



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

BRUNO LEMOS NEVES

**INSTRUMENTAÇÃO VIRTUAL APLICADA AO MONITORAMENTO DE
MÁQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS**

Uberlândia
2021

BRUNO LEMOS NEVES

**INSTRUMENTAÇÃO VIRTUAL APLICADA AO MONITORAMENTO DE
MÁQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS**

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
2021

BRUNO LEMOS NEVES

**INSTRUMENTAÇÃO VIRTUAL APLICADA AO MONITORAMENTO DE
MÁQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS**

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

Uberlândia, 04 de junho de 2021.

Banca Examinadora:

Prof. Augusto W. Fleury, Dr. (UFU)

Prof. Márcio José da Cunha, Dr. (UFU)

Dedico este trabalho aos meus pais, Rones da Silva Neves e Luciane Silva Lemos pelo estímulo, 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 permitir mais uma vitória nessa nova 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 Mateus Amaral, ao mestrando Vinícius e ao doutorando Cássio Alves 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, meus avós, meu irmão Pedro Lemos Neves e meus tios Jussane Silva Lemos e Wesley Ferreira da Silva pelo apoio e companheirismo durante cada etapa da graduação.

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

RESUMO

O trabalho tem como objetivo apresentar a aplicabilidade de um sistema supervisorio, integrado e flexível, capaz de auxiliar no monitoramento e estudo de máquinas elétricas rotativas. As máquinas elétricas rotativas, em especial os motores de indução trifásicos, são amplamente utilizados como força motriz nos diversos segmentos industriais. Para melhorar a tecnologia e qualidade das máquinas elétricas rotativas, o estudo de seus parâmetros e monitoramento dinâmico das variáveis operacionais mostram-se de fundamental importância no uso eficiente da energia elétrica. O software Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench (LabVIEW) permite a interface com o usuário por meio do monitoramento dinâmico das principais grandezas elétricas da máquina em estudo. Com o auxílio de um motor de indução trifásico, pretende-se ainda destacar a aplicabilidade do projeto por meio da realização de ensaios com carga e ensaios para a determinação de parâmetros do circuito equivalente.

Palavras-chave: sistemas supervisórios, instrumentação virtual, ensaios de máquinas elétricas rotativas.

ABSTRACT

The work aims to present the applicability of a supervisory system, integrated and flexible, capable of assisting in the monitoring and study of rotating electrical machines. Rotating electrical machines, especially three-phase induction motors, are widely used as a driving force in various industrial segments. To improve the technology and quality of rotating electric machines, the study of their parameters and dynamic monitoring of operational variables are of fundamental importance in the efficient use of electric energy. The Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench (LabVIEW) software allows the user interface through dynamic monitoring of the main electrical quantities of the machine under study. With the aid of a three-phase induction motor, it is also intended to highlight the applicability of the project by carrying out load tests and tests for the determination of parameters of the equivalent circuit.

Keywords: supervisory systems, virtual instrumentation, tests of rotating electrical machines.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Motor de indução trifásico	16
Figura 2 - Módulo de aquisição PCI-6229	18
Figura 3 - Circuito equivalente do MIT	22
Figura 4 - Distribuição de potências para um MIT	22
Figura 5 - Curva característica de um MIT categoria N	23
Figura 6 - Curvas de operação de um MIT	23
Figura 7 - Diagrama funcional da plataforma de ensaios	24
Figura 8 - Plataforma experimental	26
Figura 9 - Transdutor de conjugado	28
Figura 10 - Motor de indução trifásico	29
Figura 11 - Módulo condicionador de corrente e tensão	30
Figura 12 - Sensor de tensão modelo LV-20P	31
Figura 13 - Sensor de corrente modelo LA-55P	32
Figura 14 - Trecho de código desenvolvido.....	33
Figura 15 - Cálculo das potências	34
Figura 16 - Primeira tela do sistema supervisorio	35
Figura 17 - Arquivo de texto que armazena os pontos amostrados	36
Figura 18 - Segunda tela do sistema supervisorio	37
Figura 19 - Dados de placa MIT 1/2 CV (MOTOR 01)	38
Figura 20 - Dados de placa MIT 3 CV de 2 polos (MOTOR 02).....	39
Figura 21 - Dados de placa MIT 3 CV 6 polos (MOTOR 03).....	39
Figura 22 - Medição direta da resistência do estator.....	41
Figura 23: Circuito equivalente na condição de rotor bloqueado.....	42
Figura 24: Circuito equivalente para operação a vazio	45
Figura 25 - Formas de ondas das correntes do MOTOR 01	46
Figura 26 - Formas de ondas das correntes do MOTOR 03	47
Figura 27 - Degrau de conjugado para 40% de carga.....	48
Figura 28 - Degrau de conjugado na condição de carregamento nominal	49
Figura 29 - Degrau de conjugado para 120% de carga.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros da fonte programável.....	26
Tabela 2 - Dados da máquina de corrente contínua	27
Tabela 3 - Valores de resistências do estator	41
Tabela 4 - Dados do ensaio de rotor bloqueado	42
Tabela 5 - Parâmetros série do circuito equivalente	44
Tabela 6 - Dados do ensaio a vazio	44
Tabela 7 - Parâmetros representativos do ramo magnetizante.....	46
Tabela 8 - Dados do ensaio com 40% de carga.....	48
Tabela 9 - Dados do ensaio com carga nominal	49
Tabela 10 - Dados do ensaio de sobrecarga	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CC – Corrente contínua

LabVIEW – *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*

LAcE – Laboratório de Acionamentos Elétricos

MER – Máquina Elétrica Rotativa

MCC – Máquina de Corrente Contínua

MIT – Máquina de Indução Trifásica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1	SISTEMAS DE MONITORAMENTO E CONTROLE	13
2.2	MÁQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS.....	15
3	METODOLOGIA.....	17
3.1	SISTEMA DE AQUISIÇÃO E MONITORAMENTO.....	17
3.2	MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO	20
3.3	PLATAFORMA EXPERIMENTAL	24
3.4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
3.4.1	DESCRIÇÃO DO SISTEMA SUPERVISÓRIO	33
3.4.2	VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL	37
4	CONCLUSÃO	50
5	REFERÊNCIAS	52

1 INTRODUÇÃO

As máquinas elétricas rotativas são dispositivos eletromecânicos de conversão de energia amplamente utilizados em diversos setores industriais. Por possuir um simples, mas não menos eficiente sistema de conversão eletromecânica de energia, os Motores de Indução Trifásicos (MIT) estão entre as máquinas elétricas mais utilizadas no setor industrial. Devido às características construtivas, eles podem ser adaptáveis à variadas situações de cargas e, se estiverem bem dimensionados, podem apresentar eficientes desempenhos.

As fontes esgotáveis de recursos naturais, o quadro econômico de instabilidade e um processo competitivo global pelo qual tem passado a sociedade nesses últimos tempos, têm exigido a minimização dos custos otimizando os investimentos em busca do melhor uso da energia (Eletrobras, 2021). Esse cenário nos leva à uma inevitável necessidade de conservação de energia elétrica nos setores residencial, comercial e, principalmente, industrial.

Os motores de indução têm ganhado espaço com a evolução da eletrônica de potência e dos sistemas de acionamentos. Eles apresentam grandes vantagens uma vez que são compactos, de elevada relação potência por volume, alto rendimento, robustez, menor custo de manutenção e confiabilidade elevada.

Estudá-los possibilita conhecer e desenvolver novas estratégias para aumentar o rendimento e aperfeiçoar sua operação. Uma vez que nas indústrias mais da metade do consumo de energia elétrica é destinada à produção de força motriz, até mesmo uma pequena economia será capaz de fornecer um positivo e considerável impacto.

No mundo atual a produção de energia é um assunto crítico. Tais estratégias que visam conservação e um uso mais racional da energia se tornam imperativas para que se possa implementar um desenvolvimento sustentável. Além do fato que aumento de eficiência resulta em diminuição relativa do consumo, o que é de suma importância quando se está inserido em um processo competitivo global. Com a redução de custos, processos industriais de uma maneira geral são beneficiados com maior lucro e destaque no mercado.

Os MIT's possuem o rendimento influenciado por vários fatores. O sobredimensionamento, por exemplo, provoca aumento no percentual de perdas em relação ao valor nominal, o que determina uma queda no rendimento. Além disso, o

alinhamento inadequado de eixos e reparos executados de forma incorreta também podem alterar significativamente seu desempenho (EFEI, 2001).

Assim, é possível perceber que os parâmetros elétricos e mecânicos das máquinas rotativas podem se desviar daqueles contidos nas placas de identificação e nos manuais de fabricantes. Portanto, a necessidade de se monitorar esses parâmetros periodicamente e adequar o sistema às especificações da máquina mostra a relevância dos sistemas de monitoramento no que se refere à redução de perdas.

Com a evolução da computação e das tecnologias de eletrônica e de instrumentação, os sistemas de monitoramento clássicos têm sido substituídos por novas técnicas de inteligência artificial e de interfaces digitais. Flexível, confiável, intuitiva e de fácil adequação são alguns fatores que fazem da instrumentação virtual uma relevante ferramenta para a engenharia.

Este trabalho tem como objetivo demonstrar a aplicabilidade do sistema de instrumentação virtual para melhorar a eficiência geral dos sistemas e processos industriais. Assim, é apresentado inicialmente o referencial teórico dos sistemas de monitoramento e máquinas elétricas rotativas e, em seguida, a metodologia e resultados encontrados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SISTEMAS DE MONITORAMENTO E CONTROLE

A necessidade do controle sobre processos acompanha o homem desde a criação das primeiras máquinas. Em meados de 1940 as atividades de manufatura eram realizadas de forma manual, necessitando de um grande número de operadores e poucas ferramentas manuais de trabalho. Ao decorrer dos anos, a elevação dos custos de produção e a necessidade de produção em escala foram alguns dos fatores que favoreceram a utilização de técnicas de produção mais eficazes e precisas.

Surge então os instrumentos pneumáticos para transmitir as informações sobre as variáveis do processo. Este mecanismo se dava através de tubulações de ar comprimido presente na planta ou parque industrial. Apesar do positivo impacto na

agilidade dos processos, esta forma de comunicação ainda era precária e pouco eficiente.

Com o desenvolvimento da eletrônica analógica na década de 1950 e 1960 foi possível ampliar as fronteiras no que se refere à transmissão de informações. Assim, com a facilidade da comunicação via sinais elétricos foi possível melhorar a eficiência e precisão dos processos favorecendo a evolução dos sistemas de controle automático de processos (PATANÉ, 2008).

O grande desenvolvimento da instrumentação se deu nos anos de 1970 e 1980 com a evolução das tecnologias da eletrônica digital. Por meio dos microcontroladores programáveis, foi possível ampliar as técnicas de instrumentação clássicas por novos métodos envolvendo software e a multiplexação nos sistemas de comunicação.

Atualmente a tendência de padronização de elementos e protocolos de comunicação tem reduzido custos associados à implementação. Além disso, os dispositivos associados apresentam maior velocidade e capacidade de processamento o que reflete no aumento da confiabilidade e eficiência do sistema (GUTIERREZ, 2008).

Além de auxiliar nos estudos referentes às máquinas elétricas em geral, os sistemas automação têm ganhado cada vez mais espaço nas indústrias. Além de auxiliar na proteção dos equipamentos, os sistemas automatizados virtualmente possibilitam à redução de custos na produção uma vez que se tem total acesso à planta através de uma sala de controle sendo que um único operador tem total acesso sobre os processos em execução.

A automação industrial vem crescendo aceleradamente visto os positivos impactos na produtividade, eficiência e qualidade dos produtos manufaturados. O nível de automação de cada unidade industrial é função de uma série de fatores, como custo benefício e adaptabilidade das máquinas presentes no processo (FILHO, 2017).

Neste trabalho será apresentado o sistema mais simples de automação no qual aplica-se as técnicas digitais para monitoramento dinâmico das variáveis da máquina envolvida no processo partindo-se do princípio do custo-benefício para estudo de máquinas elétricas no laboratório, porém totalmente adaptável ao segmento industrial.

2.2 MÁQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS

Máquinas elétricas são dispositivos que podem converter tanto energia mecânica em energia elétrica como energia elétrica em energia mecânica. O uso na produção de energia elétrica é feito através do uso dos geradores e o uso como força motriz é feito através dos motores. No cotidiano esses equipamentos elétricos estão presentes em todos os lugares. Tanto no setor residencial (como na geladeira, ventiladores e similares) como também no setor industrial (na produção de força motriz), essas máquinas facilitam as mais diversas tarefas.

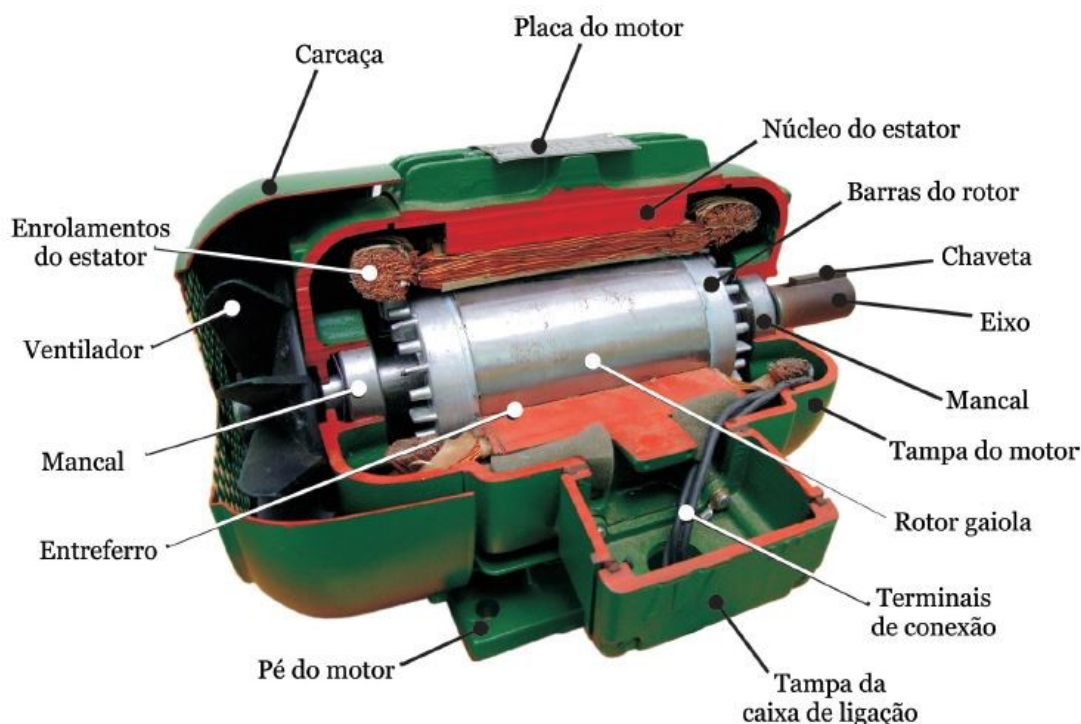
Os primeiros sistemas de potência desenvolvidos eram fundamentalmente baseados em sistemas de corrente contínua. Devido à facilidade de variação de velocidade sem a necessidade de ferramentas avançadas de eletrônica de potência, essas máquinas foram, e ainda são, comuns em carros elétricos e aeronaves por exemplo (ABIMAQ, 2006).

Segundo um documento que mostra o consumo de energia elétrica por setor divulgado pelo Balanço Energético Nacional (BEN, 2021), a indústria é o setor da economia que apresenta maior demanda, cerca de 38% do total. De acordo com o Ministério de Minas e Energia (MME) a força motriz em operação usa 68% dessa energia elétrica. Sendo assim, constata-se que aproximadamente 26% de toda a energia elétrica utilizada no Brasil é consumida por máquinas elétricas rotativas.

As máquinas de corrente contínua caracterizam-se por sua versatilidade. Com as diversas combinações do enrolamento de campo, elas podem ser projetadas para apresentar amplas características de tensão, corrente, velocidade e conjugado de acordo com as diversas necessidades. A versatilidade das máquinas CC, em combinação com a relativa simplicidade de acionamento ainda assegura o uso em segmentos específicos (UMANS, 2014).

Com o avanço das tecnologias de eletrônica de potência as máquinas CC assumem uma tendência de substituição por máquinas de indução. Neste cenário, os motores de indução trifásicos estão cada vez mais comuns devido ao alto rendimento, robustez e custo-benefício. A Figura 1 abaixo mostra um MIT, do tipo rotor em gaiola de esquilo, em corte.

Figura 1 - Motor de indução trifásico



Fonte: ELEKRO, 2012

Essas máquinas são denominadas máquinas de indução porque a tensão do rotor, que por sua vez produz a corrente e o campo do rotor, é induzida em vez de ser fornecida por meio de uma conexão física de fios como ocorre, por exemplo, nas máquinas de corrente contínua (CHAPMAN, 2013).

Estes motores possibilitam ser ligados em diversas tensões conforme a quantidade de terminais acessíveis, possuem sistema de acionamento robusto a depender do tamanho e tipo de carga e, além disso, se acionados por inversores de frequência podem ter conjugados nominais para amplas variações de velocidades. Estas máquinas são amplamente utilizadas na indústria e também tem se mostrado eficientes em aplicações que envolvem carros elétricos.

Os motores de indução podem ser do tipo rotor bobinado ou do tipo rotor em gaiola de esquilo. Os motores com rotor bobinado permitem o acesso externo dos terminais do rotor e este permite variação da curva de conjugado por velocidade do motor. Apesar de mais versátil, estes motores são de custos mais elevados e apresentam maior manutenção devido ao desgaste associado às escovas. A de rotor em gaiola de esquilo é a mais utilizada e a de rotor bobinado é destinada a

algumas aplicações específicas, atualmente relacionadas à geração eólica (UMANS, 2014).

A máquina de indução mais utilizada como motor é aquela com rotor em gaiola de esquilo. Nestas máquinas, o rotor possui barras feitas de material condutor e estas barras são curto-circuitadas internamente no rotor dispensando-se o uso de escovas.

3 METODOLOGIA

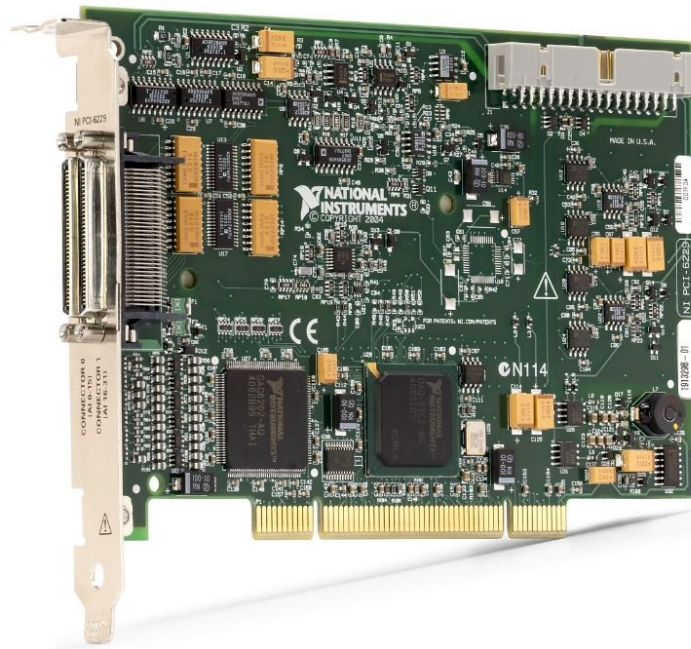
A topologia completa foi estruturada e cada elemento foi estudado separadamente e depois em conjunto. São estes: o sistema de aquisição e processamento de dados, o motor em estudo e a plataforma para realização dos ensaios.

3.1 SISTEMA DE AQUISIÇÃO E MONITORAMENTO

Para que seja possível realizar o estudo da máquina elétrica faz-se necessário o uso de um sistema de aquisição. Complementarmente, é necessário também um meio no qual seja possível tratar os sinais coletados com o objetivo de apresentá-los a níveis conhecidos para o usuário.

O sistema de aquisição é formado pelos módulos condicionadores de sinais (posteriormente detalhados no subitem 2.2.3) que enviam sinais de tensão ao módulo de aquisição presente no computador. Este módulo, da fabricante *National Instruments* fornece funções de aquisição de dados confiáveis e de baixo custo a uma grande variedade de aplicações simples de automação de laboratório, pesquisa, verificação/teste de projetos e o teste de fabricação. A Figura 2 abaixo apresenta a placa PCI-6229 utilizada neste trabalho.

Figura 2 - Módulo de aquisição PCI-6229



Fonte: *National Instruments*

O modelo possui 4 saídas analógicas, 48 entradas e/ou saídas digitais, 32 entradas analógicas (16 bits, 250 kS/s) e oferece 2 contadores/temporizadores de 32 bits, além possuir de trigger digital.

Entre a saída dos módulos condicionadores e a entrada da PCI-6229, utiliza-se um bloco de terminais capaz de realizar a interface por meio de bornes de conexão entre os cabos individuais e o cabo blindado que conecta diretamente nas portas do módulo de aquisição.

Este dispositivo, também da *National Instruments*, possui portas identificadas e correspondem às mesmas identificações de portas presente no software de desenvolvimento em que será feito o processamento de sinais. O modelo utilizado (SCB-68) é compatível com entradas e/ou saídas multifunção de conector único e duplo com conectores de 68 pinos.

Uma vez realizada a captura dos dados experimentais, pode-se então manipulá-los no computador para apresentar níveis reais aos usuários. A manipulação dos dados é feita através do software LabVIEW. Nele pode-se, através da navegação entre duas telas, inserir indicadores gráficos, dinâmicos e instantâneos das grandezas medidas.

No objeto deste estudo, os sinais enviados pelo torquímetro e pelos módulos condicionadores de tensão e corrente, permitem a obtenção de grandezas associadas como potências (ativa, reativa e aparente) e fator de potência.

Na tela de programação pode-se inserir as manipulações das variáveis coletadas com o objetivo de informar seus valores reais. Para a apresentação dos valores RMS de tensão e corrente foi utilizado a equação abaixo.

$$A = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_a \cdot a_i^2} \quad (01)$$

Em que:

n : o número de amostras no intervalo de um período;

a_i : o valor instantâneo da tensão ou corrente;

K_a : fator de escala para corrente ou tensão;

A : valor eficaz de um período de um sinal elétrico.

A potência ativa de entrada do motor sob teste é obtida através do cálculo matemático da potência média, a partir dos valores de tensão e corrente feitos na aquisição. Ela pode ser determinada pela seguinte equação:

$$P_{Ativa} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (K_v v_i) \times (K_i i_i) \quad (02)$$

Onde:

v_i : o valor instantâneo da tensão;

i_i : valor instantâneo da corrente;

K_v : fator de escala para a tensão;

K_i : fator de escala para a corrente.

Para o cálculo da potência aparente, é considerado o produto dos valores eficazes de tensão e corrente conforme apresentado na equação abaixo.

$$P_{Aparente} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (A_{corrente} \times A_{tens\tilde{a}o}) \quad (03)$$

Em que:

$A_{corrente}$: valor eficaz de corrente em um período de sinal elétrico (equação 01);

$A_{tens\tilde{a}o}$: valor eficaz de tensão em um período de sinal elétrico (equação 01).

O fator de potência médio é calculado como sendo a razão da potência ativa total pela potência aparente total solicitada pela máquina em estudo. As potências totais (aparente e ativa) foram calculadas como sendo a soma das potências das três fases conforme apresentado abaixo.

$$FP_{m\acute{e}dio} = \frac{\sum_{i=1}^3 P_{ativa}}{\sum_{i=1}^3 P_{aparente}} \quad (04)$$

As equações acima apresentadas foram inseridas na aplicação desenvolvida em LabVIEW e podem ser vistas no subitem 2.3 deste trabalho.

3.2 MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

O princípio de funcionamento do motor de indução se baseia na criação de um campo magnético rotativo. Este campo girante surge a partir da aplicação de tensão alternada no estator (parte fixa da máquina), que por sua vez produz um campo magnético rotativo que atravessa os condutores do rotor.

Esta variação de fluxo no rotor induz uma força eletromotriz capaz de criar outro campo magnético girante. A tentativa dos dois campos de se interagirem entre si e entrarem em quadratura faz com que haja o movimento de rotação do motor. A velocidade do campo girante é diretamente proporcional à frequência e inversamente proporcional ao número de polos do motor conforme mostra a equação abaixo.

$$N_s = \frac{120 \times f}{N_p} \quad (05)$$

Onde:

N_S : velocidade síncrona (RPM);

f : frequência da rede de alimentação (Hz);

N_P : número de polos da máquina.

A diferença relativa entre a velocidade síncrona e a velocidade que efetivamente o rotor gira dá-se o nome de escorregamento. Como o comportamento de uma máquina assíncrona depende da tensão e da corrente no rotor [8], é esperado que a variação de carga no eixo também provoque variação nesta diferença de velocidade. A equação abaixo permite calcular o escorregamento por meio da velocidade síncrona e velocidade no eixo do motor.

$$s = \frac{N_S - N_R}{N_S} \quad (06)$$

Sendo:

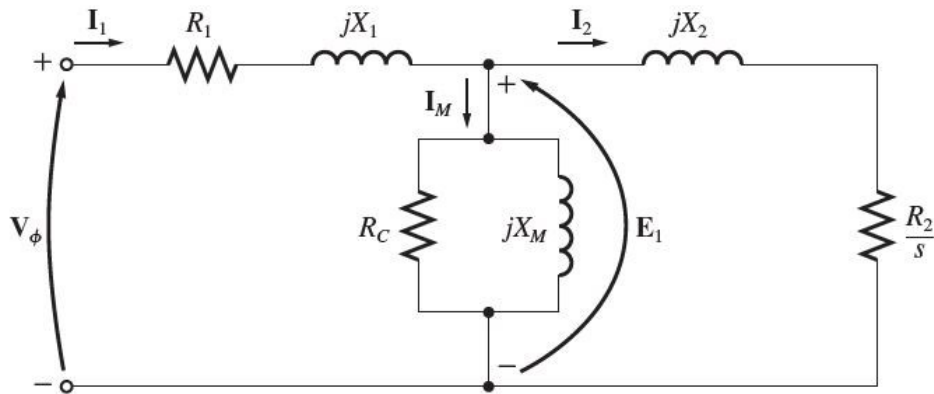
N_R : velocidade do rotor (RPM);

s : escorregamento.

As diversas análises relativas aos motores de indução recaem sobre os limites de escorregamento entre zero e um. Situações estas que representam rotor bloqueado e funcionamento a vazio, respectivamente.

O circuito equivalente assemelha-se ao de um transformador, com exceção de que a resistência do secundário, no caso do motor, varia com o escorregamento. A Figura 3 abaixo apresenta o circuito equivalente na representação monofásica para uma máquina de indução trifásica.

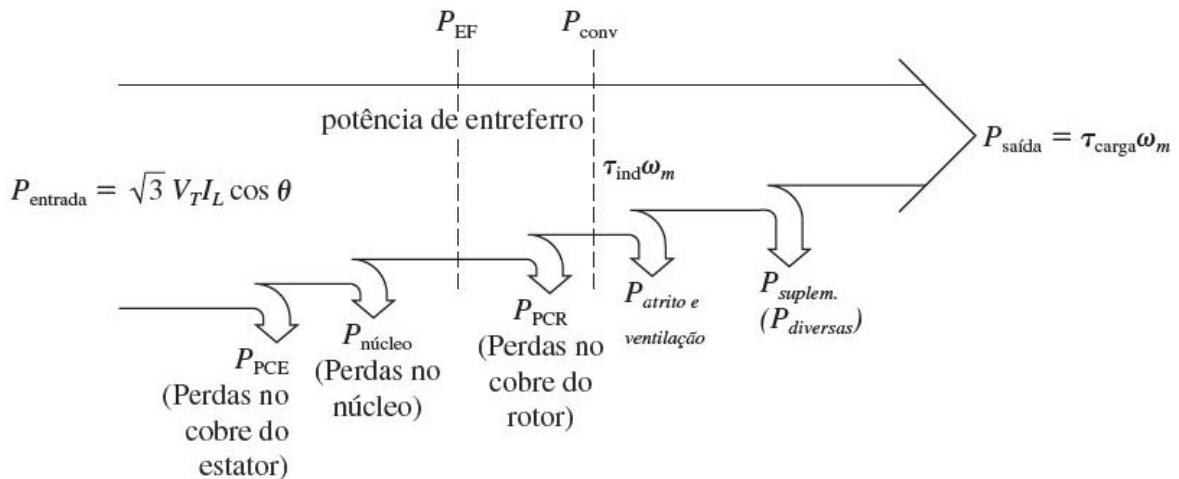
Figura 3 - Circuito equivalente do MIT



Fonte: CHAPMAN, 2013

Como todo dispositivo elétrico real, as máquinas rotativas estão sujeitas a perdas. Apesar das perdas devido às resistências intrínsecas dos condutores ou às reatâncias de magnetização por exemplo, os motores de indução são máquinas com elevados rendimentos. A Figura 4 abaixo apresenta o diagrama de fluxo de potências para um MIT.

Figura 4 - Distribuição de potências para um MIT

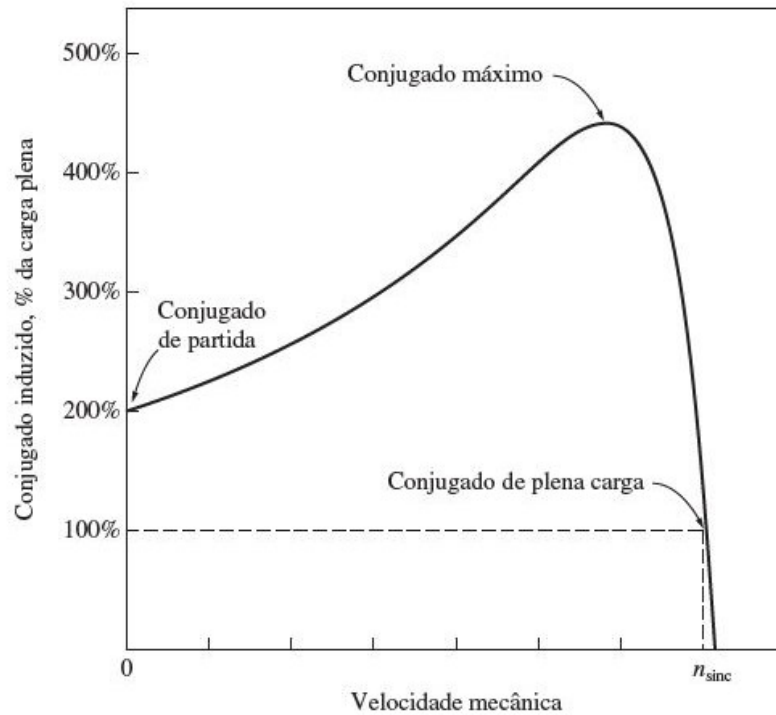


Fonte: CHAPMAN, 2013

Pela análise do fluxograma acima pode-se perceber que a potência mecânica no eixo da máquina é diretamente proporcional ao produto do conjugado resistente pela velocidade angular no eixo da máquina. Os motores de indução podem ser classificados quanto perfil característico da curva de conjugado pela velocidade nominal.

Os motores categoria N, objeto de estudo deste trabalho, são amplamente encontrados no mercado e frequentemente são empregados no acionamento de bombas, ventiladores e outras cargas comuns. A Figura 5 abaixo apresenta a curva característica de um MIT categoria N.

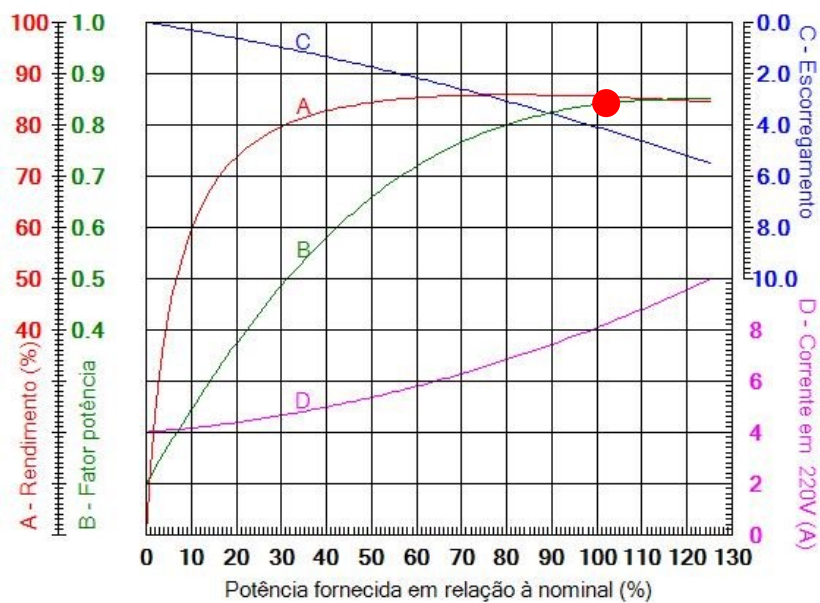
Figura 5 - Curva característica de um MIT categoria N



Fonte: CHAPMAN, 2013

O desempenho de um motor elétrico é influenciado por vários fatores, mas o correto dimensionamento é um fator de fundamental importância para seu uso eficiente. A Figura 6 abaixo, apresenta as curvas que relacionam o carregamento de um motor com outras variáveis como o rendimento e fator de potência por exemplo.

Figura 6 - Curvas de operação de um MIT



Fonte: WEG

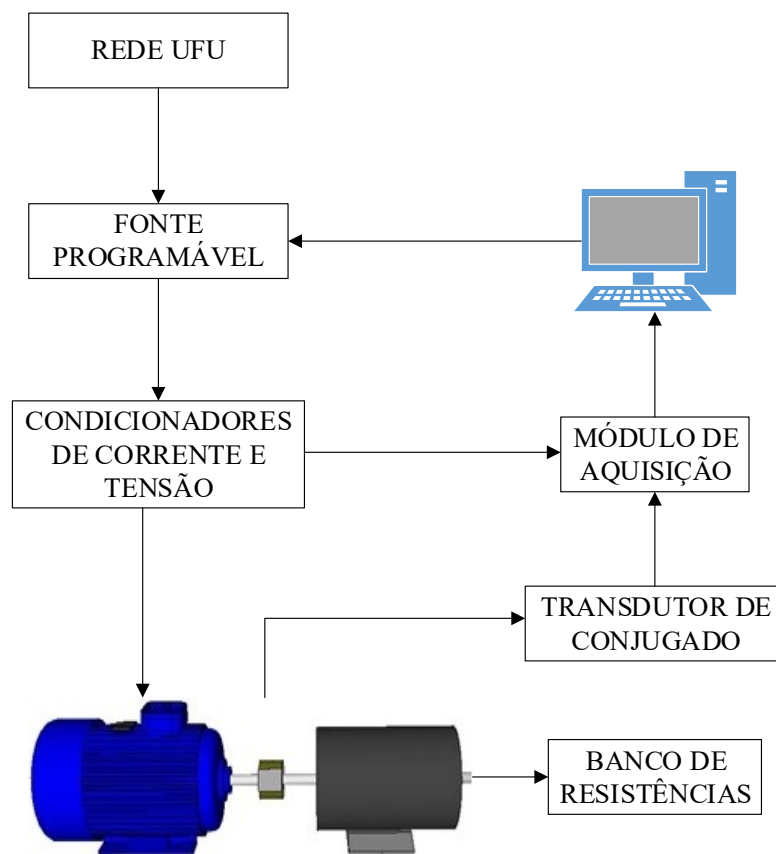
Pela análise das curvas observa-se que a melhor condição de operação seria quando a potência fornecida é próxima de 100% da potência nominal. Nesta condição verifica-se que os valores do fator de potência e do rendimento são máximos.

3.3 PLATAFORMA EXPERIMENTAL

Com o objetivo de auxiliar nos estudos referentes às tecnologias de máquinas elétricas rotativas, a plataforma presente no Laboratório de Acionamentos Elétricos (LAcE) é capaz de simular condições de cargas reais presentes em diversas aplicações industriais (OLIVEIRA, 2018). Para garantir sua integridade bem como a segurança do operador, a bancada conta com sistema de proteção adequado contra possíveis falhas que possam ocorrer durante a realização dos ensaios.

A Figura 7 apresenta o diagrama funcional que integra os principais elementos constituintes.

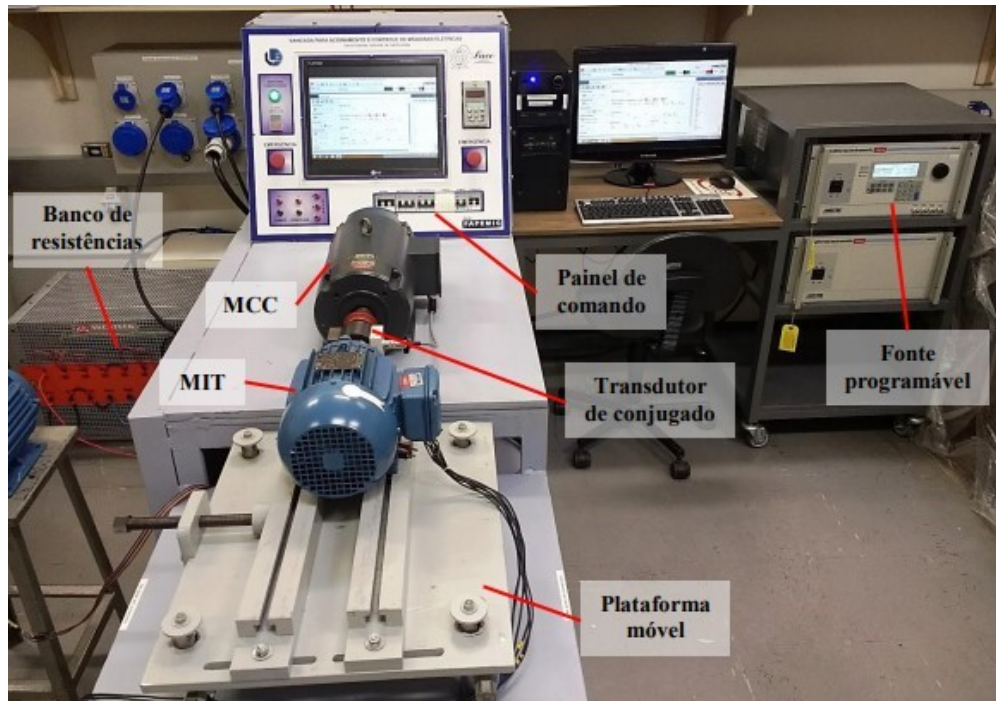
Figura 7 - Diagrama funcional da plataforma de ensaios



Fonte: Autor

A plataforma acomoda o sistema de aquisição com três placas condicionadoras de tensão e corrente (uma para cada fase), o transdutor de conjugado, a fonte programável e o computador que fará o monitoramento. A Figura 08 mostra a plataforma com todos os dispositivos instalados.

Figura 8 - Plataforma experimental



Fonte: OLIVEIRA, 2018

Para que seja possível a aquisição, manipulação e armazenamento das informações referentes à máquina em estudo, a utilização de alguns elementos e ferramentas virtuais mostram-se de fundamental importância. Os principais dispositivos e ferramentas que compõem a plataforma serão brevemente descritos a seguir.

A. Fonte Programável

A fonte programável que compõe a plataforma experimental é um equipamento de alta eficiência que fornece uma saída precisa com mínima distorção. O modelo CSW11100 fabricado pela *AMETEK Programmable Power*, permite que seus parâmetros de saída possam ser ajustados por meio do seu painel frontal ou por meio do *software* específico fornecido pelo fabricante. As principais características são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros da fonte programável

Marca	California Instruments
Modelo	CSW11100

Tensão de entrada	208 – 240 V _{RMS}
Tensão de saída (CA ou CC)	0-156 V _{RMS} (FN) / 0-312V _{RMS} (FN)
Corrente de saída	32,16 A (por fase)
Frequência de saída	CC, 40-5000 Hz

Fonte: Autor

A fonte programável é capaz de oferecer ao usuário uma tensão de saída com parâmetros de frequência, amplitude e conteúdo harmônico ajustável. Além disso, utilizando-se o software, pode-se também realizar as leituras das principais grandezas elétricas (tensão, corrente, potência e fator de potência) do equipamento que a fonte alimenta.

B. Máquina de Corrente Contínua

Responsável por estabelecer a carga sobre a máquina que se deseja realizar o ensaio, a máquina de corrente contínua atua como gerador e a energia gerada é dissipada em um banco de resistências. Suas principais características são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Dados da máquina de corrente contínua

Fabricante	LAVILL
Potência	3,3 KW (4,5 CV)
Velocidade	3600 rpm
Tensão de campo	180 V
Tensão de armadura	180 V
Corrente de armadura	20,4 A
Regime de serviço	S1
Conjugado nominal	8,78 N.m

Fonte: Autor

Dentre as formas de ligação das máquinas de corrente contínua foi escolhida a configuração em que o campo é alimentado de forma independente da armadura. Os terminais da armadura são conectados a um banco de oito resistências as quais podem dissipar, juntas, uma potência máxima de 6400 W. Já o campo é alimentado com tensão nominal, cujo valor é 180 V. Assim, ao se variar a resistência equivalente do banco, pode-se, também, alterar a corrente que circula pela armadura. Como o conjugado é diretamente proporcional a esta corrente, é possível perceber que ao alterar os valores de resistências têm-se uma alteração direta no conjugado resistente imposto à máquina motriz em ensaio.

C. Transdutor de Conjugado

Para que seja possível mensurar o conjugado exercido pela máquina motriz, faz-se necessário o uso de um dispositivo conhecido como torquímetro. Ele é instalado entre o acoplamento do eixo da máquina motriz com o da máquina geradora e é capaz de gerar um sinal de tensão proporcional ao torque medido. A Figura 9 apresenta o transdutor de conjugado utilizado.

Figura 9 - Transdutor de conjugado



Fonte: HBM

O modelo T22 do fabricante HBM pode medir conjugado de até 50 N.m (positivo ou negativo) e produz uma saída de tensão proporcional que varia de -5 V a +5 V. Um módulo ao qual é conectado os fios de sinais do torquímetro, permite a calibração do sensor e oferece uma saída de tensão proporcional limitada de -10 V a +10 V.

D. Máquina Elétrica Rotativa

Uma vez apresentados os componentes da plataforma de ensaio, é necessário, por fim, uma máquina teste para realizar ensaios e analisar o comportamento do sistema. De ampla utilização e aplicável em diversas operações industriais, o MIT é uma máquina elétrica assíncrona, robusta e adequada para ser estudada na plataforma. A Figura 10 apresenta um MIT.

Figura 10 - Motor de indução trifásico



Fonte: WEG

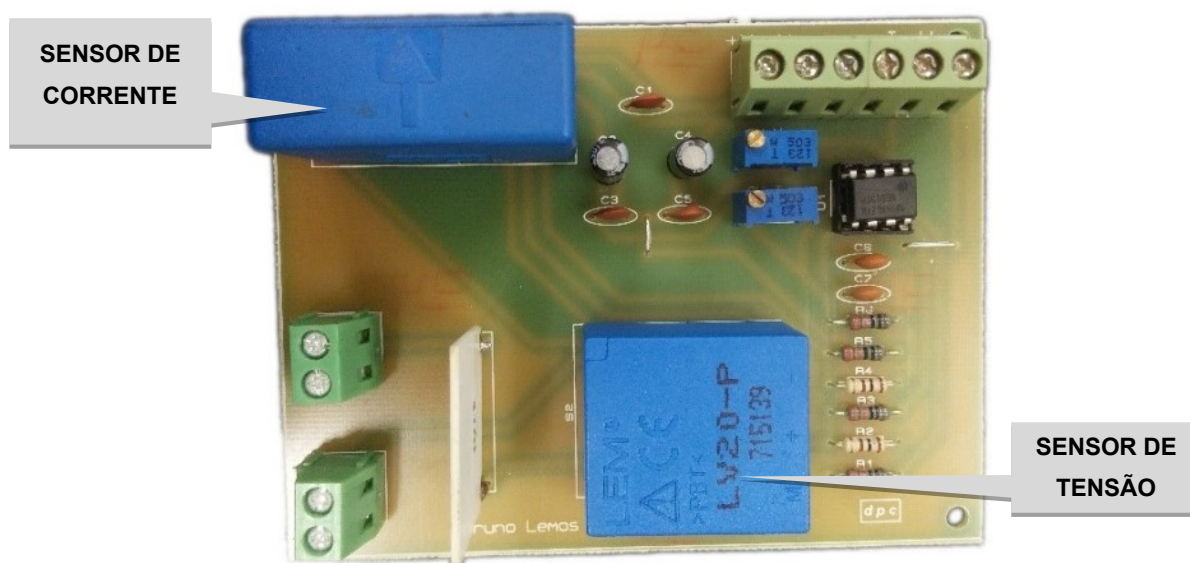
D. Módulos Condicionadores de Corrente e Tensão

No que tange à aquisição de sinais, outra ferramenta de fundamental importância são as placas condicionadoras de corrente e tensão. Com o objetivo de reduzir os níveis dessas grandezas a níveis mensuráveis pelo sistema de monitoramento, as placas, que possuem sensores de corrente e de tensão, realizam o condicionamento desses sinais por meio de um circuito eletrônico projetado para oferecer uma saída de -10 V a +10 V.

A tensão de saída do sinal, estrategicamente escolhida durante a elaboração do projeto, coincide com a faixa de tensão do módulo que recebe os sinais do conjunto de sensores. O modelo PCI 6229 do fabricante *National Instruments* utilizado no sistema possui 32 entradas analógicas de 16 bits e pode trabalhar em uma taxa máxima de 250 kS/s.

O módulo é composto por dois sensores, sendo um de corrente e um de tensão. Esses sensores funcionam com base no fenômeno conhecido como efeito "hall". Apesar da saída dos módulos ser um sinal de tensão, em ambos os sensores saem dos seus terminais um sinal de corrente. Logo, a necessidade de se converter esse sinal de corrente em tensão para que seja ajustável e compatível com a maioria dos microprocessadores, é um dos fatores que justificam o uso de um circuito eletrônico. A Figura 11 apresenta o módulo condicionador e os principais componentes utilizados são descritos a seguir.

Figura 11 - Módulo condicionador de corrente e tensão



Fonte: Autor

- **Sensor de Tensão LV-20P**

O transdutor de tensão utilizado é da fabricante LEM modelo LV-20P. Ele pode ser utilizado para medições em sistemas de corrente alternada, contínua, pulsada, entre outros. Vale ressaltar que o sensor oferece boa linearidade, baixa interferência devido à ruídos externos e pode ser aplicado em medições de tensão com valores eficazes de até 500 V.

O sensor possui 5 terminais, sendo estes identificados pelos seguintes símbolos: “-HV”, “+HV”, “-”, “+” e “M”. Os dois primeiros referem-se à coleta de informações da grandeza que se irá medir. Devem ser conectados em paralelo e em caso de medições em corrente contínua deve-se atender à identificação estabelecida pelo índice positivo e negativo. O terminal “-HV” não pode ser conectado diretamente ao ponto de medição, fazendo-se a necessidade do uso de um resistor linear de alta impedância.

Os demais terminais, fisicamente localizados na extremidade oposta do transdutor, referem-se à alimentação e saída de sinal do transdutor. Os terminais identificados por “+” e “-” devem ser conectados a uma fonte de corrente contínua simétrica de ± 15 V. Por fim, o terminal identificado por “M” é a saída de sinal do

transdutor. Vale observar que esse sinal é de corrente e um circuito eletrônico fará o condicionamento desse sinal para que seja convertido em sinal de tensão com amplitude ajustável. Este circuito eletrônico será posteriormente abordado.

Este sensor possibilita obter valores instantâneos da tensão ao longo do tempo e por este motivo ele é aplicável em processos que se exige analisar a presença de harmônicos, a frequência da onda, a qualidade da onda e outras informações. A Figura 12 mostra o sensor de tensão utilizado.

Figura 12 - Sensor de tensão modelo LV-20P



Fonte: LEM

- **Resistor de Precisão**

Elemento secundário do sensor de tensão, ele deve ser conectado ao ponto de medição e ao terminal “-HV”, com o objetivo de limitar a corrente que passa pelo sensor, uma vez que ele possui baixa resistência interna. Neste projeto foi adotado um resistor de 50 K Ω e 5 W de potência.

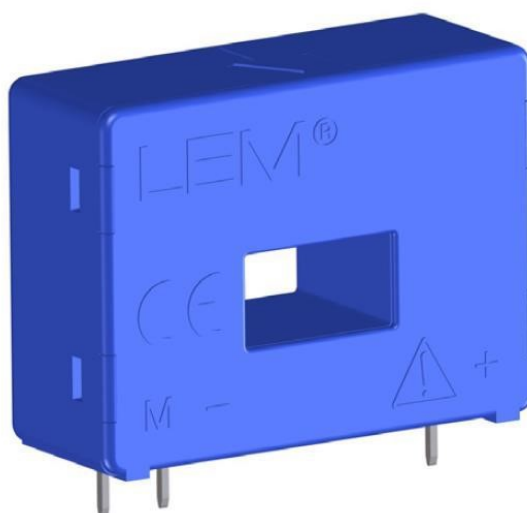
- **Sensor de Corrente LA-55P**

Para realizar a medição de corrente foi utilizado o transdutor de corrente da fabricante LEM modelo LA-55P. Este sensor possibilita a medição de correntes eficazes de até 50 A. Além da sua baixa interferência a ruídos externos e sua boa linearidade, este sensor oferece a condição de medição indireta de corrente por

efeito “*hall*”. Uma grande vantagem desse tipo de sensor é a possibilidade de se realizar a medição sem necessariamente seccionar o circuito. Para realizar a medição é necessário que o condutor por onde flui a corrente que se deseja medir esteja dentro do orifício central do sensor.

O sensor possui 3 terminais e estes são identificados pelos símbolos “-”, “+” e “M”. Assim como no sensor de tensão, os símbolos “-” e “+” referem-se à alimentação do sensor e devem ser conectados à fonte de $\pm 15\text{ V}$ obedecendo a polaridade identificada pelos símbolos. O terminal identificado pelo símbolo “M” é responsável por encaminhar o sinal de corrente ao circuito condicionador, assim como ocorre no sensor de tensão. A Figura 13 mostra o sensor de corrente utilizado.

Figura 13 - Sensor de corrente modelo LA-55P



Fonte: LEM

- **Amplificador Operacional**

Para realizar o condicionamento dos sinais de corrente gerados pelos sensores, o circuito eletrônico conta com um circuito integrado que abriga dois amplificadores. Um deles é destinado ao aumento da amplitude do sinal de medição de tensão e o outro para o aumento da amplitude do sinal de medição de corrente.

Este amplificador possui boa rejeição de ruído de modo comum, apresenta elevada frequência de ganho unitário em relação aos sinais que serão medidos e além disso possui alimentação simétrica de $\pm 15\text{ V}$, assim como os sensores.

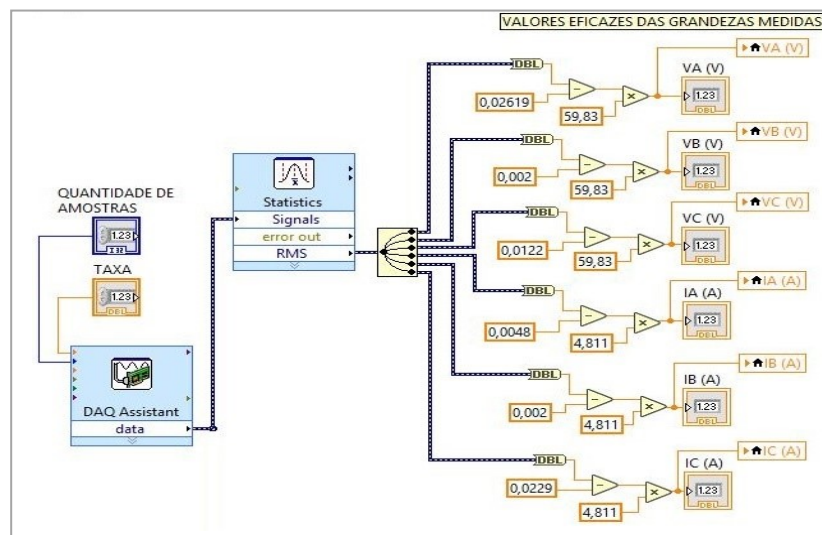
3.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.4.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA SUPERVISÓRIO

Para apresentar ao usuário os sinais obtidos pelas placas condicionadoras faz-se necessário o desenvolvimento da aplicação responsável pelo processamento e apresentação dos dados. As informações recebidas pela PCI 6229 instalada no computador permite a troca de informações entre as grandezas medidas e a plataforma de programação LabVIEW. Trata-se de um ambiente de programação em linguagem gráfica que trabalha através de um sistema de blocos ligados por linhas, responsáveis pelo fluxo de dados da programação (*National Instruments*).

Os sinais coletados pelos sensores são condicionados para uma tensão alternada limitada em -10 V à 10 V. Uma vez que estes sinais chegam ao módulo de aquisição presente no computador faz-se necessário ajustar esses sinais para que seja apresentado ao usuário os valores reais de tensão em corrente. Assim, a Figura 14 mostra um trecho do código utilizado para remover um ruído de sinal contínuo e realizar a correção dos dados dinâmicos de tensão e corrente.

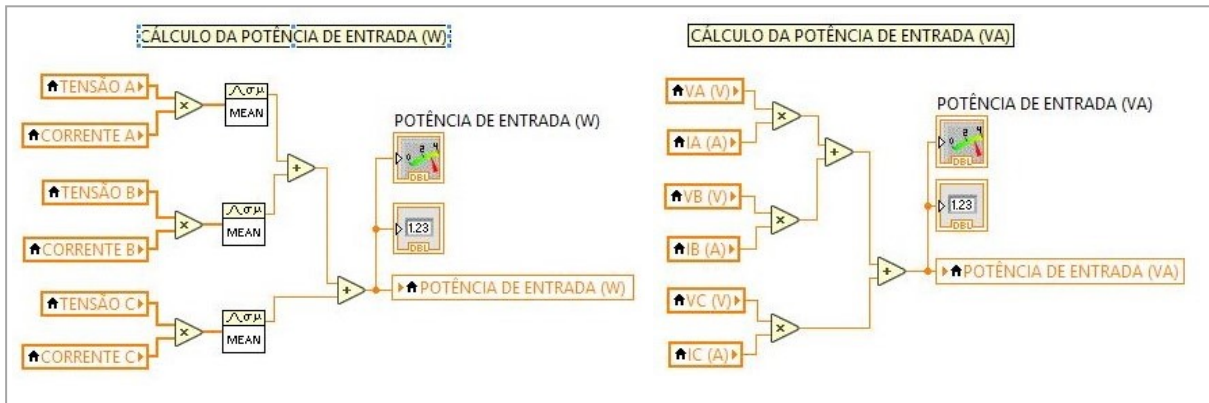
Figura 14 - Trecho de código desenvolvido



Fonte: Autor

Uma vez ajustado os valores de tensão e corrente, pode-se então manipular estas variáveis com o objetivo de obter valores associados, como potências e fator de potência. O trecho de código para o cálculo das potências é apresentado na Figura 15 a seguir.

Figura 15 - Cálculo das potências



Fonte: Autor

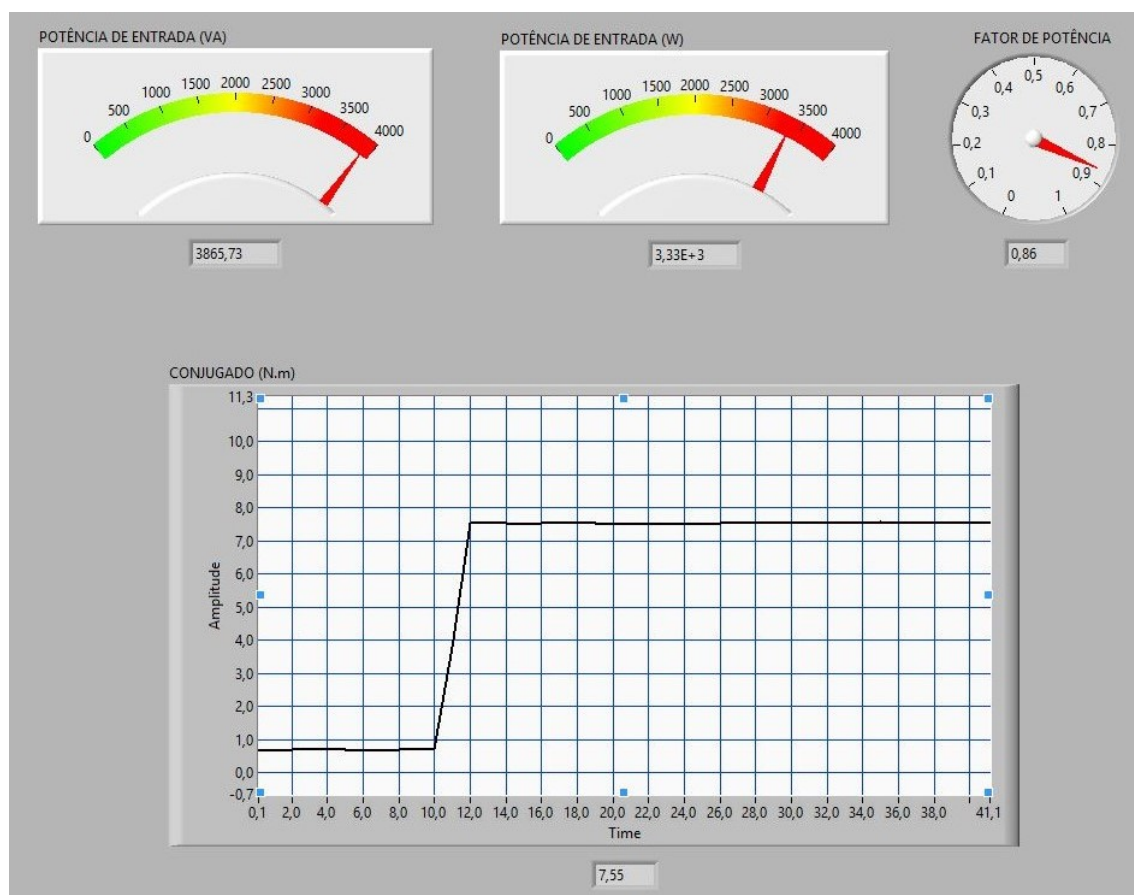
O desenvolvimento da aplicação se dá através de duas janelas. A primeira, denominada diagrama de blocos, é onde se realizam as conexões e ocorre o fluxo de processamento. A segunda, chamada de painel frontal, é a que efetivamente faz a interface com o usuário. Esta última oferece ferramentas como gráficos, mostradores digitais, além de outros indicadores animados que contribuem com a amigável tela de monitoramento.

Uma grande vantagem em relação às outras linguagens baseadas em texto é a facilidade de se visualizar o fluxo de processamento, visto que este é exibido em paralelo devido à programação gráfica. Interfaces configuráveis definidas pelo usuário, assistentes interativos e uma linguagem de alto nível com desempenho comparável ao de outras linguagens (como a linguagem C) são alguns fatores que favorecem sua utilização no desenvolvimento de aplicações sofisticadas de teste, medição e controle.

Assim, o sistema supervisor que fornece as informações ao usuário é inteiramente virtual. Por meio deste, é possível realizar medições de grandezas elétricas como tensões e correntes, potências ativas e reativas, além do fator de potência.

A aplicação desenvolvida em linguagem gráfica conta com três telas. A primeira refere-se ao monitoramento da potência aparente e ativa de entrada, além de valores de fator de potência e conjugado. A Figura 16 abaixo apresenta a primeira tela do sistema supervisor.

Figura 16 - Primeira tela do sistema supervisório



Fonte: Autor

A segunda tela apresenta as formas de onda e os valores eficazes de tensões e correntes para as três fases. Além disso, o sistema também possui uma terceira tela para ensaios em que se deseja realizar medições em outras 3 fases, como pode ser útil em ensaios com motores de indução com rotor bobinado, por exemplo. Estas últimas também permitem ao usuário escolher como será realizada a aquisição de dados.

A taxa de aquisição e quantidade de amostras são parâmetros ajustáveis para o melhor aproveitamento das informações fornecidas. O usuário também possui a opção de salvar dados de valores instantâneos das correntes e tensões para as 3 fases para a respectiva quantidade de pontos e frequência escolhida. A Figura 17 apresenta o arquivo de texto gerado para as formas de ondas de um determinado instante de tempo.

Foram armazenadas 8192 amostras a uma taxa de 7,68 kHz. Esta quantidade de amostras e taxa de aquisição foram estrategicamente escolhidas de maneira que

resultem em ciclos completos para as formas de ondas de tensão e correntes para serem armazenadas.

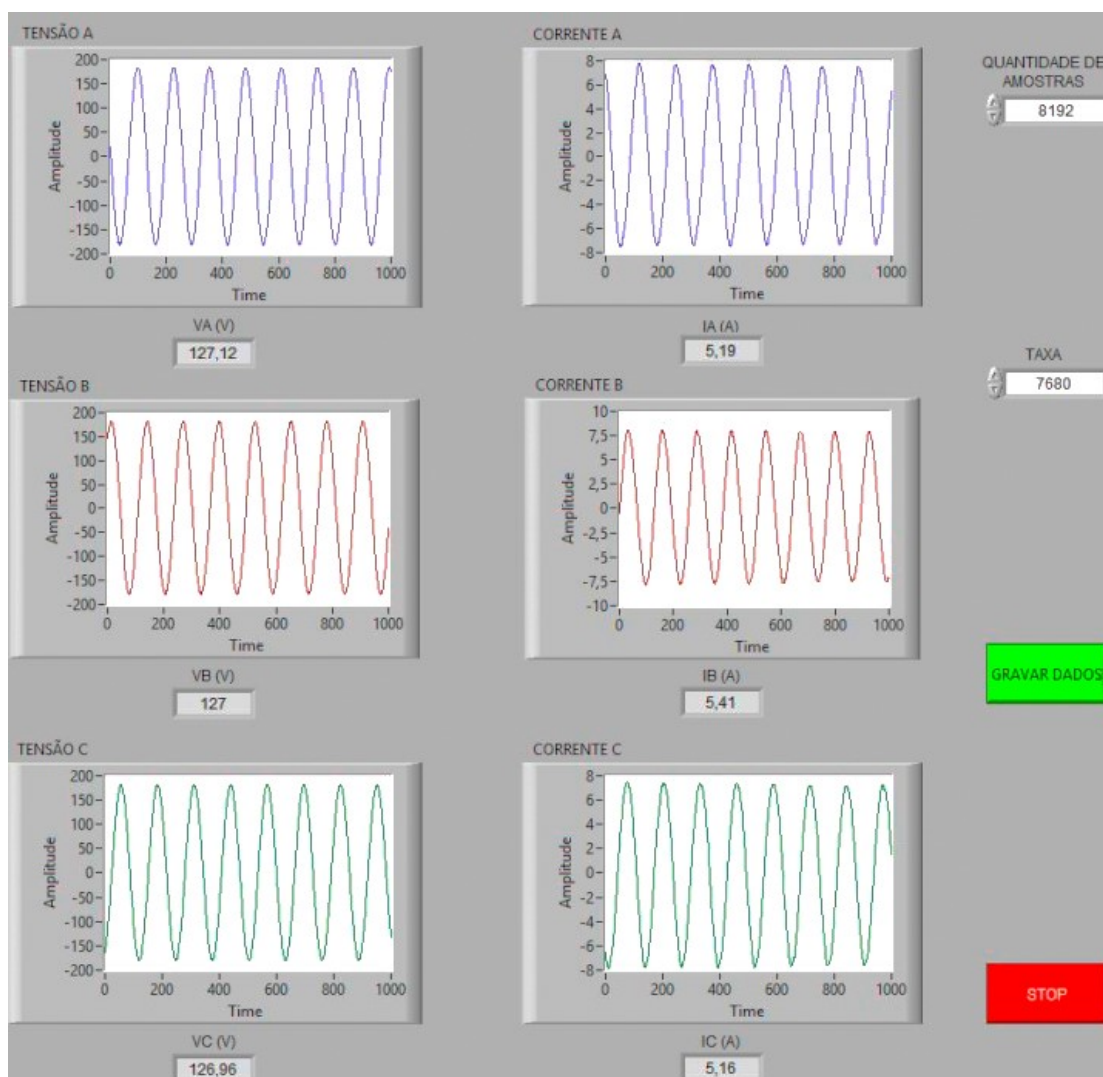
Figura 17 - Arquivo de texto que armazena os pontos amostrados

X_Value	Voltage_A	Voltage_B	Voltage_C	Current_A	Current_B	Current_C
0,000000	169,862654	-139,202523	-26,412745	5,771055	-11,845239	5,913794
0,000130	173,063981	-133,614739	-35,124240	6,274979	-11,807795	5,375547
0,000260	175,566836	-127,871739	-43,583510	6,800745	-11,745390	4,739012
0,000391	177,739858	-121,236247	-52,197998	7,335871	-11,654902	4,091555
0,000521	179,621851	-114,794776	-60,657270	7,850716	-11,539451	3,456580
0,000651	180,999391	-107,984668	-68,903121	8,237630	-11,330393	2,810684
0,000781	182,105304	-101,174560	-76,857943	8,568378	-11,051128	2,202231
0,000911	182,648560	-93,568971	-84,793364	8,886646	-10,735979	1,595338
0,001042	182,784374	-86,002187	-92,495962	9,195553	-10,494158	1,010287
0,001172	182,473942	-78,144373	-99,965738	9,540343	-10,249216	0,434597
0,001302	181,387431	-70,092541	-107,260896	9,896054	-10,029236	-0,155135
0,001432	180,145704	-62,001906	-114,206818	10,187799	-9,698487	-0,801031
0,001562	178,612948	-53,717251	-120,822907	10,426500	-9,288170	-1,456289
0,001693	176,536936	-45,452000	-127,244977	10,616836	-8,831049	-2,111546
0,001823	174,072884	-36,798710	-133,317811	10,805613	-8,419173	-2,721560
0,001953	171,104381	-28,126019	-139,177224	10,999070	-8,068142	-3,258247
0,002083	167,747838	-19,336916	-144,609793	11,167564	-7,740512	-3,729408
0,002213	164,177874	-10,489609	-149,654322	11,237770	-7,384801	-4,149085
0,002344	160,025850	-1,719910	-154,466027	11,270533	-6,935481	-4,624927
0,002474	155,485787	6,894572	-158,676269	11,281454	-6,447158	-5,136652
0,002604	150,247253	15,897093	-162,711893	11,301736	-5,966635	-5,651498
0,002734	145,202738	24,647387	-166,281869	11,290815	-5,484553	-6,105498
0,002864	139,576164	33,358877	-169,560814	11,208128	-4,958786	-6,542337
0,002995	133,871983	41,915151	-172,412915	11,083317	-4,387776	-6,976055
0,003125	127,721556	50,413218	-174,663552	10,916382	-3,763721	-7,434736

Fonte: Autor

A Figura 18 apresenta a segunda tela do sistema supervisor. Nela é possível verificar os valores tanto instantâneos como eficazes das grandezas de medição direta (tensões e correntes). Além disso permite com que o usuário ajuste a armazenagem dos valores instantâneos de acordo com a quantidade de pontos e frequência de amostragem desejada.

Figura 18 - Segunda tela do sistema supervisório



Fonte: Autor

3.4.2 VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL

O procedimento para realizar a comprovação do sistema foi feito através de cinco ensaios utilizando máquinas de indução trifásicas com rotor em gaiola de esquilo. Nos dois primeiros (a vazio e rotor bloqueado), aplicou-se as informações mostradas no sistema supervisório para o cálculo dos parâmetros do circuito equivalente para três máquinas com características operacionais distintas.

Os motores utilizados são todos do tipo indução trifásico com rotor em gaiola de esquilo e diferem-se pelas potências nominais e números de polos. O primeiro deles é um motor de $\frac{1}{2}$ CV da fabricante EBERLE. Trata-se de uma máquina mais

antiga em pretende-se, com os ensaios, analisar as características operacionais comparando-a com máquinas mais novas e com maiores desempenhos.

Já o segundo motor trata-se de um motor de 2 CV de 2 polos da fabricante WEG. Por fim, o uso do terceiro motor, que se difere do segundo apenas no número de polos e data de fabricação, permite realizar uma análise nos aspectos de evolução de eficiência de motores ao longo dos anos além de viabilizar a plataforma para motores com diferentes velocidades.

Portanto, o uso destas três máquinas permite observar o adequado funcionamento da plataforma em máquinas com diferentes velocidades, potências, fabricantes e até mesmo que podem ter sofrido variações nas características nominais.

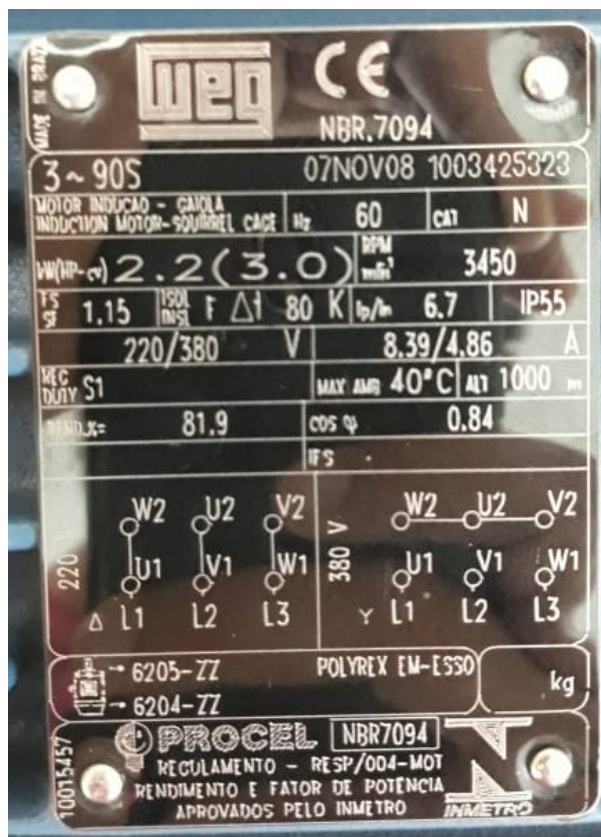
Para facilidades no entendimento, os motores são nomeados conforme a ordem de apresentação sendo o primeiro o de 1/2 CV, o segundo o de 3 CV com 2 polos e o terceiro o de 3 CV com 6 polos. As figuras abaixo apresentam os dados de placa dos motores utilizados nos ensaios para determinação do circuito equivalente.

Figura 19 - Dados de placa MIT 1/2 CV (MOTOR 01)



Fonte: Autor

Figura 20 - Dados de placa MIT 3 CV de 2 polos (MOTOR 02)



Fonte: Autor

Figura 21 - Dados de placa MIT 3 CV 6 polos (MOTOR 03)



Fonte: Autor

Os demais ensaios foram realizados na plataforma experimental onde foi simulado a carga no eixo do MOTOR 02 (2 CV de 2 polos) com o objetivo de avaliar também o comportamento sob carga da máquina em estudo. Nestes ensaios com carga, as medidas foram comparadas com os dados fornecidos pelo software da fonte de alimentação devidamente calibrada. Esta comparação permite validar a confiabilidade do sistema em virtude dos pequenos erros associados.

A. ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DO CIRCUITO EQUIVALENTE

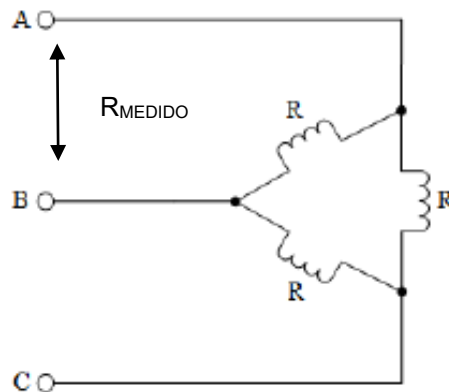
O circuito equivalente que representa uma máquina de indução trifásica é muito semelhante ao de um transformador. Como trata-se de uma máquina de conversão eletromecânica de energia, os parâmetros elétricos dependem da carga a ser atuada. Essa relação se dá através da razão entre a resistência do rotor e o escorregamento, que por sua vez varia com a carga mecânica no eixo.

Por meio do circuito equivalente pode-se determinar variadas características operacionais dos motores. O circuito permite analisar particularidades nas variações de correntes, velocidade e perdas em função da exigência de conjugado (UMANS, 2014).

A determinação do circuito ocorre através de dois ensaios conhecidos como ensaio a vazio e ensaio de rotor bloqueado. No primeiro deles, a máquina é ligada sob tensão nominal e é então verificada a corrente solicitada pela máquina. No segundo ensaio, como o nome já sugere, é realizado o bloqueio mecânico do eixo do motor e aplica-se tensão gradativamente até que se alcance a corrente nominal.

Complementarmente a estes, é feito também a medição direta da resistência de enrolamento do rotor. Esta medição pode ser feita através de um ohmímetro sem a necessidade de se desfazer o fechamento dos terminais da máquina. Como neste estudo optou-se por trabalhar com uma máquina com fechamento em delta, as medições foram realizadas conforme a Figura 22 abaixo.

Figura 22 - Medição direta da resistência do estator



Fonte: OLIVEIRA, 2018

O circuito equivalente é uma representação feita por fase e os valores medidos entre as três combinações (AB, AC e BC) devem ser corrigidos de maneira que resultem na resistência representada por R na figura acima. Como esperado para um sistema trifásico equilibrado, as medições resultaram em um mesmo valor. A medição foi realizada na temperatura ambiente (T°_{AMB}) de 25°C para os três motores. Assim, por associação de resistências e análise de circuitos elétricos, a resistência dos enrolamentos do estator (R_1) pode ser calculada conforme a equação abaixo.

$$R = \frac{3}{2} R_{MEDIDO} \quad (07)$$

Por meio da equação acima pode-se determinar os valores de resistência do estator para as três máquinas distintas conforme apresentado na Tabela 3 abaixo.

Tabela 3 - Valores de resistências do estator

Grandeza	Motor 1	Motor 2	Motor 3
R (Ω)	20	2,25	2,4
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	25	25	25

Fonte: Autor

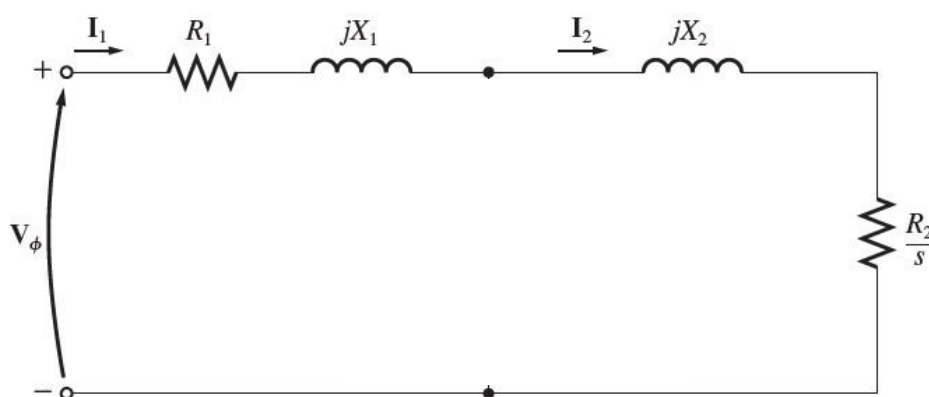
- **Ensaio com rotor bloqueado**

O ensaio com rotor bloqueado permite determinar os parâmetros representativos dos enrolamentos do estator e dos enrolamentos rotor. Neste ensaio

pode-se observar que a tensão que resulta na corrente nominal é pequena e por este motivo pode-se desconsiderar os efeitos magnetizantes da máquina. Outra consideração a ser feita é que, como o eixo do motor está parado, o escorregamento (s) possui valor unitário.

Assim, o circuito elétrico anteriormente apresentado na Figura 3 é simplificado e se resume ao circuito apresentado na Figura 23 abaixo.

Figura 23: Circuito equivalente na condição de rotor bloqueado



Fonte: Autor

A Tabela 4 abaixo apresenta os valores médios das principais informações referentes ao ensaio de rotor bloqueado para as três máquinas.

Tabela 4 - Dados do ensaio de rotor bloqueado

Grandeza	Motor 1	Motor 2	Motor 3
Tensão (V)	56,14	43,04	57,65
Corrente (A)	2,12	8,57	10,2
Fator de Potência	0,85	0,52	0,48
Temperatura (°C)	42	38	41,5

Fonte: Autor

Por meio das informações coletadas no ensaio, pode-se realizar os procedimentos analíticos na determinação dos parâmetros. Logo, as equações abaixo permitem calcular as resistências e reatâncias para o circuito anteriormente apresentado. É importante ressaltar que na representação do circuito equivalente as grandezas são apresentadas por fase. Assim, como a medição de corrente foi feita fora do fechamento delta, as correntes utilizadas para efeitos de cálculos são reduzidas por $\sqrt{3}$ da corrente média lida pelo sistema supervisor.

$$Z_{BL} = \frac{V_{BL}}{I_{BL}} \quad (08)$$

$$R_{2(T^{\circ}BL)} = Z_{BL} \cos(\emptyset) - R_{1(T^{\circ}BL)} \quad (09)$$

$$X_{BL} = Z_{BL} \text{sen}(\emptyset) = X_1 + X_2 \quad (10)$$

Em que:

V_{BL} : tensão na condição de rotor bloqueado;

I_{BL} : corrente por fase na condição de rotor bloqueado;

$R_{2(T^{\circ}BL)}$: resistência do rotor na temperatura de rotor bloqueado ($T^{\circ}BL$);

$R_{1(T^{\circ}BL)}$: resistência do estator corrigida para a temperatura de rotor bloqueado ($T^{\circ}BL$) conforme a seguinte equação:

$$R_{1(T^{\circ}BL)} = R_{1(T^{\circ}AMB)} \left(\frac{T^{\circ}BL + 235,5}{T^{\circ}AMB + 235,5} \right)$$

\emptyset : ângulo do fator de potência correspondente ao ensaio de rotor bloqueado;

X_{BL} : reatância equivalente na condição de rotor bloqueado;

X_1 : reatância nos enrolamentos do estator;

X_2 : reatância nos enrolamentos do rotor.

A reatância equivalente (X_{BL}) pode ser decomposta como uma soma da reatância do estator (X_1) com a reatância do rotor (X_2). A proporcionalidade entre estas são definidas em função da categoria do motor. Como neste caso os motores são categoria N, têm-se a relação mostrada abaixo.

$$0,68 = \frac{X_1}{X_2} \quad (11)$$

Aplicando-se as equações acima com base nos valores informados pela interface digital pode-se determinar as resistências e reatâncias conforme apresentado na Tabela 5 abaixo.

Tabela 5 - Parâmetros série do circuito equivalente

Grandeza	Motor 1	Motor 2	Motor 3
X_1 (Ω)	9,7798	3,0074	3,4761
X_2 (Ω)	14,3820	4,4227	5,1119
R_2 (T° BL) (Ω)	17,6815	2,1610	2,1469
R_2 (T° AMB) (Ω)	16,5983	2,0583	2,0191

Fonte: Autor

- **Ensaio a vazio**

Para continuar a determinação dos demais parâmetros da máquina, o ensaio a vazio possibilita encontrar as variáveis referentes às características magnetizantes do motor. A Tabela 6 abaixo apresenta as principais informações obtidas para o ensaio a vazio.

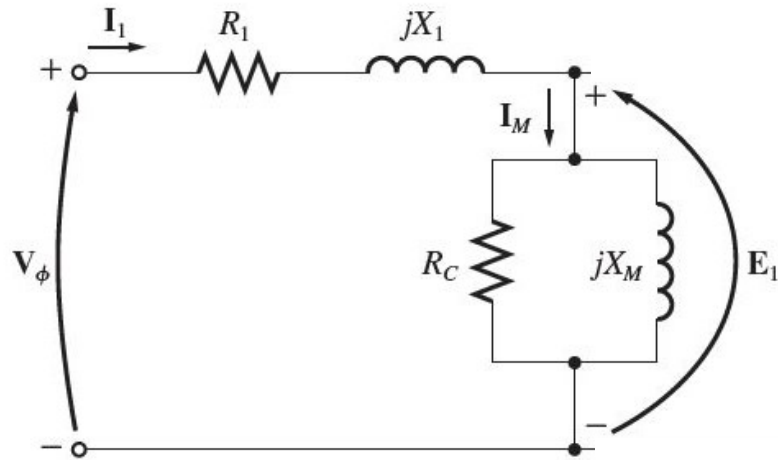
Tabela 6 - Dados do ensaio a vazio

Grandeza	Motor 1	Motor 2	Motor 3
Tensão (V)	220,62	220,89	220,58
Corrente (A)	1,62	4,32	6,36
Fator de Potência	0,21	0,15	0,12
Temperatura ($^\circ$ C)	38,5	35	36,3

Fonte: Autor

Uma vez que a máquina é ligada sob tensão nominal e sob nenhuma carga no eixo, espera-se que a velocidade mecânica seja praticamente igual à velocidade síncrona. Por esta premissa, assume-se que o escorregamento é praticamente nulo e então têm-se que a corrente que circula pela máquina é apenas referente às perdas estator e devido ao fenômeno de magnetização para produção do campo girante. Logo, o circuito elétrico anteriormente apresentado na Figura 03 é simplificado e se resume ao circuito apresentado na Figura 24 a seguir.

Figura 24: Circuito equivalente para operação a vazio



Fonte: Autor

A análise do circuito acima permite observar que a corrente de magnetização (I_M) pode ser decomposta em duas partes: uma que passa pela resistência R_C e outra pela reatância X_M . Essas correntes, identificadas como I_{RC} e I_{XM} podem ser encontradas pelas equações abaixo.

$$I_{RC} = I_0 \cos(\phi) \quad (12)$$

$$I_{XM} = I_0 \sin(\phi) \quad (13)$$

Em que:

I_0 : corrente média por fase para o ensaio a vazio;

ϕ : ângulo do fator de potência correspondente ao ensaio a vazio.

A manipulação dos valores de tensão, correntes e fator de potência permitem encontrar os valores de R_C e X_M por meio das equações abaixo.

$$E_1 = V_1 - I_0 \sqrt{R_{1(T^{\circ}VZ)}^2 + X_1^2} \quad (14)$$

$$R_{C(T^{\circ}VZ)} = \frac{E_1}{I_{RC}} \quad (15)$$

$$X_M = \frac{E_1}{I_{XM}} \quad (16)$$

Assim, os valores de R_C e X_M na temperatura do ensaio a vazio são apresentados na Tabela 7 abaixo.

Tabela 7 - Parâmetros representativos do ramo magnetizante

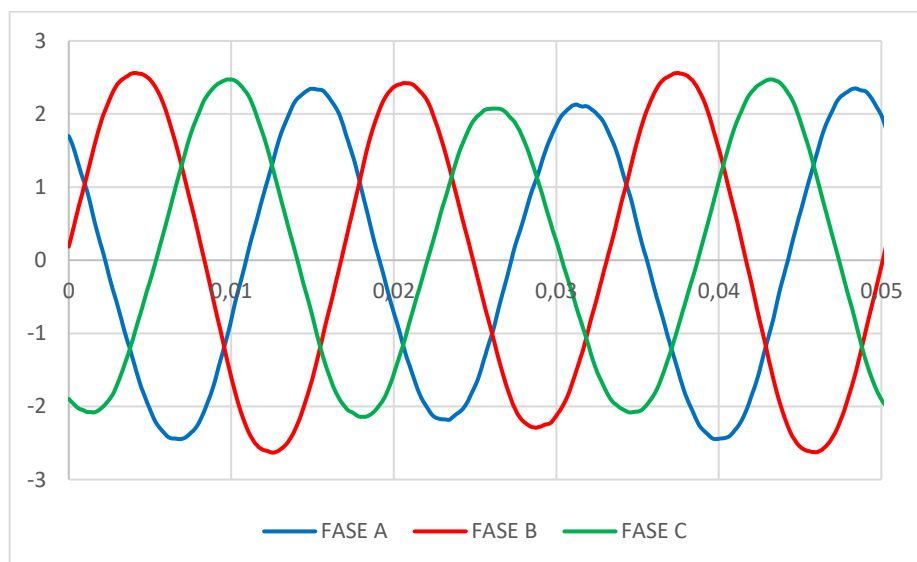
Grandeza	Motor 1	Motor 2	Motor 3
R_C (T° vZ) (Ω)	1017,2219	565,3812	465,3961
X_M (Ω)	218,4886	85,7777	56,2540

Fonte: Autor

Outra análise que pode ser verificada, com base nas informações do sistema supervisor, consiste nas formas de onda das correntes do MIT em estudo. Percebe-se que, no caso dos três motores avaliados, o menor motor apresentou formas de onda de correntes distorcidas e desequilibradas.

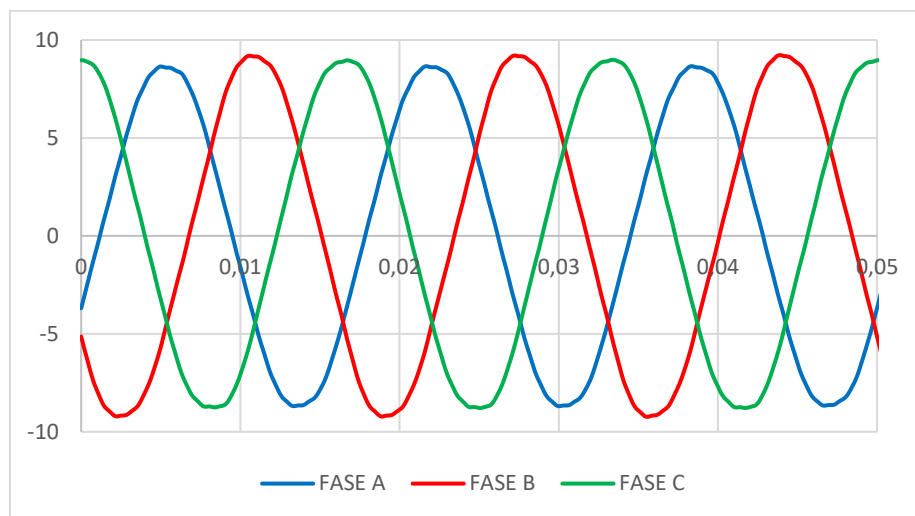
Além de ser possível realizar essa verificação no momento do ensaio, a interface digital permite que o usuário salve os pontos das formas de ondas para posteriores análises. As Figuras 25 e 26 abaixo apresentam as formas de ondas do motor um (1/2 CV) e do motor três (3 CV com 6 polos) geradas a partir dos pontos armazenados pelo sistema supervisor.

Figura 25 - Formas de ondas das correntes do MOTOR 01



Fonte: Autor

Figura 26 - Formas de ondas das correntes do MOTOR 03



Fonte: Autor

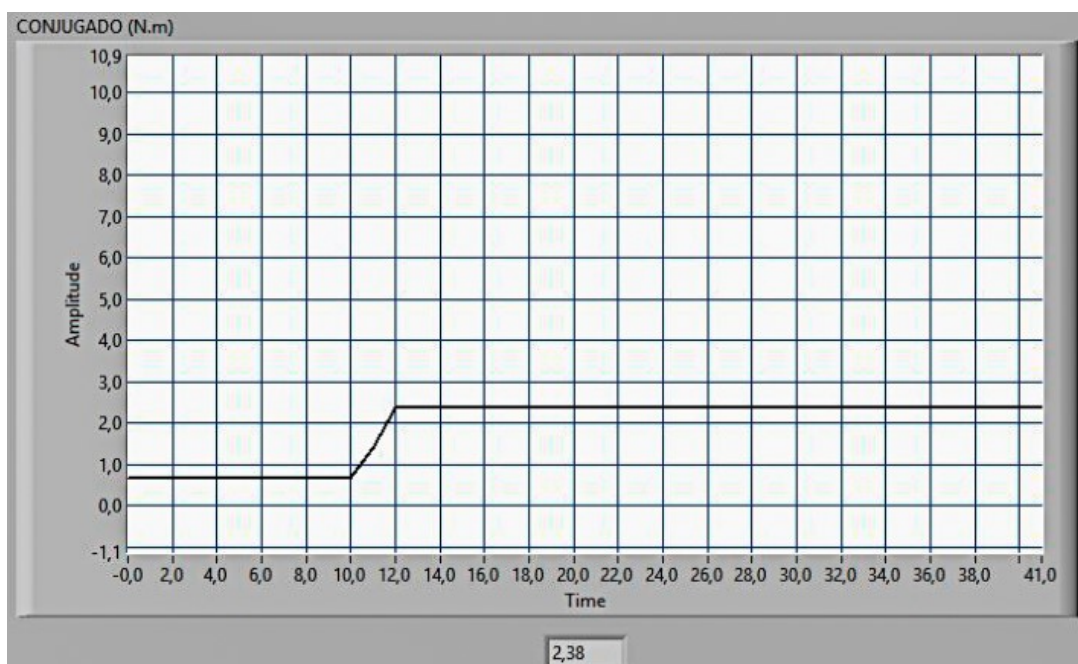
B. ENSAIO COM 40% DE CARGA

Com o objetivo de verificar a atuação da máquina sob carga no eixo, a máquina de corrente contínua atua como carga geradora de maneira que resulta em um conjugado resistente e contrário à operação do motor em análise.

Ao se realizar estrategicamente a ligação da máquina de corrente contínua no banco de resistências pode-se simular a operação do motor para um degrau de carga correspondente a 40% do conjugado nominal.

Além disso, são configurados pela fonte programável valores de frequência e amplitude de tensão correspondente aos dados de placa do MIT de 2 CV com 2 polos. O valor do conjugado medido pela instrumentação virtual é apresentado a partir captura de tela mostrada na Figura 27.

Figura 27 - Degrau de conjugado para 40% de carga



Fonte: Autor

Para a condição de carga apresentada acima, é mostrado na Tabela 8 a análise comparativa entre os resultados gerados pelo sistema de instrumentação e pela fonte.

Tabela 8 - Dados do ensaio com 40% de carga

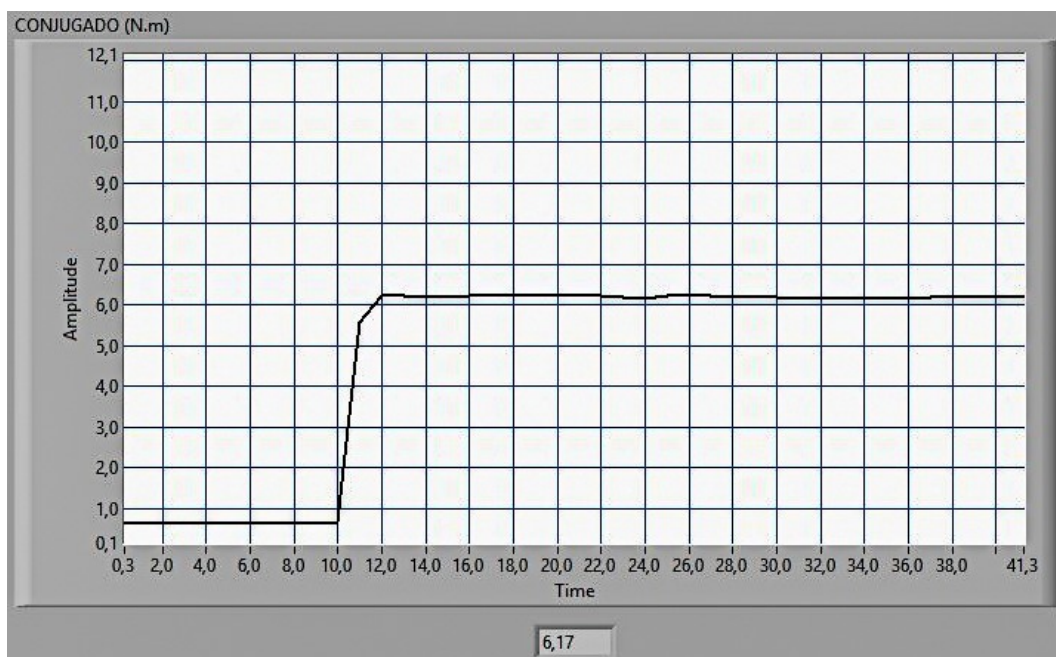
Grandeza	Instrumentação	Fonte Programável	Erro
Corrente (A)	5,43	5,38	0,93%
Tensão (V)	127,08	127	0,06%
Potência (KVA)	2,07	2,05	0,98%
Potência (KW)	1,23	1,18	4,24%
Fator de Potência	0,59	0,58	1,72%

Fonte: Autor

C. ENSAIO COM CARGA NOMINAL

Para as mesmas condições de alimentação é agora aplicado um degrau de conjugado correspondente à carga nominal do motor em estudo. Para isso foi novamente alterada a conexão entra as de resistências do banco de maneira a aumentar a corrente de armadura que circula pela máquina de corrente contínua. A Figura 28 apresenta o conjugado medido pelo sistema supervisorio.

Figura 28 - Degrau de conjugado na condição de carregamento nominal



Fonte: Autor

Para a condição nominal, é apresentada na Tabela 09 a análise comparativa entre as informações fornecidas pelo sistema de monitoramento e pela fonte.

Tabela 9 - Dados do ensaio com carga nominal

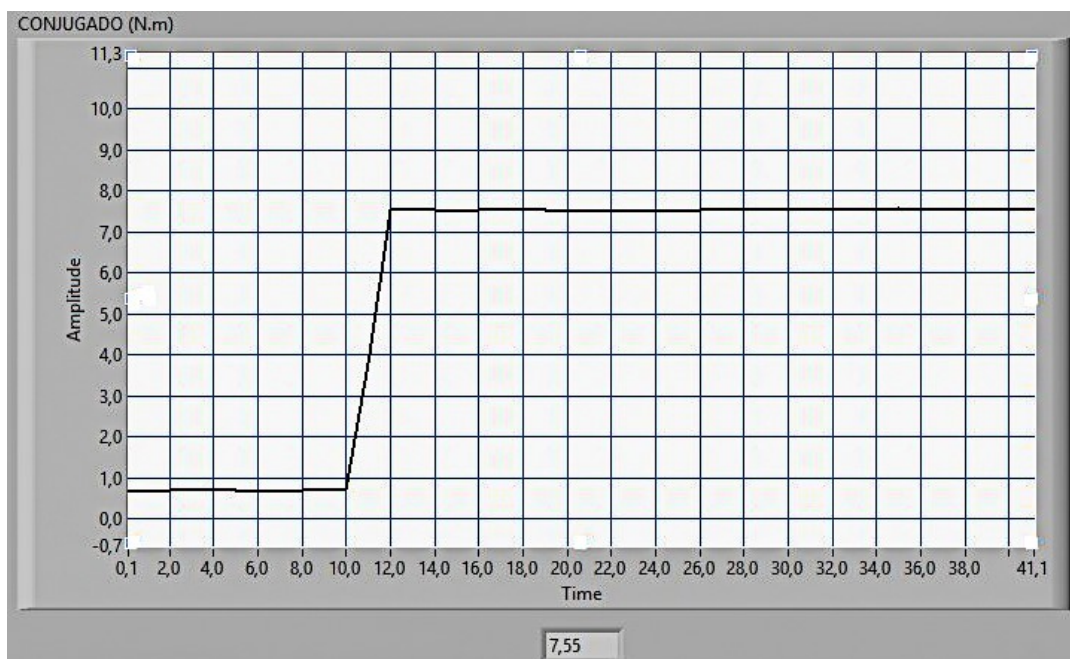
Grandeza	Instrumentação	Fonte Programável	Erro
Corrente (A)	8,63	8,61	0,23%
Tensão (V)	126,89	127	0,09%
Potência (KVA)	3,28	3,23	1,55%
Potência (KW)	2,72	2,63	3,42%
Fator de Potência	0,83	0,8	3,75%

Fonte: Autor

D. ENSAIO COM 120% DE CARGA

Por fim é apresentada a condição de operação na qual exige-se do motor um conjugado maior que o nominal. Esta condição afeta negativamente na vida útil da máquina. Em uma aplicação industrial indicaria algum problema e, portanto, a instrumentação virtual permite acompanhar em tempo real que há alguma falha no processo. O conjugado é apresentado pela Figura 29.

Figura 29 - Degrau de conjugado para 120% de carga



Fonte: Autor

É apresentado na Tabela 10 as informações obtidas pelo sistema de monitoramento virtual e pela fonte para a condição de sobrecarga descrita.

Tabela 10 - Dados do ensaio de sobrecarga

Grandeza	Instrumentação	Fonte Programável	Erro
Corrente (A)	9,94	10,01	0,70%
Tensão (V)	126,88	127	0,09%
Potência (KVA)	3,78	3,81	0,68%
Potência (KW)	3,24	3,19	1,57%
Fator de Potência	0,85	0,84	1,19%

Fonte: Autor

4 CONCLUSÃO

De acordo com os ensaios realizados é possível observar que o sistema de aquisição e de instrumentação se mostrou consideravelmente preciso ao ser comparado com os parâmetros da fonte programável.

A possibilidade de armazenamento dos valores instantâneos de tensões e correntes, a uma taxa conhecida e configurável, oferece a possibilidade de simulações computacionais em posteriores estudos. A instrumentação virtual auxilia

dessa forma nos estudos das máquinas elétricas rotativas ao mesmo tempo em que apresenta seu grande potencial em aplicações industriais.

Pelos resultados dos ensaios, percebe-se também que motores sobredimensionados apresentam baixo fator de potência e menor rendimento se comparado à operação sob carga nominal. Por esse motivo, o sistema de monitoramento também pode auxiliar nessa gestão de equipamentos ao informar como está o desempenho da máquina.

Além disso, como verificado pelos ensaios realizados no motor de $\frac{1}{2}$ CV, foi possível perceber que este é de menor eficiência se comparado aos demais e uma das justificativas consiste nas limitações construtivas. Outra vertente a ser analisada reside no fato de que se trata de uma máquina antiga, com limitações tecnológicas da época, e que também pode já ter sido rebobinada.

Posto que os parâmetros operacionais das máquinas podem diferir daqueles apresentados pela placa e manual do fabricante, o sistema apresenta-se de suma importância na identificação de possíveis falhas, sendo capaz de fornecer informações que auxiliem na manutenção preditiva ou corretiva de um determinado processo industrial.

Por fim, uma sugestão para a segunda parte de execução do trabalho se baseia em procurar soluções eficientes de controle da MCC e monitorar a velocidade para então estimar perdas, potência no eixo, além de outros parâmetros operacionais de forma automática. Além disso, pode-se também dar continuidade no desenvolvimento do sistema supervisório para que ele forneça os resultados finais dos parâmetros do circuito equivalente da máquina em análise na plataforma de ensaios.

5 REFERÊNCIAS

Eletrobrás (2021). **Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL)**. Disponível em: <http://www.eletrobras.gov.br/>. Acesso em: 05 de maio de 2021.

EFEI (2001). **Conservação de energia: eficiência energética de instalações e equipamentos**. Itajubá: Editora da EFEI.

PATANÉ, E. J (2008). **Implementação de controle de velocidade em malha fechada para motores de corrente contínua utilizando um sistema de aquisição de dados**. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia Mauá do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia.

GUTIERREZ, R.M.V., PAN, S.S.K (2008). **Complexo Eletrônico: Automação do Controle Industrial**. BNDES Setorial.

FILHO, J. M. (2017). **Instalações Elétricas Industriais**. 9 ed. Rio de Janeiro: Editora LTC.

ABIMAQ (2006). **A história das máquinas**. 1 ed. São Paulo: Magma editora cultural.

UMANS, S. D. (2014). **Máquinas Elétricas**. 7 ED. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda.

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

WEG (2021). **Seleção de Motores Elétricos**. Disponível em: http://ecatalog.weg.net/tec_cat/tech_motor_sel_web.asp. Acesso em 05 de maio de 2021

OLIVEIRA, C. A. (2018). **Plataforma Para Ensaios de Motores de Indução Trifásicos e Simulação de Cargas Mecânicas: Acionamento, Operação e Monitoramento com auxílio de Fonte Programável**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia.

National Instruments. **Ambiente gráfico de desenvolvimento de sistemas LabVIEW**. Disponível em: <http://www.ni.com/labview/pt/>. Acesso em 05 de Maio de 2021.

ELEKRO (2012). **Eficiência Energética: Fundamentos e Aplicações**. 1 ed. Campinas: ANEEL.

HBM. **Sensores e Transdutores de Torque**. Disponível em: <https://www.hbm.com/pt/0264/sensores-e-medidores-de-torque/>. Acesso em 05 de Maio de 2021.

LEM. **Sensores de corrente e tensão**. Disponível em: <https://www.lem.com/en>. Acesso em 05 de Maio de 2021.

BEN. **Balanco Energético Nacional**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2020>. Acesso em 05 de Maio de 2021.