1.4 Método do IEEE

Já o método do IEEE indica que o desequilíbrio de tensão pode ser encontrado pela relação entre a maior diferença das medições das tensões de linha medidas e o somatório delas.

Isto é:

$$FD = \frac{3(V_{m\acute{a}x} - V_{m\grave{i}n})}{V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}} \quad (2.13)$$

Para a qual:

$V_{m\acute{a}x}$ - Maior valor eficaz dos módulos das tensões de linha [V];

$V_{m\grave{i}n}$ - Menor valor eficaz dos módulos das tensões de linha [V];

V_{ab}, V_{bc}, V_{ca} - Módulos das tensões de linha [V].

2.1.2 Normas acerca de desequilíbrios de tensão

Para tratar de desequilíbrios existem diversas normas a nível nacional e internacional, nesta seção serão abordadas as normais mais relevantes e seus respectivos limites e cálculos, segundo Neves (2014).

2.1.2.1 IEC 61000-4-30

Essa norma elaborada no ano de 2008 indica que para medições de desequilíbrio deve-se utilizar equipamentos classe A e classe S, e o cálculos deverão ser realizados através do método das componentes simétricas. Essa norma não apresenta valores limites.

2.1.2.2 PRODIST - ANEEL

Segundo o módulo 8 do PRODIST, os limites de tensão são obtidos mediante um conjunto

1008 leituras válidas obtidas em intervalos consecutivos de 10 minutos cada, com exceção das que eventualmente sejam expurgadas. Para os cálculos de desequilíbrio o módulo 8 indica o uso de componentes simétricas ou, alternativamente, o método de CIGRÉ.

Os limites para os indicadores de tensão apresentados pelo PRODIST são:

Tabela 1 - Limites de Desequilíbrio de Tensão

| Indicador | Tensão Nominal | |
|-----------|-------------------------|-----------------------------------|
| | $V_n \leq 1,0\text{kV}$ | $1\text{kV} < V_n < 230\text{kV}$ |
| FD 95% | 3,0% | 2,0% |

Fonte: Módulo 8 – PRODIST

2.1.2.3 Procedimentos de Rede - ONS

O Operador Nacional do Sistema Elétrico, através do submódulo 2.9 dos Requisitos mínimos de qualidade de energia elétrica para acesso ou integração à Rede Básica (ONS, 2020), estabelece para os desequilíbrios um limite global de 2% e um limite individual é de 1,5%.

Para essa norma, os valores dos indicadores são obtidos da seguinte forma:

- Determina-se o valor do fator de desequilíbrio empregando o percentil 95, para o período de 1 dia (24 horas), considerando os valores dos indicadores integralizados em intervalos de 10 (dez) minutos;
- O valor do indicador corresponde ao maior entre os sete valores obtidos anteriormente, em base diária ao longo de 7 (sete) dias consecutivos.

“Os limites globais, obtidos por meio de campanha de medição, aplicam-se ao PAC. Da mesma forma, aplicam-se também ao PAC os limites individuais, determinados por meio de cálculos específicos para cada instalação” (ONS, 2020).

Em tempo, ainda é indicado que para casos em que as tensões de sequência negativa sofram variações intermitentes e repetitivas, é permitido que os limites sejam ultrapassados em até duas vezes, desde que o acumulado de tensões de sequência negativa, acima dos limites contínuos estabelecidos, não seja maior que 5% do período de monitoramento.

2.1.2.4 IEEE 1159-2009

As normas do IEEE, assim como o adotado no PRODIST, também sugerem o uso de componentes simétricas para cálculo do fator de desequilíbrio, podendo ser utilizado de forma

alternativa, a metodologia CIGRÉ. Esta norma cita que o fator de desequilíbrio é tipicamente menor que 3%, todavia não estabelece esse ou outro valor como limite.

2.1.2.5 NEMA MG1 2006

Por fim, a norma NEMA sugere o uso do seu próprio método para cálculo do fator de desequilíbrio, conforme mostrado no item 2.1.1.3. Assim como adotado no IEEE, ela não estabelece limite para o desequilíbrio, mas não recomenda que motores operem em uma condição de desequilíbrio maior que 5%.

3 EFEITOS DO DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO NO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

Conforme enunciado anteriormente, o MIT é um dos equipamentos mais utilizadas no setor industrial do Brasil e do mundo. Esse tipo de máquina é chamado de assíncrona, uma vez que a velocidade do rotor é diferente da velocidade do campo girante. Para esse tipo de motor existem duas topologias mais empregadas: gaiola de esquilo e rotor bobinado. A primeira, no entanto, é mais amplamente empregada por possuir vantagens como: menor custo, confiabilidade, robustez, durabilidade, ligação simples à rede, utilizável em qualquer ambiente, facilidade de controle e atende vários tipos de carga, todavia possui alta corrente de partida e apresenta baixo rendimento e fator de potência para cargas parciais.

Entretanto, essas características podem ser impactadas mediante a alimentação inadequada da máquina, fazendo com que a mesma apresente comportamentos anormais como sobreaquecimento, vibração, perda de velocidade e torque, entre outros. Conforme demonstrado no capítulo anterior, é possível notar que as tensões desequilibradas estão presentes nos SEP e podem causar diversos efeitos negativos, consequentemente gerando danos aos equipamentos elétricos alimentados por redes com tais características. Dentre esses efeitos negativos, é possível citar: má operação e surgimento de harmônicos não característicos em conversores estáticos, atuação desnecessária de relés de proteção, sobrecarga nos condutores de neutro, surgimento de diferença de potencial entre neutro e terra, etc.

Os MITs também são afetados pelos desequilíbrios de tensão e os principais efeitos negativos causados por esse efeito são:

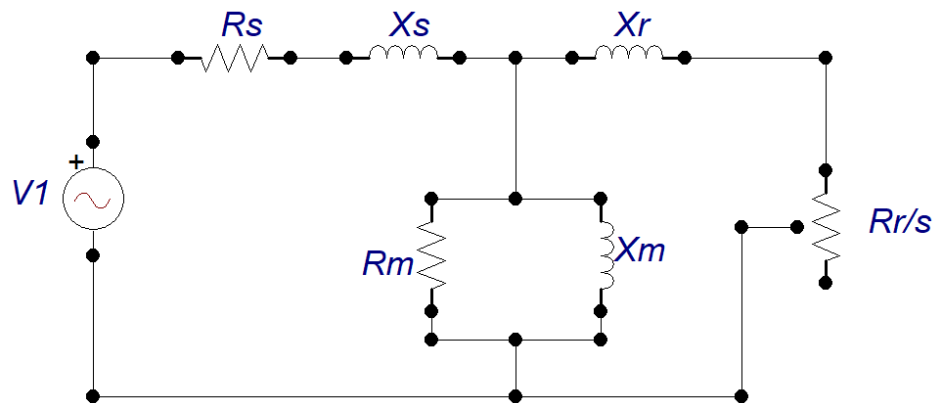
- Aumento de temperatura;
- Aumento da vibração;
- Aumento do tempo de partida;
- Oscilações de conjugado;
- Queda de rendimento;
- Redução na vida útil;
- Redução do conjugado médio;

Para elucidar a causa desses efeitos negativos ocasionados pelo desequilíbrio de tensão em um motor é necessário compreender como é feita a análise da operação dele diante de uma alimentação ideal e para uma alimentação não ideal.

3.1 Circuito Equivalente do Motor de Indução Trifásico

O MIT é uma máquina com funcionamento baseado em eletromagnetismo, entretanto para facilitar a análise do comportamento é feito um equivalente elétrico do circuito eletromagnético, esse circuito elétrico é conhecido como equivalente do motor.

Figura 4 - Circuito Equivalente por fase do Motor de Indução



Fonte: O autor

Sendo:

R_s – Resistência do estator;

R_r – Resistência do rotor;

R_m – Resistência do ramo magnetizante;

X_s – Reatância do estator;

X_r – Reatância do rotor;

X_m – Reatância de magnetização;

s - Escorregamento

O escorregamento (s) é dado pela equação:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (3.1)$$

Em que:

n_s – Velocidade síncrona de rotação, dada por: $n_s = \frac{120f}{pól os}$;

n – Velocidade de rotação;

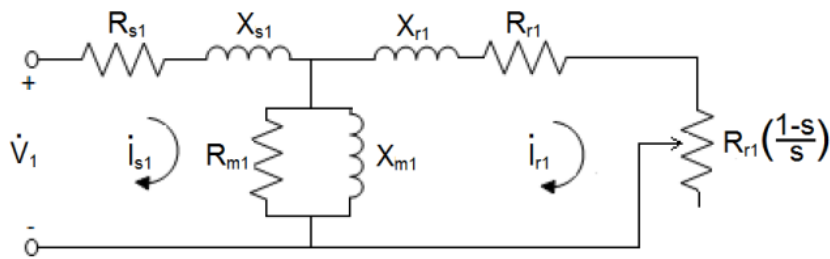
Esse circuito foi desenvolvido considerando condições normais de alimentação, isto é,

sem a presença de distorções harmônicas ou desequilíbrios de tensão. Para redes com esse tipo de alimentação “o convencional circuito equivalente do motor de indução não é conveniente, uma vez que devem ser considerados os efeitos das ordens harmônicas e tensões de sequência” (SEVERO, 2020, p.23).

3.2 Circuito Equivalente do MIT com Desequilíbrio de Tensão

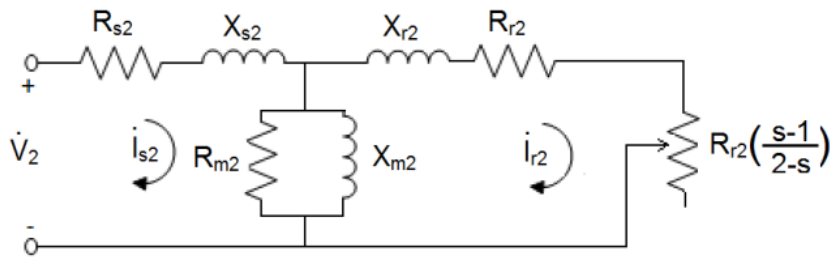
Conforme visto anteriormente neste trabalho, circuitos elétricos com tensões desequilibradas podem ser analisados através do método de componentes simétricas. Aplicando esse método para o circuito equivalente do MIT, com base em Neves (2014), tem-se:

Figura 5 - Circuito Equivalente por fase (sequência positiva)



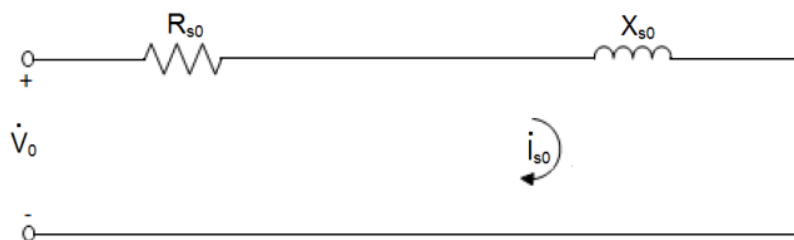
Fonte: Neves 2014, p. 31

Figura 6 - Circuito Equivalente por fase (sequência negativa)



Fonte: Neves 2014, p. 31

Figura 7 - Circuito Equivalente por fase (sequência zero)



Fonte: Neves 2014, p. 31

Em que:

R_m - Resistência de perdas no núcleo [Ω];

R_r - Resistência de dispersão do rotor [Ω];

R_s - Resistência de dispersão do estator [Ω];

X_m - Reatância de magnetização [Ω];

X_r - Reatância de dispersão do rotor [Ω];

X_s - Reatância de dispersão do estator [Ω];

\dot{I}_r - Corrente do rotor [A];

\dot{I}_s - Corrente do estator [A];

Um dos principais parâmetros de um motor é seu conjugado (ou torque), visto que é através dele que se sabe qual a carga a máquina é capaz de suportar. Conforme pode ser observado na figura 7, a componente de sequência zero não interfere no cálculo do conjugado de um MIT, uma vez que essa componente não é capaz de transpor o entreferro da máquina. Dessa feita, não há passagem de corrente de sequência zero para o rotor, logo, não há potência de saída vinculada a essa componente.

Conforme desenvolvido em Neves (2014), o torque de uma máquina com alimentação desbalanceada é dado pela soma dos torques obtidos para as sequências positiva e negativa, isto é:

$$T_1 = \frac{3V_1^2 k_1^2 R_{r1}}{s\omega_s} \quad (3.2)$$

$$T_2 = -\frac{3V_2^2 k_2^2 R_{r2}}{s\omega_s} \quad (3.3)$$

As constantes k_1 e k_2 são dadas por:

$$k_1 = \frac{\lambda}{\left[\frac{R_{r1}}{s} + jx_{r1} + \lambda\right] [R_{s1} + jx_{s1} + \lambda] - \lambda^2} \quad (3.4)$$

$$k_2 = \frac{\alpha}{\left[\frac{R_{r2}}{2-s} + jx_{r2} + \alpha\right] [R_{s2} + jx_{s2} + \alpha] - \alpha^2} \quad (3.5)$$

Em que:

λ – Impedância equivalente do ramo magnetizante (R_{m1}/X_{m1}) para sequência positiva;

α – Impedância equivalente do ramo magnetizante (R_{m2}/X_{m2}) para sequência negativa;

É possível notar que na equação 3.3, o torque é negativo, uma vez que as componentes de sequência negativa são responsáveis por gerar um torque contrário as componentes de sequência positiva, fazendo com que surja uma tendência de frenagem na máquina. O torque total de um MIT, para essa circunstância, é dado pela soma de T_1 e T_2 .

$$T_T = T_1 + T_2 = \frac{3V_1^2 k_1^2 R_{r1}}{s\omega_s} - \frac{3V_2^2 k_2^2 R_{r2}}{s\omega_s} \quad (3.5)$$

Outro aspecto importante de se conhecer em um MIT é sua potência de saída, pois é ela que indica a quantidade de trabalho que a máquina é capaz de entregar em seu eixo. Para tensões desequilibradas, assim como no torque, as potências são calculadas através das componentes positiva e negativa.

$$P_1 = 3V_1^2 k_1^2 R_{r1} \left[\frac{1-s}{s} \right] \quad (3.6)$$

$$P_2 = 3V_2^2 k_2^2 R_{r2} \left[\frac{s-1}{2-s} \right] \quad (3.7)$$

Dessa feita, a potência total de saída da máquina (P_{out}) é a soma das componentes P_1 e P_2 , decrescidas das perdas rotacionais da máquina (P_{AeV}), causadas pelo atrito e ventilação da mesma. Assim:

$$P_{out} = P_1 + P_2 - P_{AeV} = 3V_1^2 k_1^2 R_{r1} \left[\frac{1-s}{s} \right] + 3V_2^2 k_2^2 R_{r2} \left[\frac{s-1}{2-s} \right] - P_{AeV} \quad (3.8)$$

Sabendo que as perdas rotacionais são consideradas fixas e a potência de entrada (P_{in}) é dada pela equação:

$$P_{in} = 3(V_0 I_0 \cos \theta_0 + V_1 I_1 \cos \theta_1 + V_2 I_2 \cos \theta_2) \quad (3.9)$$

Com isso, é possível então determinar o rendimento (η) da máquina para a situação de alimentação desequilibrada como:

$$\eta [\%] = \frac{P_{out}}{P_{in}} * 100 \quad (3.10)$$

$$\eta [\%] = \frac{3V_1^2 k_1^2 R_{r1} \left[\frac{1-s}{s} \right] + 3V_2^2 k_2^2 R_{r2} \left[\frac{s-1}{2-s} \right] - P_{AeV}}{3(V_0 I_0 \cos \theta_0 + V_1 I_1 \cos \theta_1 + V_2 I_2 \cos \theta_2)} \quad (3.11)$$

As equações apresentadas são capazes de determinar os parâmetros para qualquer tipo de funcionamento do motor. Todavia, em muitos casos, assim como neste trabalho, o motor tem conexão delta, portanto, não haverá componentes de sequência zero na linha da máquina. Com isso, a equação 3.11 pode ser reduzida a:

$$\eta [\%] = \frac{3V_1^2 k_1^2 R_{r1} \left[\frac{1-s}{s} \right] + 3V_2^2 k_2^2 R_{r2} \left[\frac{s-1}{2-s} \right] - P_{AeV}}{3(I_1 \cos \theta_1 + V_2 I_2 \cos \theta_2)} \quad (3.12)$$

Diante das equações expostas é possível inferir, teoricamente, que a presença de desequilíbrios de tensão na alimentação de um motor de indução trifásico acarretará em alterações na sua operação. Com base nisso, serão desenvolvidos nos próximos capítulos estudos e aplicações práticas de acionamento de uma máquina alimentada por uma rede desequilibrada, visando validar as os estudos teóricos descritos neste capítulo.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

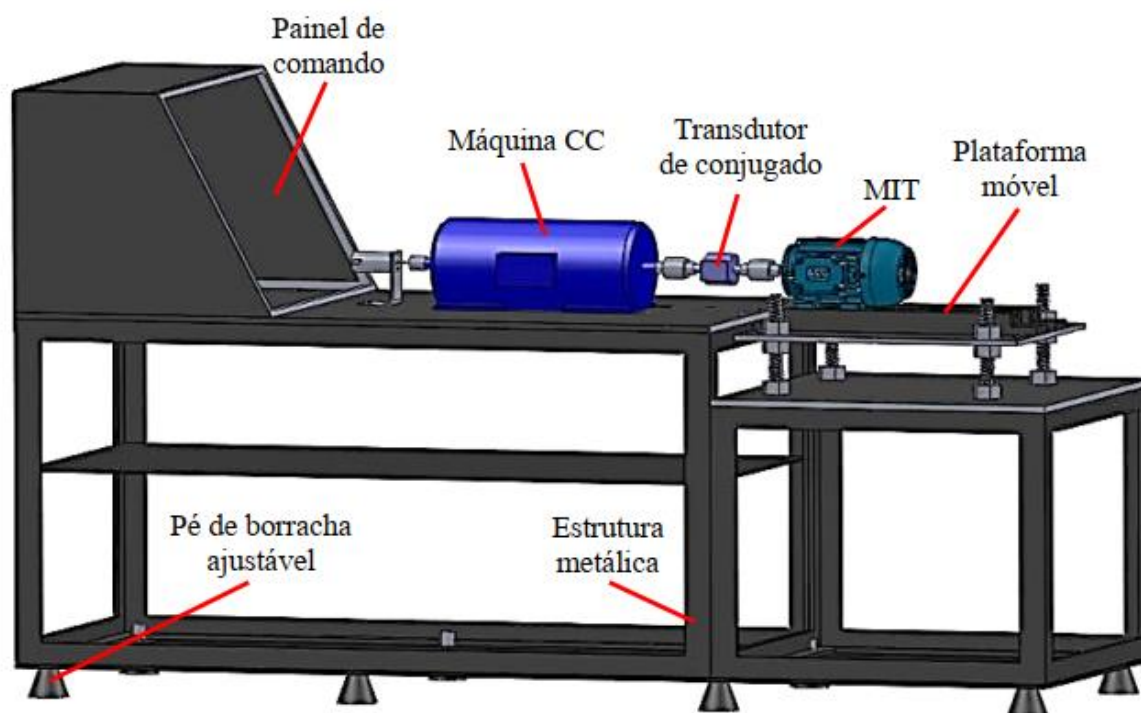
Para desenvolvimento do objetivo proposto neste trabalho foi utilizada a plataforma de ensaios existente no Laboratório de Acionamentos Elétricos (LAcE) da UFU, nela é possível realizar diversos ensaios e impor variadas condições de operação em uma máquina rotativa.

Neste trabalho, os ensaios ocorreram mediante a imposição de diferentes níveis de carga a um MIT, enquanto o mesmo foi alimentado por tensões desequilibradas. Para realizar as medições e controlar a alimentação utilizou-se a fonte programável instalada no laboratório. Todos os itens utilizados e a forma como foram empregados na execução do ensaio serão descritos adiante nesta seção.

4.1 Plataforma de Ensaio

A plataforma de ensaios presente no LAcE possibilita simular as mais diversas condições de carga que um motor elétrico pode estar submetido em suas diversas aplicações cotidianas. Além de impor carga, ela permite realizar medições e controle, possibilitando a realização de diversos estudos e análises acerca do funcionamento das máquinas elétricas rotativas. A bancada conta com sistema de proteção tanto para os operadores quanto para os equipamentos utilizados nos ensaios. A figura 8 apresenta os principais elementos presentes na bancada:

Figura 8 - Plataforma de Ensaio



Fonte: Alves 2018, p. 21

Uma visão geral da bancada, já montada para a realização dos ensaios deste trabalho, é mostrada na figura a seguir:

Figura 9 - Plataforma de ensaios utilizada



Fonte: O autor

Para completo funcionamento da bancada, outras ferramentas e dispositivos são necessários. Os principais deles serão descritos a seguir.

4.2 Fonte Programável

A fonte programável que faz a alimentação elétrica da bancada é um equipamento que conta com tecnologia avançada e alta eficiência, sendo capaz de fornecer em sua saída sinais elétricos puramente senoidais, sinais com desequilíbrios e distorções a escolha do operador. A fonte é do modelo CSW11100 e é fabricada pela AMETEK *Programmable Power* e suas principais características são apresentadas na tabela 2:

Tabela 2 - Parâmetros da fonte programável

| | |
|----------------------------|---|
| Marca | California Instruments |
| Modelo | CSW111000 |
| Tensão de entrada | 208 – 240 V_{RMS} |
| Tensão de saída (CA ou CC) | 0-156 V_{RMS} (FN) / 0-312 V_{RMS} (FN) |
| Corrente de saída | 32,16A (por fase) |
| Frequência de saída | CC, 40-5000Hz |

Fonte: O autor

Conforme mencionado, a fonte é capaz de oferecer ao operador uma tensão de saída com parâmetros de frequência, conteúdo harmônico e amplitudes ajustáveis. Ademais, através do *software* oferecido pelo fabricante, ou até mesmo do display existente na parte frontal da mesma, é possível realizar medições das grandezas elétricas na saída da fonte, como: tensão, corrente, potência, frequência, fator de potência. Essa característica de medição de grandezas foi de fundamental importância para a produção deste trabalho, conforme será explicado nos próximos tópicos.

Figura 10 - Fonte Programável AMETEK, modelo CSW11100



Fonte: O autor

4.3 Máquina de Corrente Contínua

Além da fonte de alimentação e da plataforma, é necessário também uma máquina para ser acoplada no MIT ensaiado e assim possibilitar a inserção de carga a ele. Na plataforma do laboratório essa máquina é de corrente contínua e suas características são dadas na tabela 3:

Tabela 3 - Parâmetros da máquina de corrente contínua

| | |
|----------------------|---------------|
| Fabricante | LAVILL |
| Potência | 3,3Kw (4,5cv) |
| Velocidade | 3600 rpm |
| Tensão de campo | 180V |
| Tensão de armadura | 180V |
| Corrente de armadura | 20,4A |

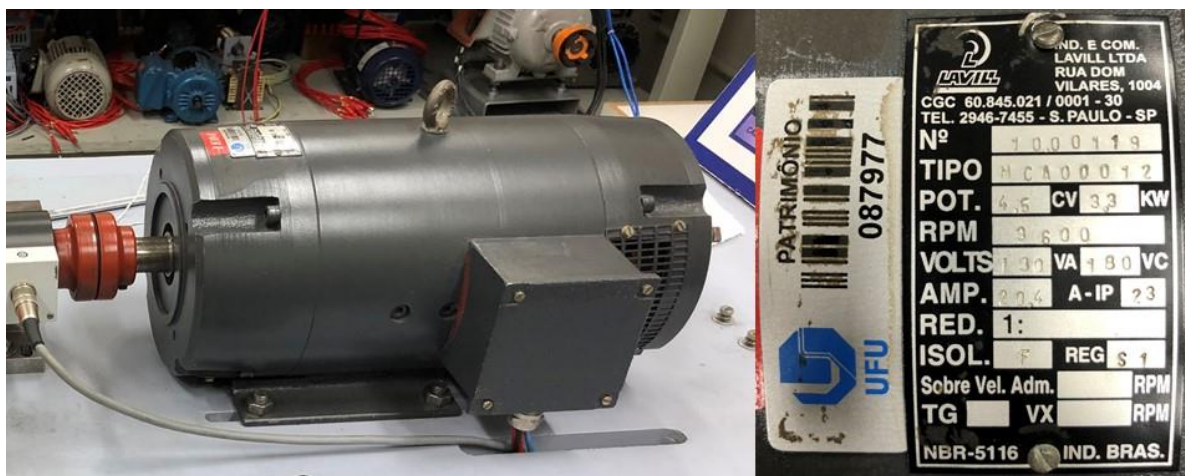
| | |
|-------------------|----------|
| Regime de serviço | S1 |
| Conjugado Nominal | 8,78 N.m |

Fonte: O autor

Uma máquina de corrente contínua pode ser ligada de várias maneiras distintas, dentre elas optou-se por aquela em que o campo é alimentado independente da armadura, e então impõe-se tensão nominal, cujo módulo para esse equipamento é 180 V. Com a ligação descrita, variando-se a resistência equivalente do banco, altera-se a corrente que circula pela armadura. Dessa feita, sabendo que o conjugado de uma máquina de corrente contínua é diretamente proporcional a corrente de armadura, é possível perceber que ao alterar os valores de resistências têm-se uma alteração direta no conjugado resistente imposto à máquina em ensaio.

Através desse equipamento e da técnica descrita, pode-se então impor variadas cargas a um motor de indução e então ensaiá-lo para essas condições.

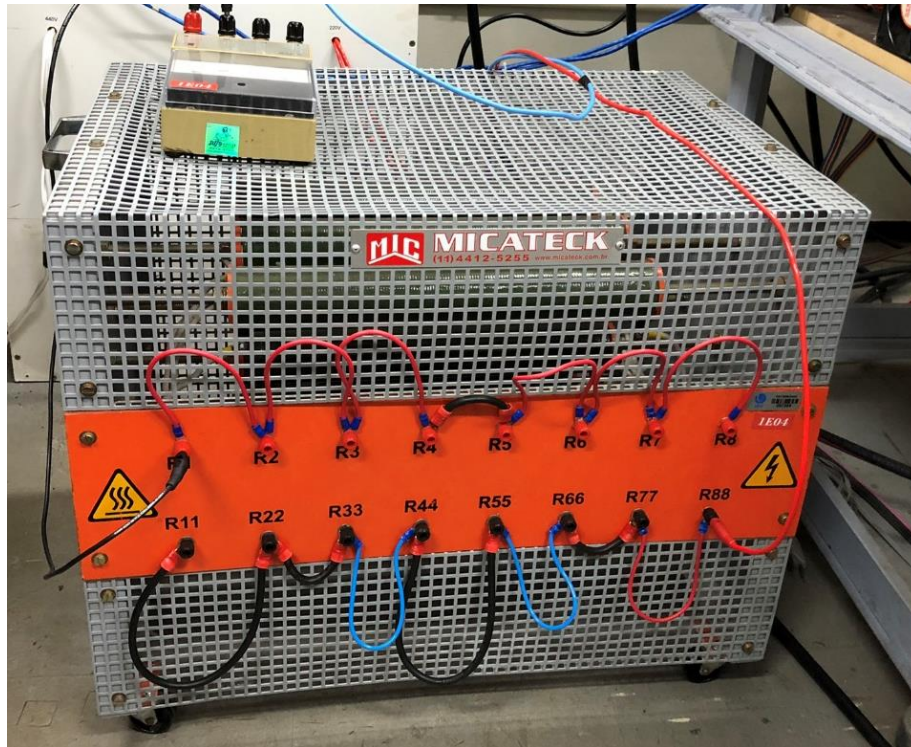
Figura 11 - Máquina de Corrente Contínua LAVILL



Fonte: O autor

Durante a realização dos ensaios, a máquina de corrente contínua é acionada mecanicamente no seu eixo pelo MIT que é objeto de ensaio, isso faz com que ela opere como um gerador, por isso a mesma foi conectada a um conversor CC-CC e a um banco de resistores que são responsáveis por dissipar a energia gerada pela MCC durante os ensaios. O banco de resistências existente no laboratório é composto por oito resistências capazes de dissipar uma potência máxima de 6,4kW.

Figura 12 - Banco de Resistências

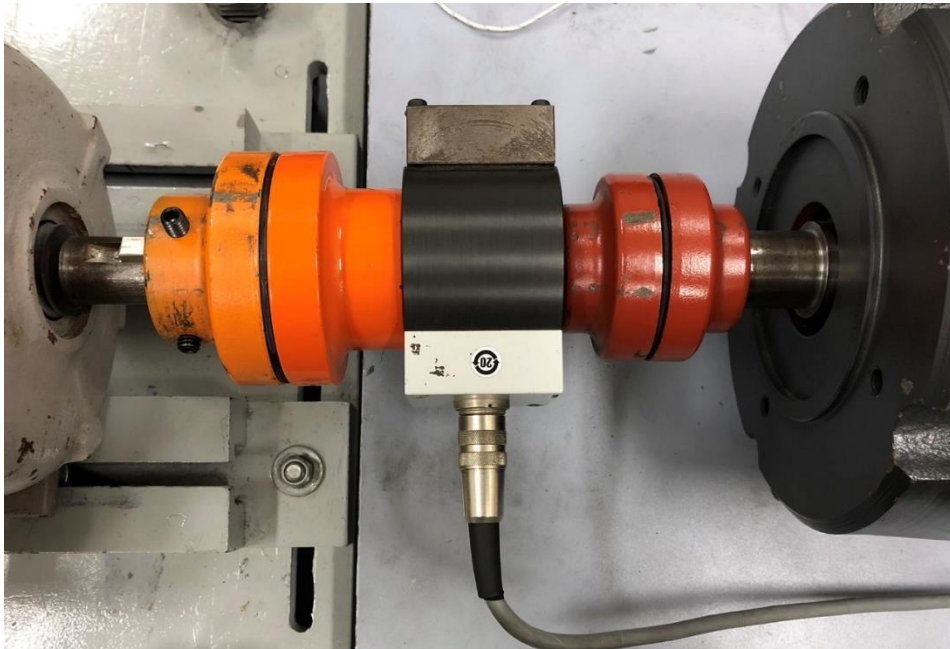


Fonte: O autor

4.4 Transdutor de Conjugado

No que tange a ensaios realizados em máquinas elétricas, a medição do torque entregue pela máquina em seu eixo é de suma importância para identificação dos resultados. Na bancada do LAcE, para tornar possível a medição do conjugado exercido pelo motor durante o ensaio, faz-se o uso de um dispositivo chamado transdutor de conjugado. Esse equipamento está instalado no ponto de acoplamento da máquina de corrente contínua (carga) e a máquina rotativa ensaiada. O transdutor instalado é fabricado pela HBM, modelo T22, e é capaz de medir conjugados de até 50N.m.

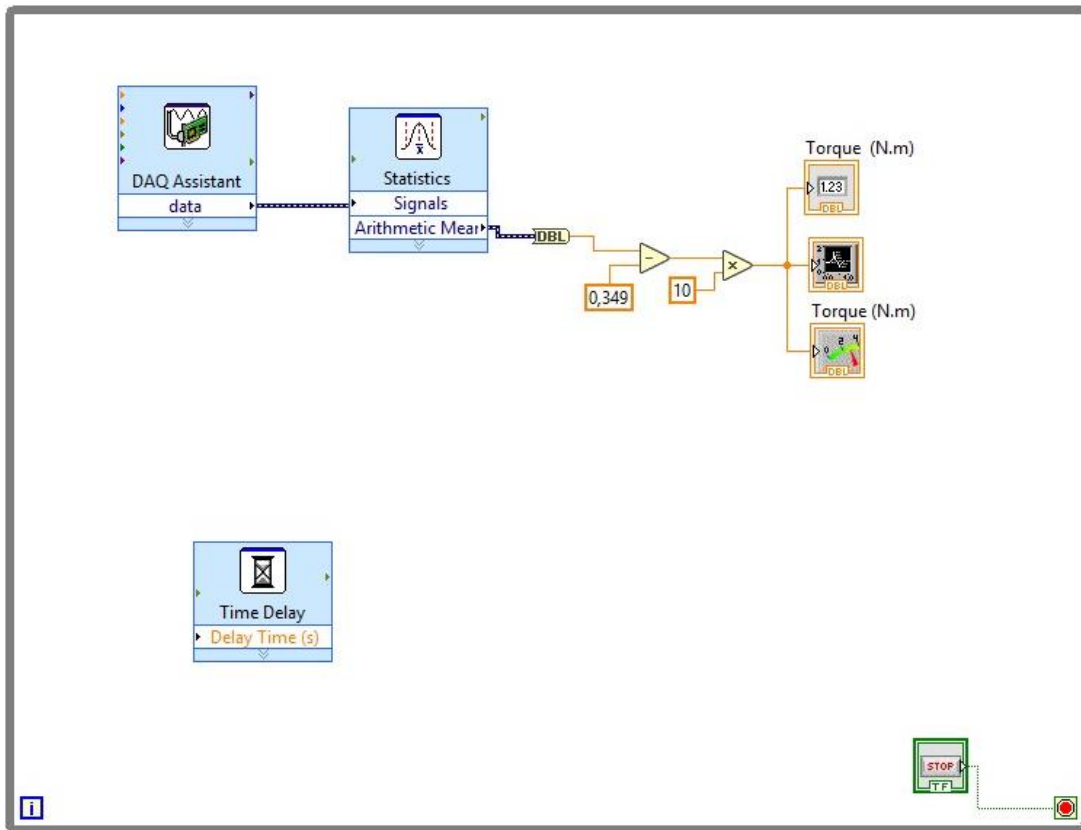
Figura 13 - Transdutor de conjugado T22



Fonte: O autor

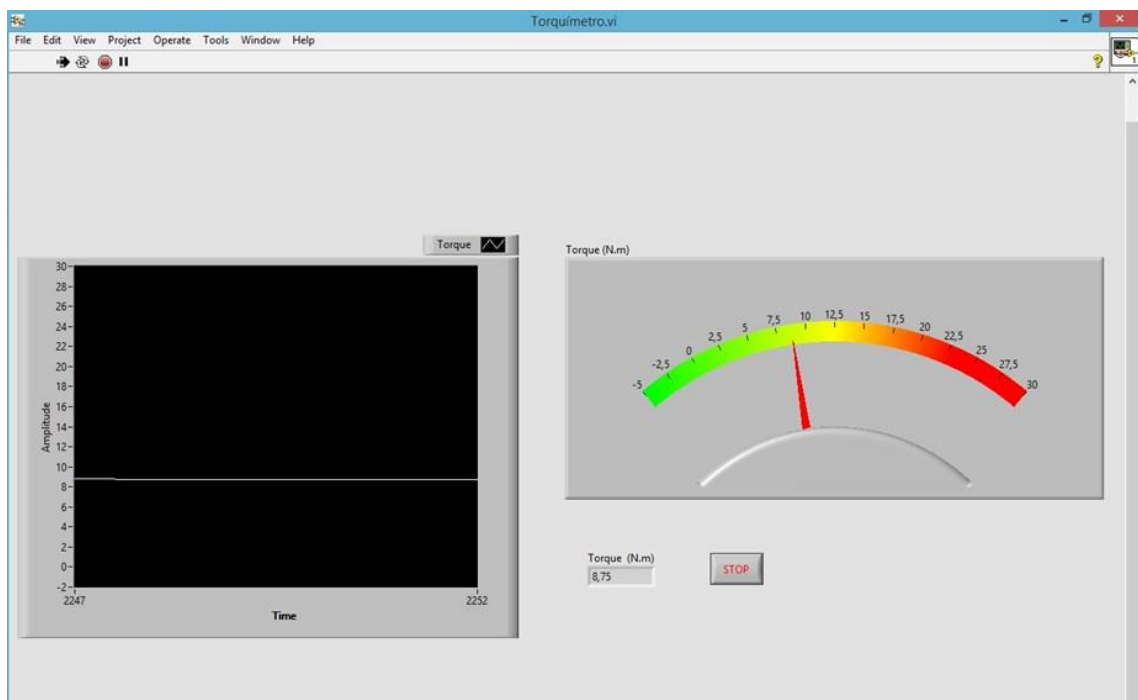
O transdutor coleta sinais de torque e produz uma saída de tensão correspondente ao valor medido, variando de -5V até +5V. Na bancada presente no laboratório, esse sinal é enviado para um computador e, através de um programa previamente desenvolvido no *software* LABView, consegue medir o torque desenvolvido pela máquina durante os ensaios. As figuras 14 e 15 mostram, respectivamente, o código do programa para realização da medição e a tela de medição onde os usuários retiram os resultados de torque medidos.

Figura 14 - Código para leitura de torque no LABView



Fonte: O autor

Figura 15 - Tela de leitura do torque



Fonte: O autor

4.5 Motor de Indução Trifásico

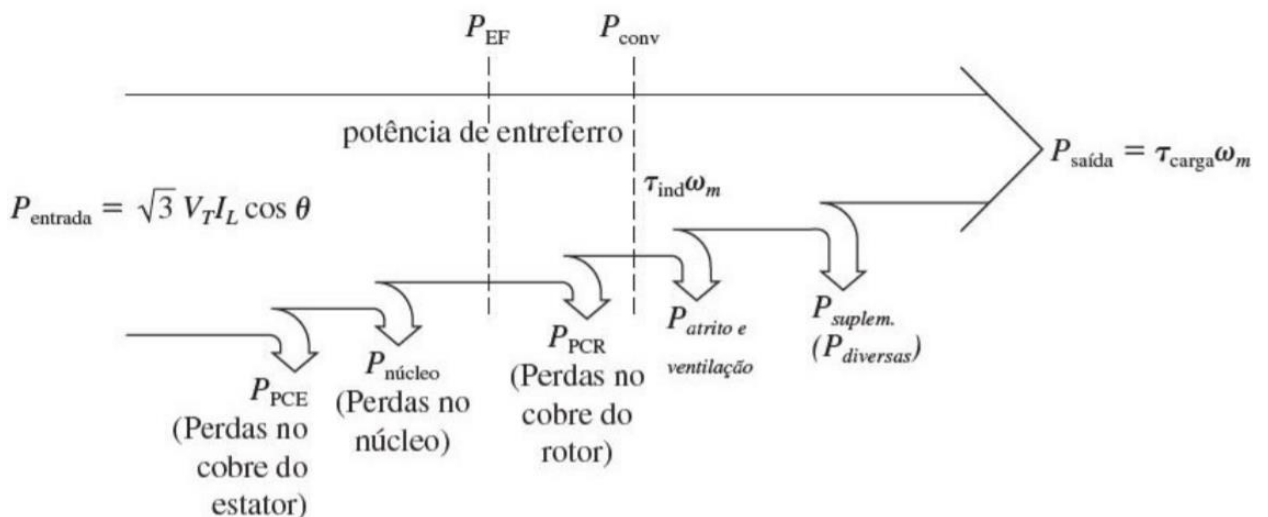
Conforme enunciado no item 3.1 o MIT é uma máquina com funcionamento baseado em eletromagnetismo. Sua operação ocorre a partir da circulação de corrente alternada pelos enrolamentos do estator, essa corrente é responsável por criar um campo magnético girante, o qual atravessa os condutores dos enrolamentos do rotor e então produzem movimento na máquina. A velocidade do campo girante é determinada pela frequência da rede que alimenta a máquina e pelo número de polos da mesma e pode ser dada pela equação 3.1 apresentada neste trabalho.

A velocidade do rotor da máquina é sempre menor que a velocidade do campo girante. A diferença entre a velocidade do rotor (n_r) e a velocidade do campo girante (n_s) é chamada de escorregamento, ele varia de 0 a 1, e pode ser calculado através da equação 3.1.

Através do escorregamento pode-se realizar diversas análises sobre uma máquina, o escorregamento máximo (ou igual a 1) é a condição em que a máquina se encontra com o eixo bloqueado, já o escorregamento zero indica que a máquina está operando à vazio e sua rotação tende a se igualar com a velocidade do campo girante.

Para se realizar análises sobre uma máquina utiliza-se o circuito elétrico equivalente mostrado na figura 4. Assim como todo equipamento eletromecânico, o motor de indução possui perdas internas, como no cobre dos enrolamentos, perdas magnéticas, entre outras. A figura 16 apresenta o fluxo de potência de uma máquina:

Figura 16 - Fluxo de Potência em um MIT



Fonte: CHAPMAN, 2013

Conforme mostrado na figura 16, é possível perceber que a potência de saída de uma

máquina pode ser determinada pela relação:

$$P_{saída} = \tau_{carga} * \omega_m \quad (4.2)$$

Onde:

τ_{carga} : é o torque medido no eixo do motor;

ω_m : é a velocidade medida no eixo do motor em rad/s.

Já a potência de entrada é dada pela equação:

$$P_{entrada} = \sqrt{3}V_T I_L \cos \theta \quad (4.3)$$

Conhecendo a potência de entrada e a potência de saída, é possível calcular o rendimento da máquina:

$$\eta(\%) = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} * 100 \quad (4.4)$$

Essa relação será a base utilizada nos ensaios deste trabalho, sendo que a potência de entrada poderá ser medida na fonte de alimentação, o torque e a velocidade da máquina também poderão ser medidos diretamente através do transdutor de conjugado mostrado no item 4.4 e de um tacômetro digital.

4.6 Montagem dos ensaios

No presente trabalho, almeja-se ensaiar uma máquina de indução operando em diferentes condições de desequilíbrio em sua alimentação. Para se atingir o objetivo proposto, o MIT foi ensaiado na plataforma de ensaios do LAcE e utilizou-se de toda a estrutura descrita anteriormente neste capítulo.

A alimentação do MIT foi realizada através da fonte programável, a qual possibilitou determinar os níveis de tensão e, conseqüentemente, o fator de desequilíbrio desejado. A fonte também possibilitou a realização da medição de tensão, corrente, potência e fator de potência vistos na alimentação do MIT, com isso pode-se conhecer os parâmetros de entrada da alimentação da máquina. O motor ensaiado foi acoplado a máquina de corrente contínua enunciada no item 4.3 e através do transdutor de conjugado mediu-se o torque no eixo durante

os ensaios. Conectou-se o banco de resistores à máquina de corrente contínua para dissipar a energia gerada pela mesma, uma vez que na condição imposta pelo ensaio, essa máquina opera como um gerador. A bancada não possui um sistema de medição da velocidade integrado, por isso a medida dessa grandeza foi realizada de forma externa a plataforma, através de um tacômetro digital. Dessa feita, de posse dos valores de torque e velocidade da máquina, fez-se possível determinar qual a potência a máquina estava entregando em seu eixo.

Assim, utilizando as técnicas descritas foi possível determinar as relações de potência de entrada e saída da máquina para as condições de desequilíbrio impostas e então estabelecer as variações de rendimento e características de operação durante os ensaios, através da equação 3.10.

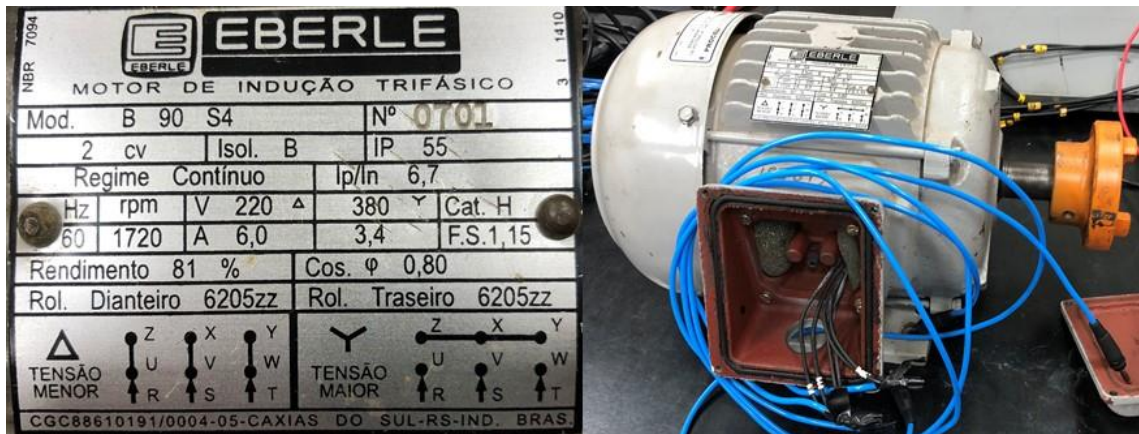
As principais características do MIT utilizado no ensaio são mostradas na tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros do MIT ensaiado

| | |
|---------------------------------|--------------------|
| Fabricante | EBERLE |
| Potência de saída | 2cv (1,471kW) |
| Tensão nominal (Δ/Y) | 220/380 V |
| Corrente Nominal (Δ/Y) | 6,0/3,4 A |
| Frequência | 60 Hz |
| Velocidade | 1720 rpm - 4 polos |
| Rendimento | 81% |
| Fator de Potência | 0,8 |
| I_p/I_n | 6,7 |
| Categoria | H |

Fonte: O autor

Figura 17 - MIT ensaiado



Fonte: O autor

O motor foi ensaiado para duas condições de desequilíbrio, na primeira delas o desequilíbrio foi causado apenas pela variação na amplitude da tensão. Os valores de tensão programados na fonte para essa condição são mostrados na tabela 5.

Tabela 5 – Tensões aplicadas no ensaio com desequilíbrio de amplitude

| Fase | A | B | C |
|--------------------|-----|------|------|
| Tensão nominal (V) | 127 | 133 | 120 |
| Ângulo de fase | 0° | 240° | 120° |

Para determinar os fatores de desequilíbrio, de acordo com os métodos enunciados no item 2 deste trabalho, é necessário realizar a composição das tensões acima para valores fase-fase, a tabela 6 apresenta os valores calculados.

Tabela 6 - Composição de tensões fase-fase – ensaio com desequilíbrio de amplitude

| Fase | V_{AB} | V_{BC} | V_{CA} |
|----------------------|----------|-----------|-----------|
| Tensão fase-fase (V) | 225,1866 | 219,2008 | 213,9369 |
| Ângulo de fase | 30,7633° | -91,6993° | 150,9374° |

Em posse das tensões de linha, pode-se então determinar os fatores de desequilíbrio para todos os métodos descritos na seção 2.1.1, os resultados estão descritos na tabela 7.

Tabela 7 - Fatores de desequilíbrio calculados – ensaio com desequilíbrio de amplitude

| Método | FD (%) |
|------------------------|--------|
| Componentes Simétricas | 2,966 |
| CIGRÉ | 2,966 |
| NEMA | 2,618 |
| IEEE | 5,127 |

Conforme é possível notar na tabela 7, com exceção do método do IEEE, todos os valores de fator de desequilíbrio calculados se mantiveram abaixo do limite de 3% estabelecido pelo PRODIST, isso faz com que os ensaios se aproximem da realidade de implantação das máquinas, uma vez que os locais de uso tendem a seguir as normas vigentes no país.

A segunda situação de desequilíbrio que o motor esteve exposto foi causada pela variação dos ângulos de fase da tensão, enquanto os módulos das tensões se mantiveram constantes e iguais a condição ideal, isto é, 127V. Para imposição dessa situação programou-se na fonte a alimentação as tensões descritas na tabela 8.

Tabela 8 – Tensões aplicadas no ensaio com desequilíbrio de ângulo de fase

| Fase | A | B | C |
|--------------------|-----|------|------|
| Tensão nominal (V) | 127 | 127 | 127 |
| Ângulo de fase | 0° | 237° | 124° |

Novamente, para determinar os valores de fator de desequilíbrio para os métodos apresentados, é necessário realizar a composição das tensões em valores de linha e em seguida proceder os cálculos mostrados na seção 2. As tabelas 9 mostra os valores de tensão de fase-fase encontrados para essa condição de desequilíbrio, já a figura 10 traz os fatores de desequilíbrio calculados para cada método.

Tabela 9 - Composição de tensões fase-fase – ensaio com desequilíbrio de ângulo de fase

| Fase | V_{AB} | V_{BC} | V_{CA} |
|------|----------|----------|----------|
|------|----------|----------|----------|

| | | | |
|----------------------|----------|----------|----------|
| Tensão fase-fase (V) | 223,2195 | 211,8070 | 224,2687 |
| Ângulo de fase | 28,50° | -89,50° | 152° |

Tabela 10 - Fatores de desequilíbrio – ensaio com desequilíbrio de ângulo de fase

| Método | FD (%) |
|------------------------|--------|
| Componentes Simétricas | 3,602 |
| CIGRÉ | 3,602 |
| NEMA | 2,049 |
| IEEE | 5,670 |

Diante dos resultados obtidos na tabela 10, nota-se que os valores do fator de desequilíbrio estão ligeiramente acima do limite de 3% estabelecido pelo PRODIST para os métodos de Componentes Simétricas e CIGRÉ. Já os cálculos realizados pelo método de NEMA o fator esteve abaixo do permitido pelo PRODIST. Para o método do IEEE, novamente o valor encontrado destoou dos demais e esteve acima do permitido.

Conforme é possível notar nas tabelas 7 e 10, o cálculo do fator de desequilíbrio pelos métodos de Componentes Simétricas e CIGRÉ resultam em valores iguais. Dessa forma, embora o método de Componentes Simétricas seja adotado como referência nas normativas nacionais, “o método CIGRÉ pode ser amplamente utilizado com a vantagem de ter grande simplicidade de implementação em equipamentos de medição, pelo fato de utilizar apenas as tensões de linha da rede monitorada.” (MACEDO, 2011, p.6)

5 ESTUDO DE CASO

Considerando os materiais e métodos descritos no capítulo anterior, bem como as condições de desequilíbrio, ensaiou-se então o motor mostrado na figura 17 para quatro condições de carga distintas, tornando possível comparar as variações de comportamento da máquina sob óticas de diferentes cargas impostas no seu eixo.

Para todas as condições de carga ensaiadas, primeiramente realizou-se o ensaio com a máquina operando em alimentação ideal, isto é, tensões com módulos iguais a 127V e defasadas em 120° entre si. Com isso obteve-se os valores de referência para operação do MIT mediante determinada carga aplicada em seu eixo. É importante ressaltar que os valores medidos pela fonte são grandezas de fase, todavia a máquina foi conectada em Δ , e alimentada corretamente conforme indicado na sua placa mostrada na figura 17.

5.1 Ensaio motor operando com 110% da carga nominal

O primeiro ensaio foi realizado para o MIT operando com uma sobrecarga de 10%. Nessa situação os valores de referência encontradas através da operação com condições ideais são mostrados 11.

Tabela 11 - Ensaio 110% de carga e alimentação nominal

| Ideal | | | |
|-----------------------------|----------|---------|---------|
| | Fase A | Fase B | Fase C |
| Tensão (V) | 126,990 | 126,990 | 126,990 |
| Corrente (A) | 6,597 | 6,627 | 6,469 |
| Potência de entrada (kW) | 0,676 | 0,670 | 0,659 |
| FP | 0,800 | 0,790 | 0,800 |
| velocidade (rpm) | 1729,000 | | |
| Conjugado (N.m) | 8,780 | | |
| Potência total entrada (kW) | 2,005 | | |
| Potência de saída (kW) | 1,589 | | |

Para essa situação de carga e operando com os desequilíbrios estabelecidos inicialmente na seção anterior, o motor apresentou os seguintes resultados:

Tabela 12 - Ensaio 110% de carga e alimentação desequilibrada

| 3 % (amplitude) | | | | 3% (ângulo) | | | |
|-----------------|---------|---------|---------|-------------|---------|---------|---------|
| | Fase A | Fase B | Fase C | | Fase A | Fase B | Fase C |
| Tensão (V) | 126,990 | 133,000 | 120,000 | Tensão (V) | 126,990 | 127,000 | 126,990 |

| | | | | | | | |
|-----------------------------|----------|-------|-------|-----------------------------|----------|-------|-------|
| Corrente (A) | 6,952 | 7,541 | 5,319 | Corrente (A) | 7,958 | 5,715 | 6,124 |
| Potência de entrada (kW) | 0,792 | 0,731 | 0,486 | Potência de entrada (kW) | 0,794 | 0,515 | 0,692 |
| FP | 0,890 | 0,700 | 0,760 | FP | 0,780 | 0,700 | 0,890 |
| velocidade (rpm) | 1728,000 | | | velocidade (rpm) | 1728,000 | | |
| Conjugado (N.m) | 8,590 | | | Conjugado (N.m) | 8,460 | | |
| Potência total entrada (kW) | 2,009 | | | Potência total entrada (kW) | 2,001 | | |
| Potência de saída (kW) | 1,554 | | | Potência de saída (kW) | 1,530 | | |

Na operação em condição normal de alimentação nota-se que o fator de potência do motor foi extremamente próximo ao destacado na placa da máquina, ainda que a condição de carga estivesse acima da nominal. Por outro lado, nota-se também que diante das condições de operação com alimentação desequilibrada o FP varia para cada fase.

Diante disso, nota-se um desbalanço entre as correntes das fases, fato que deve ser destacado especialmente nos casos em que essa corrente apresenta valores elevados em relação a nominal da máquina. Neste ensaio o motor entrou em zonas de operações críticas, em que a corrente, em uma das fases, chegou a 7,541A e 7,958A, valores que superam o nominal da máquina 26% e 32%, respectivamente. Essa elevação de corrente pode causar diversos efeitos negativos para o MIT, entre eles destaca-se a elevação térmica dos enrolamentos, especialmente nos eventuais casos que as proteções das máquinas não atuem de forma correta e esse desbalanço se mantenha por um período de tempo elevado.

Para essa condição de operação, também é possível perceber que a velocidade da máquina está bem próxima da nominal e que a alimentação desequilibrada não teve impacto significativo na velocidade do motor. No ensaio com desequilíbrio em amplitude, registrou-se uma perda de 2,16% no conjugado desenvolvido pela máquina em relação a alimentação ideal. Já para o ensaio com desequilíbrio nos ângulos das fases essa perda chegou a 3,64%.

Conhecendo os valores medidos para os ensaios nessas duas condições de alimentação, pode-se então determinar as potências medidas no eixo e compará-las com a potência de entrada. É válido ressaltar que a potência calculada no eixo através da equação 4.3 resulta em uma potência trifásica, portanto, deve-se considerar para a potência de entrada a somatória da potência das três fases medida na fonte de alimentação. Dessa feita, para a condição de operação com 10% de sobrecarga, tem-se os seguintes resultados de potência e rendimento (η):

Tabela 13 - Rendimentos para ensaio com 110% de carga

| Condição | Pot. Saída (W) | Pot. Entrada (W) | η (%) | $\Delta\eta$ (%) |
|----------------|----------------|------------------|------------|------------------|
| Ideal | 1589,71081 | 2005,00000 | 79,28732 | - |
| 3% (amplitude) | 1554,40978 | 2009,00000 | 77,37231 | 1,91501 |
| 3% (ângulo) | 1530,88553 | 2001,00000 | 76,50602 | 2,78130 |

No que tange ao rendimento do MIT nessa condição, percebe-se que para a operação com alimentação ideal o rendimento ficou abaixo do indicado na placa da máquina, o que pode ser explicado pela sobrecarga imposta na mesma, acarretando na circulação de correntes maiores que as nominais, logo, aumentando as perdas na máquina e reduzindo seu rendimento. Da mesma forma, diante da imposição de tensões com o desequilíbrio causada pela variação do módulo, nota-se que o rendimento máquina foi 1,92% menor que para alimentação ideal, enquanto para o desequilíbrio no ângulo a queda no rendimento chegou a 2,78%, conforme mostrado na última coluna da tabela 13.

5.2 Ensaio motor operando com carga nominal

O segundo ensaio foi realizado para o MIT acionando sua carga nominal. Nessa situação os valores de referência encontrados através da operação com condições ideais de alimentação são mostrados na tabela a seguir:

Tabela 14 - Ensaio com carga e alimentação nominais

| Ideal | | | |
|-----------------------------|----------|---------|---------|
| | Fase A | Fase B | Fase C |
| Tensão (V) | 126,990 | 126,990 | 126,990 |
| Corrente (A) | 6,076 | 6,214 | 6,006 |
| Potência de entrada (kW) | 0,613 | 0,615 | 0,594 |
| FP | 0,790 | 0,780 | 0,770 |
| velocidade (rpm) | 1734,000 | | |
| Conjugado (N.m) | 8,100 | | |
| Potência total entrada (kW) | 1,822 | | |
| Potência de saída (kW) | 1,470 | | |

Para essa situação de carga e operando com os desequilíbrios propostos neste trabalho, o motor apresentou os seguintes resultados:

Tabela 15 - Ensaio com carga nominal e alimentação desequilibrada

| 3 % (amplitude) | | | | 3% (ângulo) | | | |
|-----------------------------|----------|---------|---------|-----------------------------|----------|---------|---------|
| | Fase A | Fase B | Fase C | | Fase A | Fase B | Fase C |
| Tensão (V) | 126,990 | 133,000 | 120,000 | Tensão (V) | 126,990 | 127,000 | 127,000 |
| Corrente (A) | 6,438 | 7,130 | 4,919 | Corrente (A) | 7,469 | 5,394 | 5,648 |
| Potência de entrada (kW) | 0,728 | 0,672 | 0,430 | Potência de entrada (kW) | 0,737 | 0,472 | 0,628 |
| FP | 0,890 | 0,710 | 0,720 | FP | 0,770 | 0,680 | 0,870 |
| velocidade (rpm) | 1732,000 | | | velocidade (rpm) | 1733,000 | | |
| Conjugado (N.m) | 7,960 | | | Conjugado (N.m) | 7,900 | | |
| Potência total entrada (kW) | 1,830 | | | Potência total entrada (kW) | 1,837 | | |
| Potência de saída (kW) | 1,444 | | | Potência de saída (kW) | 1,434 | | |

Para a condição de operação com alimentação ideal nota-se que o fator de potência do motor foi ligeiramente inferior ao informado na placa da máquina, ainda que a condição de carga estivesse muito próxima a nominal. Outra vez nota-se que diante das condições de operação com alimentação desequilibrada o FP variou para cada fase.

Como consequência da oscilação do FP, tem-se correntes também desbalanceadas entre as fases. Esse desbalanço deve novamente ser destacado, visto que a corrente apresentou valores elevados em relação a nominal da máquina, ainda que não houvesse sobrecarga em seu eixo. Nestes ensaios a corrente do motor chegou a 7,130A e 7,469A, valores que estão, respectivamente, 18% e 25% acima da nominal máquina, ainda que ela esteja acionando sua carga nominal. Assim como citado no tópico anterior, essa elevação de corrente pode comprometer a integridade da máquina.

Nessa condição de operação, também é possível perceber que a velocidade da máquina está próxima da nominal e que a alimentação desequilibrada não teve impacto significativo na velocidade do motor. Para o ensaio com desequilíbrio em amplitude, registrou-se uma perda de apenas 1,73% no conjugado desenvolvido pela máquina em relação a alimentação ideal. Já para o ensaio com desequilíbrio nos ângulos das fases essa perda chegou a 2,47%.

Conhecendo os valores medidos para o ensaio nessa condição de carga e para as duas condições de alimentação desequilibrada, pode-se novamente determinar as potências medidas no eixo e compará-las com a potência de entrada. Logo, para a condição de operação com carga nominal, tem-se os seguintes resultados:

Tabela 16 - Rendimentos para ensaio com carga nominal

| Condição | Pot. Saída (W) | Pot. Entrada (W) | η (%) | $\Delta\eta$ (%) |
|-----------------|----------------|------------------|------------|------------------|
| Ideal | 1470,83085 | 1822,00000 | 80,72617 | |
| 3 % (amplitude) | 1443,74194 | 1830,00000 | 78,89300 | 1,83317 |
| 3 % (ângulo) | 1433,68675 | 1837,00000 | 78,04501 | 2,68117 |

Com relação ao rendimento do MIT nesse ensaio percebe-se que, mesmo diante da condição de carga nominal, o rendimento da máquina ficou ligeiramente abaixo do indicado na placa. Já com imposição de tensões com o desequilíbrio causada pela variação do módulo, nota-se que o rendimento máquina foi 1,83% menor que para alimentação ideal, enquanto para o desequilíbrio no ângulo a queda no rendimento chegou a 2,68%, conforme mostrado na última coluna da tabela 16.

5.3 Ensaio motor operando com 90% da carga nominal

O terceiro ensaio foi realizado para o MIT operando com 90% da sua carga nominal. Nessa situação os valores de referência encontradas através da operação com condições ideais são mostrados 17.

Tabela 17 - Ensaio 90% de carga e alimentação nominal

| Ideal | | | |
|-----------------------------|----------|---------|---------|
| | Fase A | Fase B | Fase C |
| Tensão (V) | 127,000 | 127,000 | 127,000 |
| Corrente (A) | 5,417 | 5,538 | 5,351 |
| Potência de entrada (kW) | 0,515 | 0,515 | 0,496 |
| FP | 0,750 | 0,730 | 0,730 |
| velocidade (rpm) | 1745,000 | | |
| Conjugado (N.m) | 6,800 | | |
| Potência total entrada (kW) | 1,526 | | |
| Potência de saída (kW) | 1,242 | | |

Para essa situação de carga e operando com os desequilíbrios, o motor apresentou os seguintes resultados:

Tabela 18 - Ensaio 90% de carga e alimentação desequilibrada

| 3 % (amplitude) | | | | 3% (ângulo) | | | |
|-----------------|---------|---------|---------|-------------|---------|---------|---------|
| | Fase A | Fase B | Fase C | | Fase A | Fase B | Fase C |
| Tensão (V) | 126,990 | 133,000 | 120,000 | Tensão (V) | 126,990 | 127,000 | 126,990 |

| | | | | | | | |
|-----------------------------|----------|-------|-------|-----------------------------|----------|-------|-------|
| Corrente (A) | 5,721 | 6,489 | 4,330 | Corrente (A) | 6,814 | 4,846 | 4,980 |
| Potência de entrada (kW) | 0,629 | 0,577 | 0,342 | Potência de entrada (kW) | 0,632 | 0,373 | 0,538 |
| FP | 0,860 | 0,650 | 0,660 | FP | 0,730 | 0,600 | 0,850 |
| velocidade (rpm) | 1745,000 | | | velocidade (rpm) | 1745,000 | | |
| Conjugado (N.m) | 6,720 | | | Conjugado (N.m) | 6,620 | | |
| Potência total entrada (kW) | 1,548 | | | Potência total entrada (kW) | 1,543 | | |
| Potência de saída (kW) | 1,228 | | | Potência de saída (kW) | 1,210 | | |

Na operação sem desequilíbrios na alimentação nota-se que o fator de potência do motor está abaixo do informado na placa da máquina, isso se dá pela carga aplicada no eixo estar abaixo da nominal. Novamente, nota-se também que diante das condições de operação com alimentação desequilibrada o FP varia para cada fase, conseqüentemente, têm-se correntes também desbalanceadas entre as fases. Todavia para uma carga abaixo da nominal a maior corrente registrada no ensaio foi 6,814A, valor que ultrapassa a nominal da máquina em 13,57%. Essa sobrecorrente pode causar elevação térmica na máquina, porém com menor intensidade se comparada com as correntes obtidas nos ensaios anteriores.

Para essa condição de operação, também é possível perceber que a velocidade da máquina está acima da nominal, devido a carga do motor ser menor que a imposta nos ensaios anteriores, todavia a alimentação desequilibrada não teve impacto significativo na velocidade do motor. Para o ensaio com desequilíbrio em amplitude, registrou-se uma perda de apenas 1,18% no conjugado desenvolvido pela máquina em relação a alimentação ideal. Já para o ensaio com desequilíbrio nos ângulos das fases essa perda chegou a 2,65%.

Conhecendo os valores medidos para o ensaio nessa condição de cargas e para as diferentes condições de alimentação, pode-se então determinar as potências medidas no eixo e compará-las com a potência de entrada. Dessa feita, para a condição de operação em 90% da nominal, tem-se os seguintes resultados:

Tabela 19 - Rendimentos para ensaio com 90% de carga

| Condição | Pot. Saída (W) | Pot. Entrada (W) | η (%) | $\Delta\eta$ (%) |
|-----------------|----------------|------------------|------------|------------------|
| Ideal | 1242,60461 | 1526,00000 | 81,42887 | |
| 3 % (amplitude) | 1227,98574 | 1548,00000 | 79,32724 | 2,10163 |
| 3 % (ângulo) | 1209,01889 | 1543,00000 | 78,35508 | 3,07379 |

O rendimento do MIT nesse ensaio, diante da condição de carga abaixo da nominal, ficou dentro da faixa indicada na placa. Todavia, diante da imposição de tensões com o desequilíbrio

causada pela variação do módulo, nota-se que o rendimento máquina foi 2,10% menor que para alimentação ideal, enquanto para o desequilíbrio no ângulo a queda no rendimento chegou a 3,07%, conforme mostrado na última coluna da tabela 19.

5.4 Ensaio motor operando com 80% da carga nominal

No último ensaio realizado o MIT foi colocado em operação com uma carga 20% menor que sua nominal. Nessa situação os valores de referência encontradas através da operação com condições ideais são mostrados na tabela 20.

Tabela 20 - Ensaio 80% de carga e alimentação nominal

| Ideal | | | |
|-----------------------------|----------|---------|---------|
| | Fase A | Fase B | Fase C |
| Tensão (V) | 127,000 | 127,000 | 127,000 |
| Corrente (A) | 4,869 | 5,006 | 4,800 |
| Potência de entrada (kW) | 0,427 | 0,427 | 0,407 |
| FP | 0,680 | 0,670 | 0,660 |
| velocidade (rpm) | 1756,000 | | |
| Conjugado (N.m) | 5,560 | | |
| Potência total entrada (kW) | 1,261 | | |
| Potência de saída (kW) | 1,022 | | |

Para essa situação de carga e operando com os desequilíbrios estabelecidos inicialmente nesta seção, o motor apresentou os seguintes resultados:

Tabela 21 - Ensaio 80% de carga e alimentação desequilibrada

| 3 % (amplitude) | | | | 3% (ângulo) | | | |
|-----------------------------|----------|---------|---------|-----------------------------|----------|---------|---------|
| | Fase A | Fase B | Fase C | | Fase A | Fase B | Fase C |
| Tensão (V) | 126,990 | 133,000 | 120,000 | Tensão (V) | 126,990 | 127,000 | 126,990 |
| Corrente (A) | 5,137 | 5,943 | 3,835 | Corrente (A) | 6,217 | 4,393 | 4,388 |
| Potência de entrada (kW) | 0,542 | 0,465 | 0,264 | Potência de entrada (kW) | 0,543 | 0,286 | 0,451 |
| FP | 0,830 | 0,580 | 0,570 | FP | 0,670 | 0,510 | 0,810 |
| velocidade (rpm) | 1756,000 | | | velocidade (rpm) | 1756,000 | | |
| Conjugado (N.m) | 5,400 | | | Conjugado (N.m) | 5,380 | | |
| Potência total entrada (kW) | 1,271 | | | Potência total entrada (kW) | 1,280 | | |
| Potência de saída (kW) | 0,993 | | | Potência de saída (kW) | 0,989 | | |

Na operação em condição ideal de alimentação nota-se que o fator de potência do motor está abaixo do informado na placa da máquina, isso se dá pela carga aplicada no eixo ser 20% menor que a nominal. Outra vez, nota-se também que diante das condições de operação com alimentação desequilibrada o FP varia para cada fase, conseqüentemente, têm-se correntes também desbalanceadas entre as fases. Porém, para uma carga tão abaixo da nominal a maior corrente no ensaio ultrapassou a informada na placa da máquina em apenas 3%, fato que passa praticamente despercebido pela máquina, visto que o MIT é um equipamento elétrico robusto.

Para essa condição de operação, também é possível perceber que a velocidade do motor está bem acima da nominal, devido a carga do MIT ser menor que a imposta nos ensaios anteriores, todavia a alimentação desequilibrada não teve impacto significativo na velocidade do motor. Para o último ensaio com desequilíbrio em amplitude, registrou-se uma perda de 2,88% no conjugado desenvolvido pela máquina em relação a alimentação ideal. Já para o ensaio com desequilíbrio nos ângulos das fases essa perda chegou a 3,24%.

Conhecendo os valores medidos para o ensaio nessa condição de cargas e para as diferentes condições de alimentação, pode-se então determinar as potências medidas no eixo e compará-las com a potência de entrada. Dessa feita, para a condição de operação 80% da nominal, tem-se os seguintes resultados:

Tabela 22 - Rendimentos para ensaio com 80% de carga

| Condição | Pot. Saída (W) | Pot. Entrada (W) | η (%) | $\Delta\eta$ (%) |
|-----------------|----------------|------------------|------------|------------------|
| Ideal | 1022,41667 | 1261,00000 | 81,07983 | |
| 3 % (amplitude) | 992,99461 | 1271,00000 | 78,12703 | 2,95280 |
| 3 % (ângulo) | 989,31685 | 1280,00000 | 77,29038 | 3,78945 |

Por fim, o rendimento do MIT nessa condição também ficou próximo ao indicado na placa da máquina para a condição de alimentação sem desequilíbrio. Por outro lado, diante da imposição de tensões com o desequilíbrio causada pela variação do módulo, nota-se que o rendimento máquina foi 2,95% menor que para alimentação ideal, enquanto para o desequilíbrio no ângulo a queda no rendimento chegou a 3,79%, conforme mostrado na última coluna da tabela 22.

5.5 Considerações Finais

Diante dos ensaios realizados e dos resultados obtidos para cada um deles, é possível analisar como o comportamento do MIT variou para cada condição de alimentação e carga. A tabela 23 mostra um resumo dos principais aspectos medidos em cada ensaio e a variação (Δ)

deles.

Tabela 23 - Resumo dos resultados obtidos

| 110% carga | | | | | | | |
|-------------------|------------------|-----------------|-------------------------|-----------------------|------------------------|------------|------------------|
| Condição | Medições | | | Resultados | | | |
| | velocidade (rpm) | Conjugado (N.m) | Potência de Entrada (W) | Potência de Saída (W) | Δ Conjugado (%) | η (%) | $\Delta\eta$ (%) |
| Ideal | 1729,00 | 8,78 | 2005,00 | 1589,71 | - | 79,29 | |
| 3% (amplitude) | 1728,00 | 8,59 | 2009,00 | 1554,41 | 2,16 | 77,37 | 1,92 |
| 3% (ângulo) | 1728,00 | 8,46 | 2001,00 | 1530,89 | 3,64 | 76,51 | 2,78 |
| 100% carga | | | | | | | |
| Condição | Medições | | | Resultados | | | |
| | velocidade (rpm) | Conjugado (N.m) | Potência de Entrada (W) | Potência de Saída (W) | Δ Conjugado (%) | η (%) | $\Delta\eta$ (%) |
| Ideal | 1734,00 | 8,10 | 1822,00 | 1470,83 | - | 80,73 | |
| 3% (amplitude) | 1732,00 | 7,96 | 1830,00 | 1443,74 | 1,73 | 78,89 | 1,83 |
| 3% (ângulo) | 1733,00 | 7,90 | 1837,00 | 1433,69 | 2,47 | 78,05 | 2,68 |
| 90% carga | | | | | | | |
| Condição | Medições | | | Resultados | | | |
| | velocidade (rpm) | Conjugado (N.m) | Potência de Entrada (W) | Potência de Saída (W) | Δ Conjugado (%) | η (%) | $\Delta\eta$ (%) |
| Ideal | 1745,00 | 6,80 | 1526,00 | 1242,60 | - | 81,43 | |
| 3% (amplitude) | 1745,00 | 6,72 | 1548,00 | 1227,99 | 1,18 | 79,33 | 2,10 |
| 3% (ângulo) | 1744,00 | 6,62 | 1543,00 | 1209,02 | 2,65 | 78,36 | 3,07 |
| 80% carga | | | | | | | |
| Condição | Medições | | | Resultados | | | |
| | velocidade (rpm) | Conjugado (N.m) | Potência de Entrada (W) | Potência de Saída (W) | Δ Conjugado (%) | η (%) | $\Delta\eta$ (%) |
| Ideal | 1756,00 | 5,56 | 1261,00 | 1022,42 | - | 81,08 | |
| 3% (amplitude) | 1756,00 | 5,40 | 1271,00 | 992,99 | 2,88 | 78,13 | 2,95 |
| 3% (ângulo) | 1756,00 | 5,38 | 1280,00 | 989,32 | 3,24 | 77,29 | 3,79 |

De acordo com os resultados mostrados, percebe-se que o desequilíbrio de tensão ocasionado pela variação do ângulo de fase resultou em perdas de torque e rendimento maiores quando comparadas com o desequilíbrio ocasionado pela variação do módulo da tensão, ainda que os fatores de desequilíbrios fossem similares.

Com relação a carga conectada ao eixo da máquina, nota-se que para a condição de operação com carga nominal o motor apresentou menores perdas de rendimento e conjugado, para ambos os desequilíbrios, quando comparado com as demais condições de carga utilizadas. Porém, quando o desequilíbrio foi aplicado no motor com uma carga abaixo da nominal notou-

se uma perda de rendimento mais acentuada em relação aos demais casos, nesses casos também houve uma perda considerável no torque entregue no eixo da máquina. Entretanto, as maiores perdas no torque ocorreram para o motor operando com sobrecarga.

6 CONCLUSÕES

Os motores de indução trifásicos são equipamentos elétricos amplamente empregados em todos os lugares do mundo e nas mais variadas situações, isso faz com que haja a constante necessidade de compreender seu funcionamento e as variações que podem ocorrer na sua operação diante de formas distintas de alimentação, carga, acionamento, entre outros.

O presente trabalho enunciou as principais normas relacionadas a desequilíbrios de tensão e seus limites permitidos, bem como apresentou as variações que podem ser encontradas no fator de desequilíbrio quando calculados por técnicas diferentes. Embora as normas existam para garantir o bom funcionamento dos sistemas e dos equipamentos a eles conectados, alguns equipamentos sofrem impactos em sua operação, mesmo que a condição de fornecimento de energia esteja dentro do permitido nas normativas.

Visando o contínuo desenvolvimento dos conhecimentos relacionados aos MITs, esse trabalho apresentou as variações de comportamento de um motor de indução quando alimentado por um sistema com tensões desequilibradas. Com o estudo e os ensaios realizados, nota-se que há uma perda de rendimento do motor de indução quando o mesmo é alimentado por um sistema desequilibrado, além da perda de rendimento notou-se durante a realização dos ensaios um aumento significativo no nível de ruído e vibração da máquina, o que faz com que a vida útil da mesma seja reduzida.

Ainda que percentualmente as perdas não sejam consideravelmente altas, quando analisadas em um cenário tão extenso como o Brasil e a quantidade de máquinas instaladas em locais com alimentação inadequada e sub (ou sobre) dimensionadas, é possível inferir que uma enorme quantidade de energia elétrica é perdida todos os dias no país para suprir essas perdas ocasionadas por mal dimensionamento. Embora não tenha sido objeto de ensaio neste trabalho, quando as condições de alimentação desequilibradas ocorrem paralelamente a distorções harmônicas, o prejuízo na operação dos motores pode ser ainda maior.

Além das condições de rendimento, o fator de potência é outro aspecto que é severamente afetado pelo desequilíbrio de tensão, e sua variação ocorreu para todas as condições de carga e desequilíbrio. O fator de potência deve ser objeto de atenção pois causa um aumento da corrente que circula pelas linhas, desde a transmissão e distribuição até as redes internas dos que consumidores que possuem motores em suas instalações. E ainda, um fator de potência abaixo das normativas pode ocasionar multas para os consumidores que infringirem a normativa.

Por fim, o último aspecto impactado pela presença de desequilíbrio de tensão na alimentação de uma máquina foi a redução no conjugado exercido por ela no eixo, com os ensaios realizados conclui-se que há uma redução no torque sempre que comparada uma mesma

condição de carga sendo alimentada pela rede com e sem a presença de desequilíbrio.

Portanto, as máquinas elétricas são equipamentos amplamente utilizados em todo o mundo e devem ser constantemente estudadas para garantir evolução constante na sua construção, dimensionamento, operação, manutenção e demais aspectos que compõem o ciclo de utilização de um motor de indução trifásico.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] LIMA, E. C. (2016). **Diagnóstico de Motores de Indução Trifásicos Operando em Redes Desequilibradas e Distorcidas**. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2016.
- [2] NEVES, A. B. F. (2014). **Análise dos Efeitos do Desequilíbrio e da Distorção Harmônica de Tensão no Conjugado e no Rendimento de um Motor de Indução Trifásico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, 2014.
- [3] SEVERO, D. S. M. (2020) **Estudo da máquina de indução trifásica operando com tensões desequilibradas e distorcidas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.
- [4] REZENDE, P. H. O. **Efeitos Do Desequilíbrio De Tensões De Suprimentos Nos Motores De Indução Trifásico**. Horizonte Científico, v. 6, n. 2, fev. 2013. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/horizontecientifico/issue/view/819>. Acesso em: 04/01/2022.
- [5] BAIA, G. A. (2020) **Estudo do rendimento de motores de indução trifásicos operando com tensões desequilibradas e distorcidas**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.
- [6] LELES, A. F. F. (2008). **Análise do Comportamento do Fator de Desequilíbrio frente a Variações da amplitude e do Ângulos da Tensão**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.
- [7] SILVA, V. P. (2012). **Análise comparativa do desempenho do motor de indução trifásico de alto rendimento e linha padrão em condições de alimentação ideal e não ideal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.
- [8] NEVES, Bruno Lemos. **Instrumentação virtual aplicada ao monitoramento de máquinas elétricas rotativas**. 2021. 53 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021.
- [9] OLIVEIRA, Cássio Alves de. **Plataforma para ensaios de motores de indução trifásicos e simulação de cargas mecânicas: acionamento, operação e monitoramento com auxílio de fonte programável**. 2018. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.
- [10] MACEDO Junior, J. R.; Junior, J. A. F. B.; GONDIM, Isaque Nogueira; TAVARES, Carlos Eduardo. **Aspectos Práticos dos Testes de Desempenho em Medidores de**

Parâmetros de QEE. In: IX CBQEE - CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, 2011, Cuiabá. IX CBQEE - CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, 2011.

[11] UMANS, S.D. **Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley.** 7. Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014. 708 p.

[12] CHAPMAN, S. J (2013). **Fundamentos de Máquinas Elétricas.** 5ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda.

[13] Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

[14] IEC 61000-4-30 (2008) “*Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods.*” *International Standard, Edition 2.0.*

[15] IEEE 1159-2009 (2009) “*IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.*” *Transmission and Distribution Committee of the IEEE Power & Energy Society.*

[16] ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico (2020) “Procedimentos De Rede, Submódulo 2.9: Requisitos mínimos de qualidade de energia elétrica para acesso ou integração à Rede Básica.” Revisão 2020.12, Data de Vigência 01 de janeiro de 2020.