



**ROSALRA MARIA ALVES DE MORAIS**

**SISTEMA DE MONITORAMENTO E CONTROLE DE  
TENSÃO E CORRENTE EM MÁQUINAS OPERATRIZES**

**LAVRAS – MG**

**2022**

**ROSALRA MARIA ALVES DE MORAIS**

**SISTEMA DE MONITORAMENTO E CONTROLE DE TENSÃO E CORRENTE EM  
MÁQUINAS OPERATRIZES**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas e Automação, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Sandro Pereira da Silva

Orientador

Prof. Dra. Joelma Rezende Durão Pereira

Coorientadora

**LAVRAS – MG**

**2022**

**Ficha catalográfica elaborada pela Coordenadoria de Processos Técnicos  
da Biblioteca Universitária da UFLA, com dados informados pelo próprio autor.**

Morais, Rosalra Maria Alves de

Sistema de monitoramento e controle de tensão e corrente  
em máquinas operatrizes / Rosalra Maria Alves de Moraes. –  
Lavras : UFLA, 2022.

84 p. : il.

Dissertação (Mestrado Acadêmico)–Universidade Federal  
de Lavras, 2022.

Orientador: Prof. Dr. Sandro Pereira da Silva.

Bibliografia.

1. Manufatura subtrativa. 2. Monitoramento de sinais. 3.  
Interface homem-máquina. I. Silva, Sandro Pereira da. II.  
Título.

**ROSALRA MARIA ALVES DE MORAIS**

**SISTEMA DE MONITORAMENTO E CONTROLE DE TENSÃO E CORRENTE EM  
MÁQUINAS OPERATRIZES**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas e Automação, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 29 de julho de 2022.

Prof. Dr. Ricardo Rodrigues Magalhães UFLA  
Profa. Dra. Sílvia Costa Ferreira UFLA  
Prof. Dr. Evandro Pereira da Silva Unilavras

Prof. Dr. Sandro Pereira da Silva  
Orientador

Prof. Dra. Joelma Rezende Durão Pereira  
Co-Orientadora

**LAVRAS – MG  
2022**

*À Nazaré Maria de Jesus, minha avó*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida e pela sabedoria a mim depositada, a Nossa Senhora Aparecida e Beato Padre Vitor, pela proteção e cada abraço recebido durante minhas orações.

A meus pais, Maria Tereza e José Antônio, pelo amor incondicional e suporte para trilhar este caminho, a meus padrinhos HÉlvio Faxina, Maria Aparecida Carbonieri, Maria José Azarias e à saudosa Tereza Rabelo por toda confiança depositada.

Ao meu namorado Alcebíades Fogaça, por toda paciência, carinho e apoio, mesmo antes de toda jornada começar.

A meu orientador, Sandro Pereira da Silva, e à minha coorientadora Joelma Rezende Durão Pereira e toda a equipe envolvida no desenvolvimento, por permitir e auxiliar na realização dessa pesquisa.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao programa de pós-graduação em Engenharia de Sistemas e Automação, pela minha formação profissional e oportunidade de realização do curso.

A todos os professores da Escola de Engenharia, exemplos de dedicação e por contribuírem com ensinamentos para meu aprendizado.

Aos meus amigos de longa data Nataniele Guimarães, Niêza Sales, Daniela Domingos, Thalissa Prado, Antonio Calixto, Evelize Amaral, Mariana Hildebrand, Camila Carvalho, Mayara Reche, Luciana Miguel; alguns mesmo de longe, sempre estiveram na torcida. Aos meus amigos e companheiros de caminhada na pós-graduação Andrews Ament, Franck Oliveira, Marcus Vinícius<sup>2</sup>, Henrique Castro, Isaque Alcântara, Pedro Henrique, por todo o carinho e troca de aprendizado.

*"Quando me atrevo a ser poderosa, a usar minha força ao serviço da minha visão, o medo que sinto se torna cada vez menos importante."  
(Audre Lorde)*

## RESUMO

Conceito atual do processo de manufatura subtrativa é basicamente definido como um procedimento de remoção gradual de material obtendo novos produtos, e com a alta demanda de fabricação para o desenvolvimento desses produtos industriais, as ferramentas de corte passaram a ter atenção especial. Nesse sentido, encontrar soluções de monitoramento e controle de processos que possam representar o trabalho real de uma máquina ferramenta faz parte da modernização das técnicas industriais. Objetiva-se neste trabalho desenvolver um sistema universal de controle e monitoramento da tensão e corrente, que possa ser aplicado em qualquer equipamento operatriz, com auxílio da plataforma de programação virtual LabVIEW®, que, de forma gráfica, foi estabelecida uma interface homem-máquina. Por meio da montagem de uma bancada experimental em laboratório, foram monitorados os sinais de tensão e corrente elétrica nas rotações de 1200, 1500 e 1800 rpm, com o motor rotacionando sem presença de carga mecânica comumente denominado motor a vazio, submetido a atrito no eixo e com uma carga resistiva, que simularam o incremento de solicitação mecânica em máquina operatriz. Pelos resultados, verificou-se que os tratamentos velocidade e torque foram estatisticamente significativos, já que com o aumento desses fatores, houve acréscimos nos valores de tensão elétrica, corrente elétrica e, conseqüentemente, aumento na potência, corroborando com trabalhos de outros autores, e indicando que a plataforma de coleta de dados proposta deste trabalho foi eficaz.

**Palavras-chave:** Manufatura subtrativa. Monitoramento de sinais elétricos. LabVIEW®. Interface homem-máquina.

## ABSTRACT

Current concept of the subtractive manufacturing process is basically defined as a procedure of gradual removal of material obtaining new products, and with the high manufacturing demand for the development of these industrial products, cutting tools have come to have special attention. In this sense, finding process monitoring and control solutions that can represent the real work of a machine tool is part of the modernization of industrial techniques. The objective of this work is to develop a universal voltage and current control and monitoring system, which can be applied in any operating equipment, with the aid of the LabVIEW® virtual programming platform, which, in a graphic way, a human-machine interface was established. . Through the assembly of an experimental bench in the laboratory, the voltage and electric current signals were monitored at the rotations of 1200, 1500 and 1800 rpm, with the motor rotating without the presence of mechanical load, commonly called no-load motor, subjected to friction in the shaft. and with a resistive load, which simulated the increase in mechanical stress in a machine tool. From the results, it was verified that the treatments speed and torque were statistically significant, since with the increase of these factors, there were increases in the values of electric voltage, electric current and, consequently, an increase in power, corroborating works by other authors, and indicating that the data collection platform proposed in this work was effective.

**Keywords:** Subtractive manufacturing. Monitoring of electrical signals. LabVIEW®. Man-machine interface.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Torno CNC Centur 30D (a), Fresadora CNC Discovery 760 (b), Máquina retificadora de superfície YSG - 618H/AH (c), Centro de usinagem ROMI DCM 620 - 5x (d) . . . . .	18
Figura 2.2 – Esquemático de um sistema CNC . . . . .	19
Figura 2.3 – Disposição das equidistâncias das fases . . . . .	23
Figura 2.4 – Estrutura do gerador síncrono . . . . .	24
Figura 2.5 – Retificador CA/CC (a), conversor tipo inversor (b). . . . .	25
Figura 2.6 – Diagrama de um inversor de frequência . . . . .	26
Figura 2.7 – Resultados do experimento . . . . .	30
Figura 2.8 – Bancada experimental no processo de furação . . . . .	31
Figura 2.9 – Setup experimental da aquisição de dados . . . . .	32
Figura 2.10 – Bancada experimental . . . . .	33
Figura 2.11 – Esquemático da análise e aquisição de dados . . . . .	34
Figura 2.12 – Diagrama do gerador inteligente . . . . .	35
Figura 2.13 – Comportamento dos sinais após o processo . . . . .	36
Figura 2.14 – Comportamento dos sinais após o processo . . . . .	37
Figura 2.15 – Configuração experimental . . . . .	40
Figura 2.16 – Instalação instrumental do protótipo . . . . .	41
Figura 2.17 – Setup do experimento realizado . . . . .	42
Figura 2.18 – Esquemático do sistema com a interface LabVIEW® . . . . .	43
Figura 3.1 – Esquema elétrico geral . . . . .	46
Figura 3.2 – O painel frontal no qual foram realizadas as ligações (a), a visão da parte de trás, com a disposição das resistências (b) . . . . .	47
Figura 3.3 – Gerador Síncrono (a), placa de identificação (b) . . . . .	47
Figura 3.4 – Excitatriz . . . . .	48
Figura 3.5 – MIT utilizado . . . . .	48
Figura 3.6 – Inversor de frequência CFW09 . . . . .	49
Figura 3.7 – Etiqueta de identificação do CFW09 . . . . .	49
Figura 3.8 – Fonte de alimentação regulável . . . . .	50
Figura 3.9 – Conversor de sinal . . . . .	51
Figura 3.10 – NI-9203 . . . . .	51

Figura 3.11 – Etapas dos métodos aplicados ao projeto . . . . .	53
Figura 3.12 – Etapas dos métodos aplicados ao projeto . . . . .	54
Figura 3.13 – Conexão entre o motor e o gerador síncrono . . . . .	55
Figura 3.14 – Ligação elétrica entre o gerador síncrono e a excitatriz . . . . .	55
Figura 3.15 – Ligação no painel do banco de resistências . . . . .	56
Figura 3.16 – a) paralelo da resistência de 100 Ohms, b) paralelo da resistência de 200 Ohms, c) paralelo da resistência de 400 Ohms . . . . .	56
Figura 3.17 – Ligação do banco de resistências ao gerador síncrono . . . . .	57
Figura 3.18 – Rotina de calibração do conversor de sinal . . . . .	58
Figura 3.19 – Interface virtual desenvolvida para aquisição e monitoramento de sinais . .	60
Figura 3.20 – Esquema resumido do primeiro ensaio . . . . .	61
Figura 3.21 – Esquema resumido do segundo ensaio . . . . .	62
Figura 3.22 – Esquema resumido do terceiro ensaio . . . . .	63
Figura 4.1 – Probabilidade normal de resíduos: tensão elétrica (a), corrente elétrica (b), potência (c). . . . .	71
Figura A.1 – Interface desenvolvida via LabVIEW® para os dados de tensão e corrente	82
Figura A.2 – Interface desenvolvida via LabVIEW® para potência aparente . . . . .	82
Figura A.3 – Equipamentos utilizados no primeiro ensaio . . . . .	83
Figura A.4 – Equipamentos utilizados no segundo ensaio . . . . .	83
Figura A.5 – Equipamentos utilizados no terceiro ensaio . . . . .	84

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Especificações técnicas CFW09 . . . . .	50
Tabela 3.2 – Especificações técnicas NI-9203 . . . . .	52
Tabela 3.3 – Valores da calibração . . . . .	58
Tabela 4.1 – Análise de variância para tensão . . . . .	66
Tabela 4.2 – Análise de regressão linear para tensão . . . . .	67
Tabela 4.3 – Análise de regressão linear para corrente . . . . .	68
Tabela 4.4 – Análise de regressão linear para potência . . . . .	69

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	12
1.1	Objetivo geral	12
1.2	Objetivos específicos	12
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	14
2.1	Máquinas operatrizes e sistemas de monitoramento	14
2.1.1	Máquinas operatrizes comandadas numericamente	18
2.2	Sistemas de controle para motores	22
2.2.1	Motor de indução trifásico	23
2.2.2	Gerador síncrono	24
2.2.3	Inversores de frequência	25
2.3	Sistemas de monitoramento aplicados em usinagem	27
2.3.1	Medição da corrente elétrica	28
2.3.2	Medição da tensão	33
2.3.3	Medição da potência	39
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	45
3.1	Materiais	45
3.1.1	Banco de resistores	46
3.1.2	Gerador síncrono	47
3.1.3	Excitatriz	48
3.1.4	Motor de indução trifásico	48
3.1.5	Inversor de Frequência	49
3.1.6	Fonte de alimentação regulável	50
3.1.7	Conversor de sinal	50
3.1.8	DAQ (Data Acquisition)	51
3.1.9	Notebook	52
3.2	Métodos utilizados	52
3.2.1	Ligação elétrica entre o motor de indução trifásico e o inversor de frequência	54
3.2.2	Ligação do gerador síncrono ao motor de indução trifásico	54
3.2.3	Ligação do gerador síncrono à excitatriz	55
3.2.4	Ligação do banco de resistências	55
3.2.5	Programação do inversor de frequência	57

<b>3.2.6</b>	<b>Calibração dos conversores</b>	<b>57</b>
<b>3.2.7</b>	<b>Interface LabVIEW®</b>	<b>59</b>
<b>3.2.8</b>	<b>Escolha das faixas de rotação do motor elétrico</b>	<b>61</b>
<b>3.2.9</b>	<b>Simulações</b>	<b>61</b>
<b>3.2.10</b>	<b>Delineamento experimental</b>	<b>64</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADO E DISCUSSÕES</b>	<b>66</b>
<b>4.1</b>	<b>Teste de significância estatística</b>	<b>66</b>
<b>4.2</b>	<b>Análise de regressão linear</b>	<b>67</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>72</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>73</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>74</b>
<b>A</b>	<b>ANEXO - Interfaces desenvolvidas e bancadas experimentais</b>	<b>82</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O crescimento da indústria metal-mecânica vem sendo observado ao longo da história, assim como o aumento proporcional dos bens de consumo.

Segundo Machado et al. (2009), até meados do século XVIII, o principal material utilizado para peças, em engenharia, era a madeira, salvo raras exceções, a qual era usinada com ferramentas de aço-carbono.

Com a Revolução Industrial, novos e mais resistentes materiais surgiram, impulsionando o desenvolvimento dos aços-liga como ferramentas de corte. Mais tarde, a utilização da água e do vapor como fontes de energia impulsionaram a indústria metal-mecânica (FRACARO, 2017).

A evolução das ferramentas e métodos de fabricação impulsionaram o desenvolvimento do setor industrial no decorrer dos anos, e atualmente, sob domínio da quarta revolução industrial, há um grande desenvolvimento na tecnologia aplicada em máquinas operatrizes.

Com o propósito de trazer melhores resultados aos processos de fabricação, a aplicação da informatização nos processos e inclusão de diversas técnicas de medição, a aquisição e monitoramento dos dados advindos de um processo de fabricação, pode-se monitorar de maneira direta a manufatura como um todo, por meio dos sinais elétricos emitidos e controlados pelo motor e inversor de frequência, respectivamente.

Esses procedimentos ratificam que a utilização da análise dos dados adquiridos auxiliam na tomada de decisão quanto ao ciclo de trabalho de uma máquina operatriz, seja ela manual, seja comandada numericamente.

Dessa forma, neste trabalho a proposta é desenvolver uma solução que possa contribuir no monitoramento dos sinais de tensão e corrente, por meio de um código via plataforma LabVIEW®.

### 1.1 Objetivo geral

Desenvolver um sistema capaz de detectar variação de tensão e corrente para máquinas operatrizes.

### 1.2 Objetivos específicos

- a) Desenvolver uma interface homem-máquina;

- b) Adquirir dados dos sinais elétricos de corrente e tensão;
- c) Utilizar a plataforma de programação virtual LabVIEW®, para desenvolver um algoritmo que seja capaz de adquirir sinais elétricos do equipamento.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, é apresentada uma revisão bibliográfica dos diversos estudos e técnicas utilizadas em máquina operatriz, sistema de controle para motores e sistemas de monitoramento aplicados em usinagem.

### 2.1 Máquinas operatrizes e sistemas de monitoramento

Segundo Sá (2016), a máquina operatriz, também denominada máquina-ferramenta, é um equipamento utilizado para moldar ou usinar metais e materiais compósitos por meio da movimentação mecânica de um conjunto de ferramentas e componentes, sendo capaz de realizar diversos processos de remoção de material, tais como: corte abrasivo, perfuração, fresamento, retificação, entre outros processos, com o propósito de fabricar vários tipos de produtos.

Para a execução dos processos de fabricação, destaca-se sua classificação com remoção ou adição de material. As condições ideais de corte são capazes de produzir peças dentro de especificações de forma, tamanho e acabamento ao menor custo possível (MACHADO et al., 2009).

Para que isso seja possível, Ferraresi (1977) destaca que para processos com movimentos de rotação, a velocidade de corte é calculada pela Equação 2.1.

$$V_c = \frac{\pi * d * n}{1000} \quad (2.1)$$

Em que:

$V_c$  = Velocidade de corte (m/min)

$d$  = diâmetro da peça ou da ferramenta (mm)

$n$  = rotações (rpm)

O acabamento superficial melhora com o aumento da velocidade de corte, sendo uma melhoria rápida até determinada velocidade crítica, devido às dimensões do gume postiço; após ele ficar reduzido a um tamanho insignificante, uma pequena melhora do acabamento se obtém com aumentos da velocidade de corte (STEMMER, 1993).

Com base na velocidade de corte, o cálculo da rotação da ferramenta é dado pela Equação 2.2.

$$n = \frac{1000 * V_c}{\pi * d} \quad (2.2)$$

Em que:

$V_c$  = Velocidade de corte (m/min)

$d$  = diâmetro da peça ou da ferramenta (mm)

$n$  = rotações (rpm)

Uma grande quantidade de pesquisas foram voltadas para essa área na última década. Os fabricantes de máquinas operatrizes modernas são capazes de atingir altas precisões em seus processos de fabricação, devido a metodologias de projeto aprimoradas e tecnologias de materiais avançadas para diferentes máquinas operatrizes (RAMESH; MANNAN; POO, 2000).

A fim de aprimorar os processos de fabricação junto com o desenvolvimento da tecnologia aplicada às máquinas-operatrizes, os métodos e sistemas de monitoramento e medição se tornam mais inteligentes e cada vez mais presentes nos ambientes industriais (CAI et al., 2022).

Altintas et al. (2011) propuseram um sistema de acionamento e aferição do sinal de corrente em máquinas-ferramentas por meio do controle de velocidade do motor realizados em ambiente MATLAB/Simulink™ e ADAMS™, que permitiram a integração de modelos de controle, cinemática e estruturais da máquina-ferramenta e acionamentos de alimentação, mas que requeriam uma pesquisa mais aprofundada, especialmente na modelagem dinâmica multi-corpos de estruturas de máquinas-ferramenta e acionamento de alimentação.

Hu et al. (2012) salientaram que, para melhorar a eficiência energética das máquinas-ferramenta, é necessário um sistema de monitoramento on-line da eficiência energética e propuseram não usar nenhum sensor de torque ou dinamômetro, o que leva à redução do custo, no qual o modelo de monitoramento de eficiência energética dessa abordagem foi construído, com base em um modelo de consumo de energia de uma máquina-ferramenta; então, todo o consumo de energia da máquina-ferramenta pode ser dividido em duas partes, ou seja, consumo de energia constante e consumo de energia variável por meio de um sistema OEM (*Original Equipment Manufacturer*), sendo adquiridos com precisão dados referentes à eficiência energética de máquinas-ferramentas.

Vijayaraghavan e Dornfeld (2010) foram motivados pela necessidade de entender o consumo de energia dos sistemas de fabricação baseados em usinagem e metalurgia. Esses sistemas podem ser estudados em diferentes níveis de análise, discutindo o desenvolvimento de ferramentas para automatizar o monitoramento e análise do consumo de energia de máquinas-ferramenta em sistemas complexos de manufatura, utilizando o *MTCConnect*. Estes pesquisadores definiram uma linguagem e estrutura comum para comunicação em equipamentos de fabri-

cação, o que permitiu a interoperabilidade do acesso a dados de fabricação usando interfaces padronizadas, sendo expandido para analisar outros tipos de fluxos de dados ambientalmente pertinentes em sistemas de manufatura, permitindo a tomada de decisões para aprimorar o desempenho ambiental das máquinas-ferramentas.

Shao, Wang e Zhao (2004) desenvolveram um modelo de potência de corte, bem como o desgaste de flanco da ferramenta, com base no modelo de potência, sendo apresentado um sistema monitoramento composto por um transdutor de potência do motor, uma placa de conversão A/D e um computador pessoal, e como resultado, obtiveram simulações condizentes com a modelagem matemática proposta, sendo sugerida sua implementação no chão de fábrica, podendo substituir os métodos tradicionais de monitoramento de potência.

O setor manufatureiro está cada vez mais utilizando na coleta e interpretação de dados para informar a tomada de decisões e melhorar a produtividade, sustentabilidade e qualidade do produto (GHOBAKHLOO, 2020).

As técnicas de medição de sinais elétricos para o monitoramento de operações de usinagem têm sido tradicionalmente categorizadas em duas abordagens: direta e indireta. Na abordagem direta, a quantidade real da variável é por meio de abordagens de medição indireta, podem medir quantidades auxiliares, sendo menos precisos que os diretos, mas também são menos complexos e mais adequados para algumas aplicações práticas; no entanto, a medição direta tem alta precisão e tem sido amplamente empregada em laboratórios de pesquisa para apoiar as investigações de fenômenos mensuráveis fundamentais, durante os processos de usinagem (TETI et al., 2010).

Como exemplo de medição indireta de sinais, Altintas (1992) descreveu o uso da corrente consumida por motores de acionamento de alimentação para monitoramento do processo de fresamento, por intermédio da medição indireta da corrente elétrica, com a utilização de resistores de , que foram colocados em série com a carga em um modelo de sistema de controle de acionamento de alimentação de fresadora vertical, para analisar as medições de força de corte dos motores de acionamento, sendo mostrado por meio do monitoramento do sinal de falha da ferramenta no fresamento, sendo detectada dentro de uma revolução do fuso, filtrando de forma adaptativa os sinais de corrente média nos períodos de passagem do dente.

Enquanto Denkena et al. (2004) utilizaram um caso prático em uma parte de seus experimentos, nos quais demonstraram que a força de corte de alta frequência pode ser rastreada pela corrente linear do motor, por meio de um sensor de efeito hall e um dinamômetro, realizando de

forma indireta a medição da corrente, e com o resultado determinou o efeito da força de corte na corrente do motor e a quebra da ferramenta, sendo detectada diretamente usando a corrente linear do motor por intermédio de medições durante o fresamento de topo.

Como exemplo de medição direta, Kim et al. (2002) propuseram um método de estimativa analítica do desgaste da broca, baseado na potência do motor do fuso, integrando o modelo desgaste-torque da broca e o modelo de potência do motor torque-fuso, sendo os experimentos de perfuração foram realizados em um centro de usinagem vertical, enquanto o sinal de potência do motor foi gravado em um gravador de dados em videocassete para a análise off-line; como resultado, o desgaste da broca foi estimado com precisão pela medição da potência do motor do fuso durante a perfuração.

Axinte e Gindy (2004) avaliaram a eficácia de um sinal de potência do fuso para o monitoramento da condição da ferramenta em três processos de usinagem: fresamento, furação e torneamento, com a aquisição de dados realizada de maneira direta, sendo o sinal de energia do eixo foi adquirido usando a instalação incorporada disponível nas unidades de motor de corrente alternada dos centros de usinagem CNC, utilizando o software LabVIEW®; os sinais de saída foram adquiridos e condicionados, e seus resultados foram usados para definir as limitações de sensibilidade ao usar um sinal de potência do fuso, para monitoramento da condição da ferramenta em diferentes centros de usinagem de controle numérico computadorizado, em que são executadas operações de usinagem contínua e descontínua.

Os processos de fabricação modernos consideram equipamentos com nível tecnológico aprimorado, sendo comandados numericamente. A automação aumenta a produtividade e reduz as imperfeições nos produtos manufaturados (GOKULACHANDRAN; REDDY, 2021).

Isso é atribuído principalmente à transformação do ambiente de fabricação de máquinas de produção operadas manualmente para máquinas-ferramentas comandadas numericamente e centros de usinagem com ajuda de comandos numéricos computadorizados (CNC) altamente automatizados (AL-SULAIMAN; BASEER; SHEIKH, 2005) e (GOKULACHANDRAN; REDDY, 2021).

A modelagem de processos com sistemas de respostas em termos dimensionais, convencionalmente são conduzidos por CNC, tornando, assim, os processos mais eficientes; porém, sob o aspecto da tomada de decisão em qual momento o operador deve intervir no processo ainda tem-se muito a ser explorado.

### 2.1.1 Máquinas operatrizes comandadas numericamente

As máquinas, que antes eram comandadas numericamente, passaram a ter uma contribuição extra. Essa contribuição veio após a invenção do computador, em que os comandos numéricos passaram a ser computadorizados. Segundo Nascimento (2015), também chamado de comando numérico computadorizado, o CNC, do inglês *Computer Numeric Control*.

É um controlador numérico que permite o controle de máquinas, geralmente em centros de usinagem. Máquinas-ferramentas CNC são produtos eletromecânicos com múltiplas fontes e fluxo de energia, havendo uma ampla variedade de máquinas-ferramentas CNC, incluindo tornos, fresadoras, retificadoras e centros de usinagem (LV et al., 2016). A Figura 2.1 apresenta exemplos das máquinas-ferramentas citadas.

Figura 2.1 – Torno CNC Centur 30D (a), Fresadora CNC Discovery 760 (b), Máquina retificadora de superfície YSG - 618H/AH (c), Centro de usinagem ROMI DCM 620 - 5x (d)



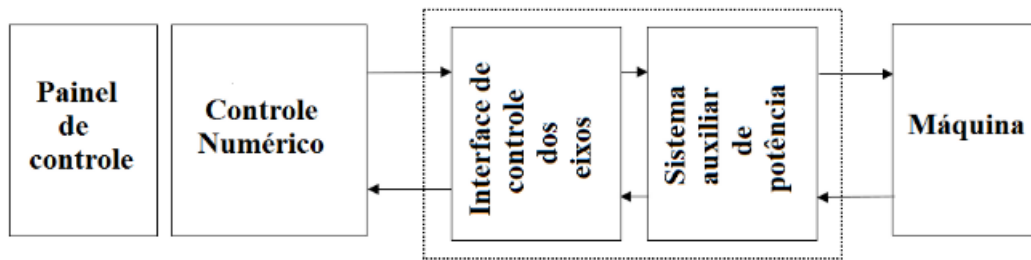
Fonte: Romi S.A (2022)

Uma máquina-ferramenta com CNC é composta de uma unidade de comando (computador que se encarrega de realizar todos os cálculos e as operações lógicas). Para Li et al. (2020)

e Nascimento (2015), são operações realizadas por códigos que traduzem o caminho da ferramenta, emitidos pelo software de fabricação auxiliado por computador para usinagem em alta velocidade, compostos por segmentos de linha.

Esses códigos são também conhecidos como código G ou linguagem de programação G, ou seja, a linguagem utilizada para programar as trajetórias de máquina, do desenvolvimento de produtos e da disponibilidade de capacidade computacional. Esse sistema possibilitou a comunicação com o operador por meio de uma interface de controle, que atuou sobre cada um dos controladores dos eixos e sobre o sistema de alimentação auxiliar de potência. O esquemático de um sistema CNC é demonstrado na Figura 2.2.

Figura 2.2 – Esquemático de um sistema CNC



Fonte:Nascimento (2015)

Segundo Lumi et al. (2018), máquinas CNC são usadas para usinagem de peças de alta precisão, com o uso de tecnologias de prototipagem rápida, além de produzirem peças com geometrias complexas e com alta precisão dimensional, adotando como dado de entrada um programa do CNC, que determina as ações que o mecanismo deve executar para obter o produto desejado.

Os tipos de CNC mais utilizados pela indústria no cenário atual são: o torno, a fresa, equipamentos de corte a base de jato de água, furadeira entalhadeira, puncionadeira, retificadora e EDM (*Electrical Discharge Machining*), conhecida como usinagem por descarga elétrica, sendo subdividida em eletroerosão a fio ou por penetração.

Embora as máquinas CNC permitam tempos curtos de trabalho e a repetibilidade precisa do processamento, elas sofrem de algumas desvantagens: necessitam ser controladas e gerenciadas por um operador especialista capaz de interagir com a interface do usuário, para concluir suas tarefas e configurações (TROYSI et al., 2019).

O princípio fundamental na usinagem CNC inteligente é fornecer sistemas altamente eficientes e totalmente automatizados, com o mínimo de interferência humana, Ntemi et al.

(2022). A tecnologia CNC é o elemento-chave das máquinas-ferramentas, que são a base da informatização das unidades industriais (YUSOF; LATIF, 2015). Para Lotti et al. (2019), o desenvolvimento da tecnologia de controle numérico, a crescente eficiência dos processos de produção e o alto nível de automação permitiram uma grande melhoria nas máquinas.

Para Ntemi et al. (2022), o primeiro ponto de ação para automação e inteligência é a instalação de sensores em componentes de ferramentas CNC, que acompanham de perto todo o processo de corte. Tais sensores podem ser aqueles que medem vibrações, forças, temperatura, som etc, sendo um pré-processamento aplicado a esses sinais, a fim de eliminar ruídos e extrair as informações mais críticas. Então, algoritmos são aplicados a esses sinais, e abordagens matemáticas revelaram a dinâmica, dependências e correlações entre eles.

O sistema de controle é focado apenas em equipamentos tecnológicos específicos e não tem redundância, o que é típico dos sistemas CNC oferecidos no mercado. Alternativamente, ele pode ser implementado em computadores, e a parte terminal do sistema é ditada pela interface homem-máquina (GRIGORIEV; MARTINOV, 2016).

Com base nisso, o sistema monitora o consumo de energia pelos sinais elétricos e as informações de eficiência energética no processo de fabricação melhoram a eficiência do gerenciamento de energia e realizam decisões personalizadas em diferentes cenários (CAI et al., 2022).

Abbass e Al-Habaibeh (2015) investigaram o uso da potência do motor de acionamento de um fuso CNC, em comparação com dois sensores de correntes parasitas perpendiculares para a detecção de desgaste de ferramentas em processos de fresamento; o monitoramento da potência pelo perfil de corrente é um sistema de baixo custo que foi utilizado neste estudo, na tentativa de detectar a flutuação na carga do motor em função das condições da ferramenta de corte; os resultados indicaram que os sensores de corrente parasita são mais bem sucedidos e sensíveis, em geral, do que a potência do motor em detectar as mudanças das ferramentas de corte durante a operação de usinagem; no entanto, o valor da curtose da potência do fuso mostrou ser bem-sucedido em prever as condições da ferramenta com alta sensibilidade.

Aslan e Altintas (2018) apresentaram um modelo para identificar as forças de corte a partir das medidas de corrente do acionador de alimentação em processos de avanço obtidos diretamente do fresamento CNC de cinco eixos da máquina-ferramenta, com a precisão da previsão da força de corte da corrente do motor de acionamento de alimentação dependente da modelagem do atrito, função de transferência de perturbação entre a força na ferramenta e

no motor, cinemática de máquinas de cinco eixos e ajuste do Filtro *Kalman*, para compensar os efeitos dos modos estruturais na função de transferência de perturbação, sendo a largura de banda do monitoramento de força estendida até a largura de banda do circuito de corrente do controlador, desde que os modos estruturais da corrente de acionamento sejam bem separados e modelados.

Altintas e Aslan (2017) salientaram uma nova abordagem integrando o sistema de usinagem virtual com o sistema de monitoramento e controle on-line, sendo as forças extraídas dos comandos de corrente do motor de alimentação e acionamento do fuso compensando a distorção causada pela cadeia dinâmica estrutural entre os locais de corte e motor; o uso do sensor de força inerente ao CNC eliminou a necessidade de montar sensores caros na máquina, e o método proposto teve amplas aplicações, que incluem a detecção de vibração em locais específicos do caminho da ferramenta, coleta de carga de usinagem e dados ociosos e sua correspondência com o programa NC para melhorar o planejamento do processo e calibrar automaticamente o sistema de simulação do processo, a partir da força e medições de torque.

Em um processo de controle e monitoramento, Zhou et al. (2000) utilizaram a tensão de acionamento, a corrente de acionamento do eixo e a potência oriunda da tensão e corrente, para diagnosticar possíveis falhas do equipamento CNC, como o movimento inacabado de uma ferramenta de corte pode ser localizado usando sinais de estado discreto no controlador da máquina, como CNC/PLC, exercendo a reflexão da necessidade da aplicação do monitoramento e controle de sinais durante o processo de fabricação.

Sem a disponibilidade das informações correspondentes aos recursos do sistema de usinagem CNC, é muito difícil para os fabricantes automatizar o processo de tomada de decisão e o planejamento do processo das atividades de fabricação; portanto, os modelos de recursos de fabricação devem ter um modelo de dados consistente que possa representar a grande variedade de elementos do sistema de usinagem CNC de tais instalações de produção discretas (VICHARE et al., 2009).

Atualmente, as máquinas-ferramentas são os principais equipamentos da fabricação moderna e são consideradas as melhores soluções industriais para a fabricação de produtos com alta qualidade dimensional, sendo amplamente utilizados na fabricação de automóveis, navios, aeronaves etc. (BAL; GÜNDEŞ, 2020).

Para cada produto, é necessário determinar um conjunto de parâmetros de processo específico para maximizar os resultados. Com o propósito de realizar melhorias no processo,

o estudo dos motores que regularmente são utilizados em máquinas operatrizes e inversor de frequência serão apresentados no próximo tópico.

## 2.2 Sistemas de controle para motores

É definido como um sistema de controle o conjunto de procedimentos aplicáveis a vários tipos de atividades que garantem, por meio de sua interação, conhecer a situação do sistema e em determinado momento tomar as decisões cabíveis (RIVERA, 2019).

Esse sistema de controle é amplamente utilizado no desenvolvimento e modernização de máquinas operatrizes e equipamentos mais antigos, respectivamente. Para Ponce et al. (2012), os motores elétricos abrangem uma ampla gama de equipamentos de fabricação, especialmente os equipamentos de fabricação que possuem um nível avançado de automação.

Existem diversas formas de realizar o controle e monitoramento de motores elétricos. Como no caso de Nekoei, Kavian e Strobel (2011), que realizaram um projeto e implementação de um FPGA (*Field Programmable Gate Array*), no português, Arranjo de Portas Programáveis em Campo, baseado em um controlador digital para gerar pulsos de comutação de controle para transistores bipolares de portão isolado (IGBTs) *Insulated Gate Bipolar Transistor* no sistema de acionamento implementando um *Verilog*, denominada como uma linguagem universal de programação utilizada para descrever sistemas digitais para motores de indução trifásicos; como resultado, o controle para altas e baixas velocidades do motor trifásico foi realizado com êxito, por meio da variação dos sinais de tensão, corrente e frequência.

Zahid Faisal e Ilyas (2019) apresentaram uma avançada configuração para o desenvolvimento do monitoramento e controle de um sistema para medição de tensão, corrente, frequência e a identificação da sequência de fase do motor com base no microcontrolador ATmega AVR e a simulação realizado no software Proteus, sendo capaz de detectar alta frequência de sinais elétricos. O uso da interface gráfica para monitoramento e controle dos sinais é feita pelo usuário; de modo geral, o modelo proposto pode ser acessado a uma distância notável, possuindo baixo custo e é uma alternativa para o monitoramento e controle dos parâmetros elétricos de um motor de indução trifásico.

Hussein e Al-Rawe (2020) desempenharam a simulação no ambiente MATLAB/SIMULINK para o controle da velocidade de um motor em corrente contínua de forma prática, utilizando placa de aquisição de dados (DAQ) e empregando monitoramento nos ambientes MATLAB e LABVIEW, por intermédio de um controlador PID (Derivative Integral Proporcional).

O monitoramento do sistema de controle do experimento foi feito por LabVIEW® pela placa DAQ (NI PCI-6251), e os resultados demonstraram que o controlador PID é mais eficiente do que um controlador convencional, tendo em vista a resposta no domínio do tempo e rejeição da carga (perturbação) aplicada no motor CC.

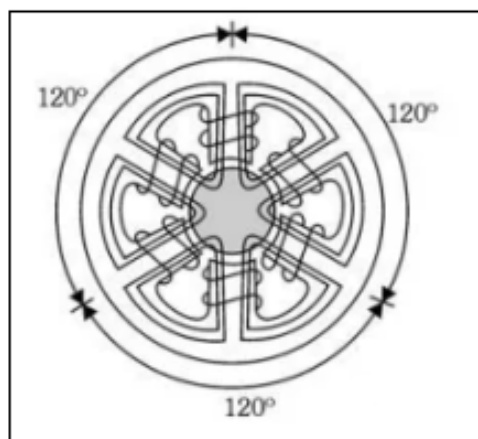
Há diversos métodos para realizar o monitoramento e controle dos sinais elétricos provenientes dos motores. Dessa maneira, entender os seus princípios de funcionamento dos principais motores utilizados neste projeto pode contribuir para o esclarecimento de como aplicar sistemas de controle e monitoramento a esses equipamentos.

### 2.2.1 Motor de indução trifásico

O motor de indução trifásico em corrente alternada é o motor mais comum na indústria. Geralmente, um motor CA de indução pode atingir maior fator de potência (PF) e eficiência em plena carga ou quase em plena operação de carga. Portanto, melhorar a eficiência do sistema do motor é bastante significativo para a economia de energia do motor trifásico em corrente alternada (CHUANG; LI; LEE, 2019).

Os motores trifásicos de corrente alternada apresentam três fases de alimentação, sendo empregados em ambientes industriais, e seu funcionamento é similar ao de outras máquinas elétricas rotativas, consistindo na interação de campos magnéticos que resultam em um conjugado que força o movimento do motor. As fases equidistantes se encontram a 120 graus uma da outra, como representado na FIGURA 2.3, e o sentido dos polos giram conforme a variação de suas tensões, resultando em um campo girante responsável pelo movimento do rotor nos motores de corrente alternada (LENZ et al., 2019).

Figura 2.3 – Disposição das equidistâncias das fases



Fonte:Franchi (2007)

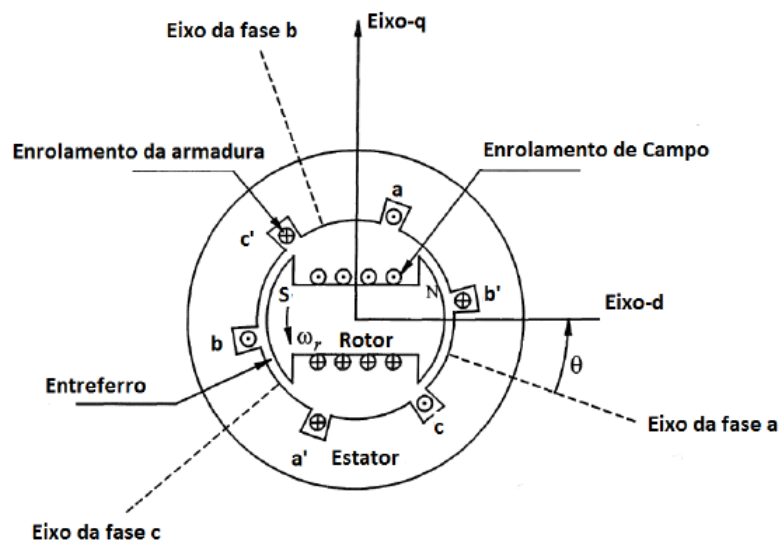
Além dos motores de indução trifásicos, o uso industrial de geradores síncronos tornou-se mais presente nos processos de fabricação atuais, devido à facilidade de manuseio e do baixo custo de manutenção.

### 2.2.2 Gerador síncrono

São denominados geradores síncronos porque a velocidade do seu rotor é sincronizada com o campo girante, que é estabelecido no estator, sendo considerada uma máquina de velocidade constante, o seu funcionamento requer a aplicação de uma tensão alternada no estator do motor, com a excitação do campo rotacional feita por meio de uma fonte de corrente contínua, que pode ser obtida diretamente de uma fonte externa, ou de uma excitatriz conectada ao eixo do motor, sendo uma pequena parcela do torque do motor utilizada para gerar a corrente contínua para excitação do campo (FRANCHI, 2007).

A rotação desse campo induz nas bobinas do estator tensões alternadas, a frequência e a intensidade da corrente, quando uma carga é conectada ao terminal do enrolamento do estator, dependendo da velocidade de rotação do rotor, e a frequência elétrica do estator está sincronizada com a velocidade de rotação mecânica do rotor (OLIVEIRA, 2011), como representado na Figura 2.4.

Figura 2.4 – Estrutura do gerador síncrono



Fonte: Oliveira (2011)

Os geradores síncronos formam a principal fonte de energia elétrica dos sistemas de potência; nas indústrias, muitas cargas são movimentadas pelos motores síncronos (ANDERSON; FOUAD, 2003).

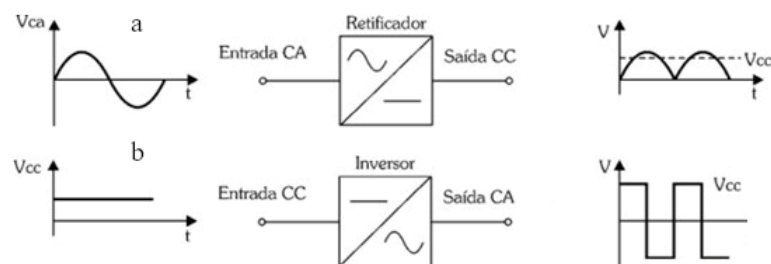
Para que esse processo ocorra, torna-se necessário o uso de motores e inversores de frequência. Os sistemas, portanto, exigem o uso de aquisição e controle de dados de alta velocidade, atendendo aos requisitos de processamento impostos por esses sistemas (MORCOS MM E LAKSHMIKANTH, 1999).

### 2.2.3 Inversores de frequência

Inversores de frequência ou conversores de frequência têm como princípio de funcionamento a conversão da tensão da rede alternada senoidal na entrada do dispositivo, para tensão contínua, com a possibilidade de ela ter a amplitude de tensão e frequência variáveis (KARAVASILIS, 2008), podendo também ser capaz de converter energia proveniente de um sinal contínuo em um sinal alternado, e dentre suas aplicações, podem-se citar: controle de velocidade em motores CA, aquecimento indutivo, fontes ininterruptas de energia e processamento de energias renováveis (PERACA; BATISTA; MARCELINO, 2010).

Algumas definições são importantes para o funcionamento do inversor de frequência, ao qual podemos citar: o retificador, sendo esse um conversor que é responsável pela retificação do sinal alternado, que possui tensão e frequência constantes provenientes da rede de alimentação; e o inversor, um tipo especial de conversor que converte corrente contínua em corrente alternada. A Figura 2.5 ilustra as etapas de conversão do sinal de tensão pelo inversor de frequência (FRANCHI, 2007).

Figura 2.5 – Retificador CA/CC (a), conversor tipo inversor (b).

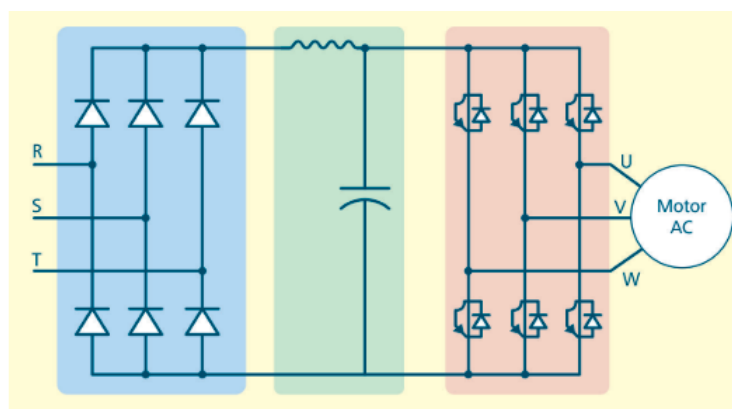


Fonte: Franchi (2007)

Em geral, o estágio de entrada do inversor converte a fonte CC em uma tensão de alta frequência, para que um transformador de alta frequência possa ser usado para aumentar a tensão e fornecer isolamento galvânico; o estágio de saída produz a tensão CA de frequência de rede desejada que é aplicada à carga (KIM; BALOG, 2018).

Os inversores de frequência possuem uma entrada ligada à rede de energia comum de alimentação. Para tanto, o inversor tem como primeiro estágio um circuito retificador, responsável por transformar a tensão alternada em contínua; um segundo estágio composto de um banco de capacitores eletrolíticos e circuitos de filtragem de alta frequência e, finalmente, um terceiro estágio (composto de transistores IGBT) capaz de realizar a operação inversa do retificador, ou seja, de transformar a tensão contínua do barramento de corrente contínua (CC), para alternada, e com a frequência desejada pela carga (SEGUNDO; RODRIGUES, 2015). Na Figura 2.6, são representados os estágios do inversor de frequência.

Figura 2.6 – Diagrama de um inversor de frequência



Fonte: Segundo e Rodrigues (2015)

Os inversores são muito utilizados no acionamento de motores de indução, pois permitem um bom ajuste sobre a amplitude de tensão e frequência de alimentação do motor, visando ao controle da velocidade e torque mecânico durante o processo industrial (COSTA et al., 2018), (GALORI; SOUZA; GODOI, 2018) e (FILHO, 2013).

Para Franchi (2009), há inúmeras razões para o uso de dispositivos para controle de velocidade. Algumas aplicações, como em indústrias de máquinas operatrizes, não podem operar sem o controle de velocidade devido à variação de sinais elétricos consumidos pela máquina-ferramenta durante o processo.

Os inversores de frequência são utilizados nas operações do ajuste de velocidade de um motor elétrico, visando à otimização e rapidez do processo, pois o inversor contribui para a redução das taxas de perdas e consumo de material na produção (SEGUNDO; RODRIGUES, 2015).

Ajuste do torque de um conjunto, conforme as necessidades do processo, possibilitando o controle de partidas e frenagens dos motores, tornando a operação das máquinas mais suaves.

Além disso, o inversor permite operações em vários regimes de carga (SEGUNDO; RODRIGUES, 2015).

Diante das informações sobre o sistema de controle para motor, é necessário compreender que motores e inversor de frequência fazem parte do sistema energético de um centro de usinagem. Para tanto, a aplicação da aquisição direta ou indireta dos dados referentes a um ciclo de trabalho de uma máquina-ferramenta, é considerado um processo inteligente intermediado por uma plataforma virtual.

### **2.3 Sistemas de monitoramento aplicados em usinagem**

Os sistemas de monitoramento têm sido observados com alta relevância na chamada quarta revolução industrial, também conhecida como Indústria 4.0, de acordo com Monteiro et al. (2019). Dentro dessa abordagem, a aquisição de dados é um método necessário para adquirir os sinais e armazenar os dados para análise posterior e acesso futuro (MOHANRAJ et al., 2020).

Em especial, o monitoramento do processo de usinagem faz com os sinais elétricos durante o processo de fabricação sejam analisados criteriosamente, adaptando o processo tradicional de manufatura a novas tecnologias.

O monitoramento das condições de usinagem por meio de grandezas elétricas é essencial para um processo inteligente em escala industrial. As abordagens de monitoramento das condições de usinagem existentes geralmente detectam condições anormais para um procedimento de fabricação (LU; WANG; DAI, 2020) e (VIANA et al., 2017).

Um dos elementos eletromecânicos mais importantes de uma máquina CNC é o motor instalado no fuso. Assim, é típico que um motor de indução trifásico gerencie o fuso por meio de um inversor de frequência, para atingir a velocidade de rotação definida pelo CNC. Considera-se que a demanda de corrente alternada pelo motor do fuso é um bom indicador das anomalias apresentadas durante o processo de fabricação (JAEN-CUELLAR et al., 2021).

Além disso, é possível coletar dados no chão de fábrica, como medir a energia consumida por equipamentos em operação, dados de produção, consumo de matéria-prima e produção de resíduos. Isso poderia ser feito manualmente; entretanto, com a redução drástica dos custos devido à aplicação da automação, o sistema pode fornecer uma instrumentação confiável e de baixo custo para implementar a coleta contínua de dados (RODRIGUES; Espíndola Ferreira; ROCHA, 2018).

Um bom sistema de monitoramento das condições de usinagem é aquele que consegue detectar claramente as condições anormais, para evitar os impactos negativos de defeitos no semiproduto e no produto final, garantindo a precisão e eficiência do processo de usinagem (LU; WANG; DAI, 2020).

Nos últimos anos, a implantação de projeto de engenharia virtual e métodos de simulação extensivos facilitaram a visão inicial de como um sistema pode funcionar (GHANI; MONFARED; HARRISON, 2012). (GOKULACHANDRAN; REDDY, 2021).

Um pacote de desenvolvimento de software usado para criar instrumentos virtuais é o LabVIEW® (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench). Sendo classificado como linguagem de programação gráfica que, quando usada em conjunto com um dispositivo de aquisição de dados e um computador pessoal, permite ao usuário controlar dispositivos, coletar, manipular e exibir dados (SIVARANJANI et al., 2020).

A integração do dispositivo de aquisição de dados, com hardwares de medição de outros fabricantes, apresentam uma representação de lógica complexa e desenvolvimento de algoritmos voltados para a análise de dados e criação da interface homem-máquina (NATIONAL INSTRUMENTS, 2021) e (VERGURA; NATANGELO, 2010) .

A Instrumentação Virtual abre um caminho para implementar aquisição e processamento de dados. Os dados podem ser adquiridos pelo módulo de aquisição e são processados com o auxílio da unidade de condicionamento de sinais (SIVARANJANI et al., 2020).

Entre as várias técnicas de aquisição de sinal, como vibração, temperatura, força e velocidade, por exemplo, pesquisadores se mostram mais interessados em medição e monitoramento de sinal da corrente do motor, devido ao seu baixo custo e por não ser uma atividade invasiva ao processo de usinagem (AMBHORE et al., 2015) e (GOKULACHANDRAN; REDDY, 2021) .

### **2.3.1 Medição da corrente elétrica**

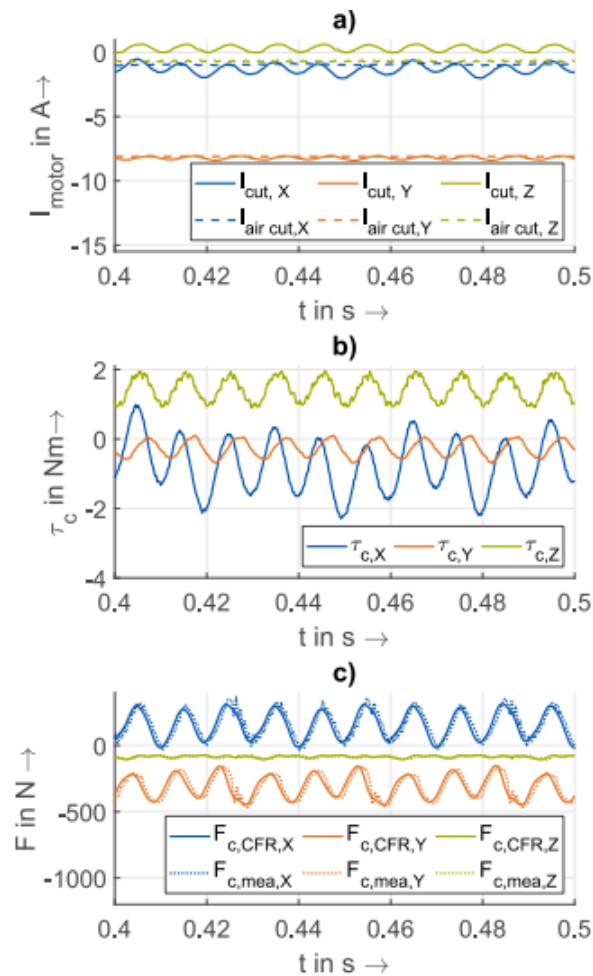
Em sua proposta de estudo, Yusof e Latif (2015) apresentaram um módulo conceitual de um novo sistema de software interpretando a posição, taxa de avanço da ferramenta, dados do fuso e codificação da máquina CNC; enquanto isso, ele também é capaz de gerar saída em arquivos de texto e XML de acordo com a estrutura de arquivos definida pelo usuário. O software desenvolvido foi especialmente projetado para sistemas CNC de controle de arquitetura aberta, sendo programado via plataforma virtual LabVIEW®, de acordo com a estrutura interna da máquina CNC, interpretando a aceleração, desaceleração, velocidade do fuso, taxa de alimenta-

ção de corrente elétrica, para cada motor de passo/servo, no qual o motor de passo/servo possa ser movido por interpolação linear ou circular.

Como resultado, os autores supracitados concluíram que a interface desenvolvida via LabVIEW® foi capaz de trabalhar com sistemas CAD/CAM atuais, integrando as linguagens de programação (VB, C++, C, JAVA etc.) para se comunicar, gerando arquivos de saída em .txt e .xml formatados de acordo com a estrutura definida pelo usuário.

Schmucker et al. (2021) utilizaram a aquisição de dados de corrente elétrica por meio do FPGA (*Field Programmable Gate Array*), e um algoritmo na linguagem C/C++, para obter uma resposta de frequência da dinâmica da ponta da ferramenta por meio de uma Análise Modal Operacional (AMO), requerido onde ocorreram as forças de usinagem, utilizando um *loop* de controle interno, sendo executado no local perto da produção do sistema, estando conectado ao controlador da máquina-ferramenta por uma conexão de rede com fio, como resultado, apresentado na Figura 2.7 obtendo: a) corrente aferida nos motores de acionamento de alimentação durante os testes de corte (direção de alimentação: X); em b) torque efetivo do motor, que é causado pelo processo de corte; c) forças de corte medidas, sendo observado um método de aquisição e monitoramento de um sistema on-line, que permitiu a determinação da recepção dinâmica de uma máquina-ferramenta durante o processo de corte.

Figura 2.7 – Resultados do experimento



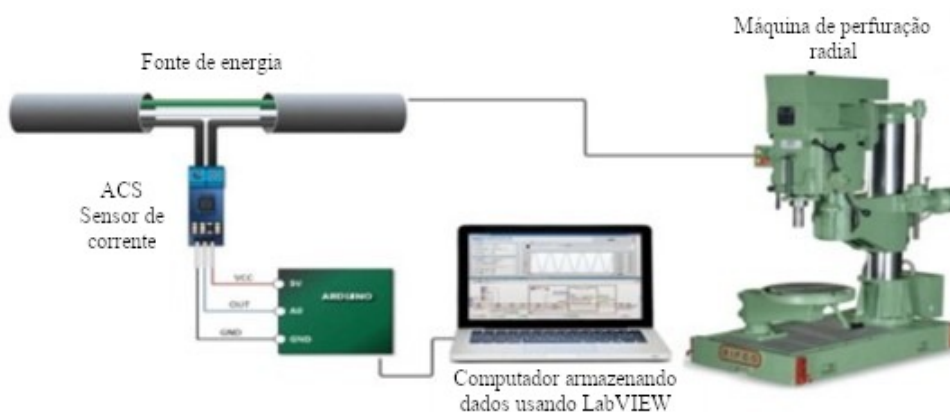
Fonte: Schmucker et al. (2021)

Bhagat e Nalbalwar (2016) desenvolveram um sistema que analisou o aumento da temperatura da ferramenta do torno CNC com o seu nível de desgaste, e correlacionou a corrente do motor do fuso com a força que foi aplicada na ponta da ferramenta no sentido radial no momento da usinagem, sendo os principais sinais coletados do torno CNC: a temperatura e aceleração da ferramenta, e corrente do motor do fuso; para a coletas dos dados, foram utilizados um termopar tipo K, acelerômetro simples com amplitude de 0,5 Hz a 1600 Hz nas direções X, Y e Z e transdutor de corrente com amplitude de entrada de 0 a 30 A. Como resultados, registrou um acréscimo de 385 graus Celsius na temperatura da ferramenta, e os dados de aceleração e corrente coletados obtiveram um aditamento de forma semelhante.

Gokulachandran e Reddy (2021) investigaram experimentalmente os problemas práticos envolvidos no emprego de sensores de corrente para a previsão da vida útil restante de brocas para uma furadeira radial, utilizando um motor de indução trifásico de corrente alternada para alimentação da furadeira, sendo o sensor de corrente denominado ACS712 selecionado para

adquirir o sinal de corrente alternada por meio de um Arduino, que a converte em um sinal de corrente RMS (*Root Mean Square*), e a saída do hardware forneceu os dados de corrente ao LabVIEW®, que plotou gráficos, enquanto a usinagem está em andamento. Como representado na Figura 2.8.

Figura 2.8 – Bancada experimental no processo de furação



Fonte: Gokulachandran e Reddy (2021)

Como resultado de sua pesquisa, os autores registraram a ocorrência do aumento do sinal de corrente devido ao desgaste da broca durante o processo de furação, sendo esse aumento da taxa da corrente elétrica usada como um dos recursos na classificação da condição da ferramenta.

Em estudos sobre a aquisição da corrente elétrica para geração de potência elétrica em um processo de torneamento, Zhong et al. (2016) apresentaram uma ampla avaliação de modelos de cálculo de consumo de energia, por meio de vários modelos experimentais e empíricos; o dispositivo de aquisição de dados consistiu em uma interface de programação LabVIEW®, um NI Cdaq-9174, duas placas NI-9215, ambos utilizados na aquisição de dados, três sensores de tensão (LEM LV25-P) e três sensores de corrente (LEM LA55-P), dinamômetro *Kistler-9257A* e um amplificador de carga. Os sinais de corrente e tensão coletados pelos sensores foram conectados à máquina-ferramenta CNC (CK6153i) e convertidos em sinais digitais pelas placas de aquisição de dados NI-9215. Como representado na Figura 2.9.

Figura 2.9 – Setup experimental da aquisição de dados



Fonte: Zhong et al. (2016)

Lv, Tang e Jia (2014) propuseram uma pesquisa sobre o desenvolvimento de modelos de potência *Therblig*; no contexto do estudo, foi dado como um conjunto de movimentos fundamentais para a máquina-ferramenta realizar uma operação, sendo utilizado para cálculo do fornecimento de energia a máquinas operatrizes de controle numérico computadorizado (CNC), utilizando parâmetros de processo de usinagem, sendo um modelo analítico proposto para estabelecer relação com as fontes de energia do processo de fabricação. Foram realizados experimentos em dois tornos CNC para validar os modelos matemáticos de fornecimento de energia para cada um, e o consumo sendo aferido por meio de um dispositivo de aquisição de energia, conectado ao barramento principal do quadro elétrico das máquinas-ferramentas. O dispositivo de aquisição de dados consistiu em uma interface de programação LabVIEW®, um chassi compacto de aquisição de dados NI Cdaq-9174, duas placas de aquisição de dados NI-9215, três sensores de tensão (LEM LV25-P) e três sensores de corrente (LEM LA55-P), como representado na Figura 2.10.

Figura 2.10 – Bancada experimental



Fonte: Lv, Tang e Jia (2014)

Com base na análise teórica e estudo experimental pelo autores supracitados, os modelos de força dos *Therblig* foram validados por meio do estudo experimental em dois tornos CNC. O modelo proposto foi capaz de estimar o consumo energético do processo de usinagem, podendo aumentar a ecoeficiência pela otimização dos parâmetros de processo, realizando a aquisição de dados de corrente e tensão de maneira efetiva e contribuindo para o monitoramento de energia do estudo em questão.

Em suma, as técnicas utilizadas são cientificamente comprovadas por meio da literatura e por experimentos, sendo capazes de realizar a aferição de corrente elétrica com exatidão, por meio de processo coeso de alta performance.

### 2.3.2 Medição da tensão

As grandezas elétricas, tensão e corrente, vêm sendo coletadas por meio de sistemas automatizados, e utilizados no ramo da manufatura subtrativa para o monitoramento de máquinas.

Viharos e Farkas (2021), em suas pesquisas, desenvolveram um sistema de medição via LabVIEW®, voltado a uma fresadora de microdescarga equipada com um codificador linear, sensores de tensão e corrente, no qual descargas mínimas de energia foram aplicadas durante o processo de usinagem de microfresamento; os valores de carga estão na faixa da capacidade dos instrumentos de medição, causando interferência no sistema de medição, afetando todo o processo; para reduzir esse efeito, foi utilizada uma sonda diferencial do tipo HAMEG HZ100, que possui capacidade de entrada de apenas 1,2 pF e resistividade de 8 MΩ; como

resultado, os autores referenciados obtiveram nas primeiras camadas, menos descargas e, posteriormente, saltos de corrente mais bruscos, em que os valores do sinal são sincronizados nessa alta frequência, permitindo a análise, diagnóstico e controle mais precisos a serem estabelecidos posteriormente.

Lu et al. (2019) desenvolveram um sistema de medição de vibração para microfresamento com sinais de deslocamento, obtido por um sensor a laser. As informações de distância obtidas pelo sensor nos eixos x, y e z foram convertidas em sinais analógicos de tensão, e esses estavam linearmente relacionados com a distância e foram convertidos em sinais digitais por um aparato de aquisição de dados PXI-4462 produzido pela National Instruments e enviados ao computador por barramento de dados de alta velocidade para coleta, reserva e análise, realizados pelo software LabVIEW®), como representado na Figura 2.11.

Figura 2.11 – Esquemático da análise e aquisição de dados

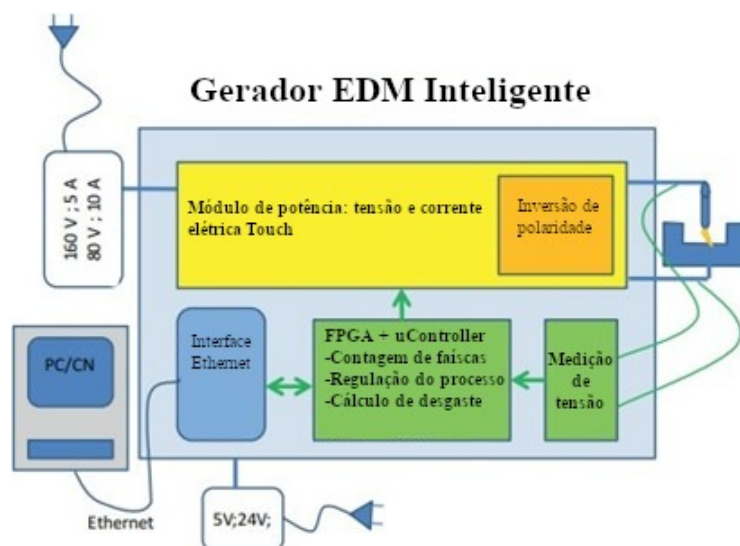


Fonte: Lu et al. (2019)

Os resultados alcançados pelos autores foram uma previsão de simulação da estabilidade do processo de microfresagem de superliga à base de níquel, apresentando erros em comparação com a situação real. Esse erro tem a possibilidade de reduzir a profundidade axial do incremento da etapa de corte e o incremento da etapa de velocidade do fuso, mas ainda não pode corresponder totalmente à situação real do sistema, podendo ser utilizado como referência para supressão de vibração e estabelecimento de critérios de vibração e seleção de parâmetros de corte para o processo de microfresamento.

Giandomenico et al. (2018) construíram um gerador inteligente para microfresamento, em que realizou a medição das características de cada descarga de faísca por meio da medição de tensão e controle de processo, podendo contar as faíscas e classificá-las em normal, descargas contaminadas, abertas e em curto-circuito, controlar o processo de eletroerosão e calcular o desgaste do eletrodo, sendo essas tarefas realizadas por múltiplos cartões eletrônicos. Todos esses elementos estavam integrados em uma única placa, na qual foi utilizada uma microfresadora de quatro eixos, sendo a capacidade de controle e monitoramento do sinal de tensão realizada por meio da interface LabVIEW®, na qual todos os sinais provenientes da simulação foram monitorados, como representado no diagrama Figura 2.12.

Figura 2.12 – Diagrama do gerador inteligente



Fonte: Giandomenico et al. (2018)

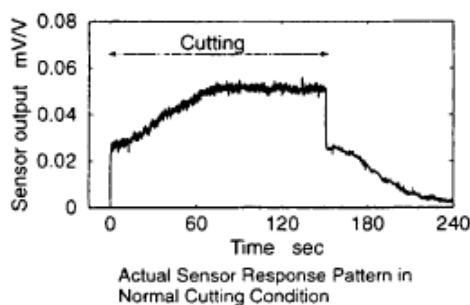
Com a obtenção de resultados acumulados por fases de testes, os autores analisaram as faíscas da última fase como função dos movimentos da trajetória da ferramenta, bem como a remoção de material e o desgaste do eletrodo, havendo correspondência entre as medições feitas com o perfilômetro e a distribuição de faíscas durante a usinagem.

Masters et al. (2015) apresentaram o design e a caracterização de um sistema microcanal adequado para o estudo de microplasmas; o canal foi elaborado com uma máquina de microfresagem CNC em material cerâmico, o que tornou possível fabricar e utilizar técnicas além das convencionais de fabricação que permite maior agilidade na confecção de dispositivos de plasma microcanal. O sistema foi controlado por um aplicativo desenvolvido em LabVIEW® e a saída de tensão analógica dos manômetros foi registrada por um sensor Agilent 34970A, com apoio de uma unidade de aquisição de dados (DAQ), que converte os sinais de entrada em

medidas de pressão correspondentes em um segundo; como resultado, os autores reiteraram a facilidade de produção de um dispositivo de plasma tipo de descarga de barreira dielétrica, e múltiplas interações de design mostram que o método de fabricação é viável e repetível, e que com o uso de múltiplos canais paralelos com caminhos complexos, tem a possibilidade de ser criados, e os insumos de gás múltiplos podem ser utilizados para regular o sistema, independentemente do reagente utilizado no processo.

O método proposto por Shinno, Hashizume e Sato (1997) foi baseado na detecção simultânea de vários tipos de fenômenos presentes no processo de fabricação, dentre eles a medição da tensão elétrica por meio de um centro de torneamento com um material de condutividade térmica  $0,21 \text{ W/mK}$  e espessura  $1 \text{ mm}$ . O experimento foi realizado com o uso do sensor multifenômenos. A saída do sensor proposto é mostrada na Figura 2.13, que contém informações completas sobre as flutuações de comportamentos térmicos e mecânicos durante o corte normal.

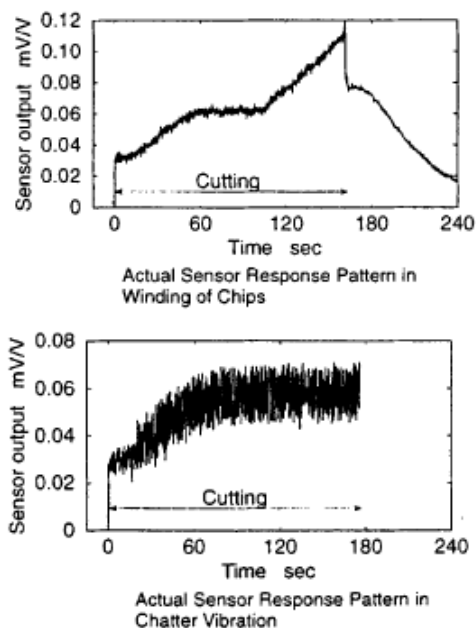
Figura 2.13 – Comportamento dos sinais após o processo



Fonte: Shinno, Hashizume e Sato (1997)

Exemplos típicos da saída do sensor durante o enrolamento de cavacos de corte ao redor da haste da ferramenta e durante a vibração são mostrados na Figura 2.14, respectivamente.

Figura 2.14 – Comportamento dos sinais após o processo



Fonte: Shinno, Hashizume e Sato (1997)

Para evitar saídas conflitantes de diferentes controladores e priorizar ajustes de processos individuais, foi necessário integrar vários controladores em um sistema supervisorio de malha fechada (CAO; ZHANG; CHEN, 2017).

Por meio dos resultados obtidos pelos autores referenciados, ficou claro que quaisquer anormalidades no ambiente de usinagem, como o enrolamento de cavacos, pode ser detectado de forma mais eficaz usando esse sensor; atendendo a esses requisitos, propriedades como multifuncionalidade, confiabilidade e a facilidade de uso sensores com resposta rápida são urgentemente necessários.

Uma investigação sobre a identificação modal on-line de um sistema de usinagem controlado numericamente por computador (CNC), proposto por Hussin, Cheng e Huo (2006), teve finalidade de controlar o sistema de forma otimizada, com base nos parâmetros modais identificados na dinâmica do sistema, sendo o experimento composto pela superfície da peça usinada em que ocorreu uma medição de rugosidade pelo método de dispersão a laser e manipulações matemáticas, para prever características dinâmicas do sistema de medição e relações físicas da usinagem, no qual o sistema de medição consistiu em um laser emissor de luz, uma trilha óptica e um sensor eletro-óptico, para capturar a luz refletida, que foi detectada e capturada por um fotossensor que converteu intensidades de luz em níveis de tensão elétrica, sendo o experimento configurado em uma situação estática, e mais tarde, estendido para medição online,

programado para a utilização gráfica dos dados via LabVIEW® e o MATLAB® para obtenção de dados experimentais que se apresentaram muito promissores, embora mais ensaios precisam ser realizados, e os resultados serem revistos criticamente.

Nos resultados obtidos, os autores suprarreferidos concluíram que os ensaios experimentais provaram preliminarmente que a abordagem apresentada foi promissora, embora seja recomendável a realização de mais estudos com uma análise crítica dos resultados.

Melichar e Kutlwašer (2014) propuseram um protótipo de ajuste de compensação da máquina de circularidade, sem utilizar contato, incluindo o modelo de desempenho e a determinação da incerteza de medição, utilizando-se um equipamento de teste automático. O principal teste foi realizado no cabeçote que integra o scanner a laser e um sensor indutivo que, de modo automático, trabalham em paralelo ao software LabVIEW®, em que se determinou a localização exata do eixo de rotação da broca, quando alterada a posição das peças durante o processo de fabricação, detectando a posição correta do material a ser usinado e do eixo da ferramenta; o monitoramento foi feito por meio dos sinais de tensão elétrica. Os autores concluíram que o protótipo fornece o ajuste de forma eficaz para a máquina CNC, obtendo ganhos expressivos nos processos de controle; na Figura 2.19 é representado o protótipo avaliado.

Banerjee et al. (2022) apresentaram uma metodologia de usinagem de alta eficiência, com o objetivo de reduzir o consumo de energia, que consistiu principalmente no desbaste do cavaco utilizando uma profundidade de corte radial mais baixa, e uma profundidade de corte axial mais alta para o fresamento. Para a coleta dos dados de consumo de energia, foi utilizado um registrador de energia da fabricante (National Instrument) composto por sensores de tensão (LEM LV25-P), sensores de corrente (LEM LA55-P), placas de coletas de dados NI-9215, uma placa Compact DAQ e uma interface do software LabVIEW®. Os resultados demonstraram que a metodologia proposta de usinagem de alta eficiência consome menos energia se comparada com a usinagem tradicional.

Woźniak e Męczyńska (2020) analisaram o fenômeno da histerese de sondas utilizadas em máquinas-ferramenta, por meio de uma configuração projetada para medir a tensão elétrica proveniente do processo executado pelos apalpadores, acoplado a um sensor de tensão; o controlador se comunicou com um computador pela placa de aquisição de dados USB-6259 BNC da National Instruments®, e a medição foi controlada por um programa de computador desenvolvido em ambiente LabVIEW®; como resultado, foram apresentados dados experimentais que comprovam que a histerese é o principal componente de erro da sonda convencional, e na

sonda projetada, o valor medido de tensão foi minimizado significativamente, mas não eliminado por completo, tornando os apalpadores como o componente mais importante dos erros de medição para máquinas-ferramentas CNC.

Por meio da aquisição de dados, seja ela realizada por meio do dispositivo DAQ, a medição de tensão elétrica se torna maleável de uma maneira que esse tipo de tecnologia pode ser aplicado em diversos campos da engenharia e processos de fabricação, com diferentes métodos de aplicação para a mensuração e monitoramento da tensão elétrica.

### 2.3.3 Medição da potência

O consumo de energia está aumentando junto com a população mundial e o nível de industrialização; assim, a eficiência energética e de recursos na fabricação é de vital importância para aumentar a eficiência energética e de recursos, sendo a quantidade de energia consumida deve primeiramente ser quantificada com precisão para cada processo de fabricação (ALTINTAS; KAHYA; ÜNVER, 2016).

Dentro desse contexto, para que ocorra a aferição do sinal de potência elétrica, é necessário calcular a potência elétrica aparente mediante a multiplicação do valor referente à tensão elétrica com a corrente elétrica, como dado na Equação 2.3.

$$P = V * I * 1,73 \quad (2.3)$$

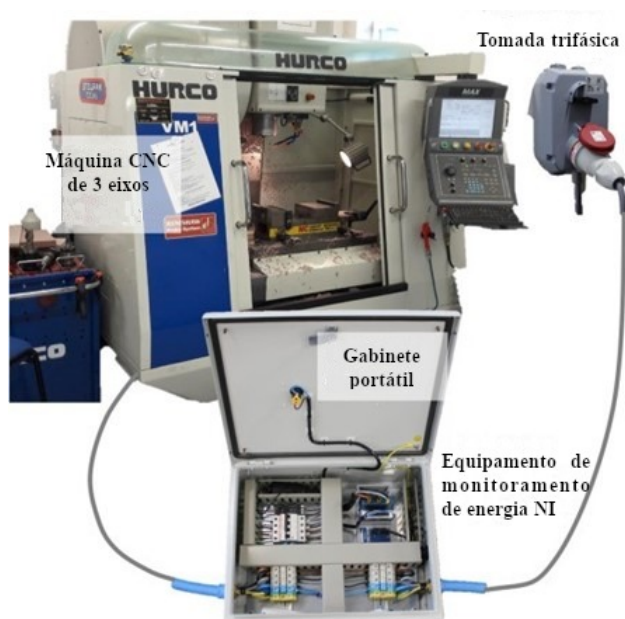
Cada motor de uma máquina-ferramenta rotaciona-se a uma velocidade diferente, consumindo potências diferentes, embora a potência mais relevante seja a demandada pelo motor principal, ou seja, o motor de corte; assim, medir a potência de corte, resultado do produto da potência ativa com o rendimento do motor, é uma estimativa próxima do consumo real da máquina (VIANA et al., 2017).

A fim de elaborar um sistema de aquisição e análise de dados, Klocke et al. (2009) utilizaram a plataforma LabVIEW® para realizar o monitoramento que integra dispositivos de medição e cálculos, a fim de facilitar e indicar a estabilidade e reprodutibilidade do processo, podendo esse sistema detectar distúrbios de estabilidade do processo, o que permite a identificação precoce ou até mesmo a prevenção de refugos em uma produção industrial.

Enquanto Goodall, Pantazis e West (2020) elaboraram uma pesquisa sobre a investigação do monitoramento de energia elétrica sob condições variáveis, com diferentes velocidades de fuso e taxas de alimentação de uma máquina CNC, em combinação com um modelo matemá-

tico como um método de baixo custo e processo robusto para detectar e determinar o desgaste da ferramenta em fresamento de topo CNC, as medições de corrente e tensão foram realizadas para todo equipamento, numa frequência de amostragem de 50 Hz usando National Instruments® NI-9242 e NI-9247 dentro do chassi cDAQ-9174, com a configuração experimental mostrada na Figura 2.15.

Figura 2.15 – Configuração experimental

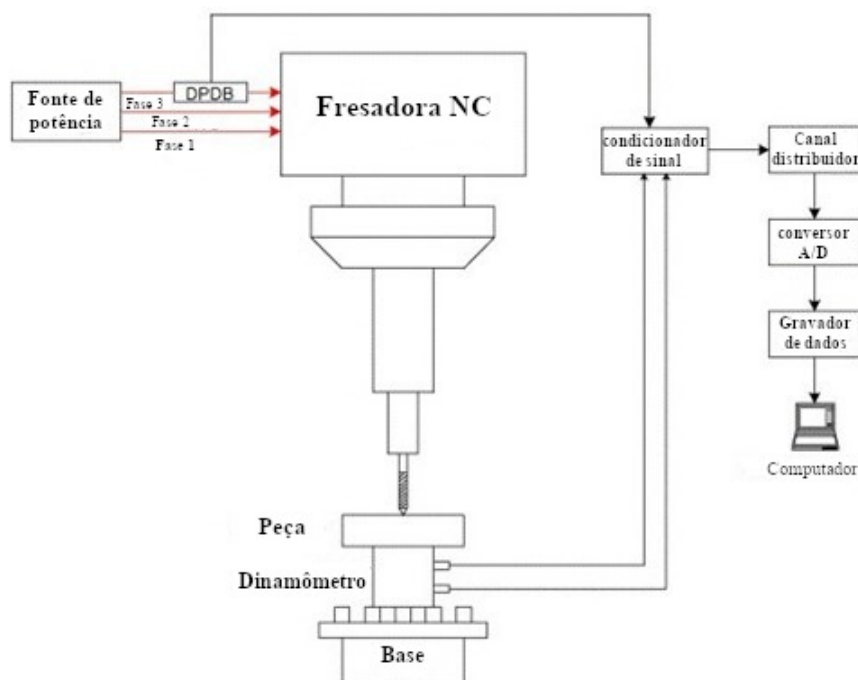


Fonte: Goodall, Pantazis e West (2020)

Em seus resultados os autores supramencionados analisaram o aumento da potência elétrica observado, conforme o modelo matemático que prevê desgaste da ferramenta de corte; para cada experimento realizado, usaram os dados de energia elétrica coletados da máquina operatriz via LabVIEW, sendo o modelo matemático de potência de corte utilizado por uma nova ferramenta, fornecendo boa correlação com os dados observados.

Al-Sulaiman, Baseer e Sheikh (2005) apresentaram uma técnica em que a potência para o funcionamento do motor do fuso foi anulada e apenas a potência necessária para o processo de perfuração real, a condição da ferramenta pelo dispositivo diferencial de potência foi elaborado o seguinte *setup* experimental, o motor elétrico trifásico alimenta a máquina operatriz, abaixo do material de trabalho se localizou um dinamômetro para medir as forças axiais e de torque, enviando para o condicionador, de sinal juntamente com uma das fases do motor elétrico. Os sinais após condicionados foram enviados para canais de distribuição, e para o conversor de sinal analógico/digital e por fim encaminhados para a gravação dos dados no computador, como representado na Figura 2.16.

Figura 2.16 – Instalação instrumental do protótipo



Fonte: Al-Sulaiman, Baseer e Sheikh (2005)

Medições foram realizadas em materiais compósitos em comparação com o aço, e o experimento dos autores referenciados obtiveram êxito ao monitorar o sinal de energia elétrica, podendo o método ser aplicável para determinar e/ou verificar o desgaste máximo permitido em outros materiais durante o processo de furação.

Rodrigues, Espíndola Ferreira e Rocha (2018), em sua contribuição científica, propuseram um método para analisar o consumo de energia elétrica em processos de fabricação, a fim de identificar potenciais de redução desse consumo, com o diferencial desse método, uma avaliação de possíveis soluções em função de indicadores nos aspectos econômico, social e ambiental; por meio de um sistema de modelagem matemática, buscaram dados oriundos do processo de fabricação, por meio de aquisição de dados e modelagem de processos, identificando possíveis ações para reduzir o consumo de energia elétrica.

Com objetivo de desenvolver um protótipo para prever o consumo de energia de aceleração do fuso de fresadoras de controle numérico computadorizado (CNC), Pawar, Bera e Sangwan (2022) apresentaram um modelo que se baseia no princípio de controle do motor do fuso e inclui o cálculo do momento de inércia do sistema de acionamento do fuso, por meio de um modelo analítico, sendo os experimentos realizados em um centro de usinagem vertical de três eixos por meio de um equipamento da National Instruments®, utilizado para medir a

potência total, o consumo e a coleta dos dados, com o auxílio de sensores de tensão (LEM LV25-P), sensores de corrente (LEMLA55-P), um dispositivo NI-9215, um Compact DAQ, e uma interface de software LabVIEW®, como representado na Figura 2.17.

Figura 2.17 – Setup do experimento realizado



Fonte: Pawar, Bera e Sangwan (2022)

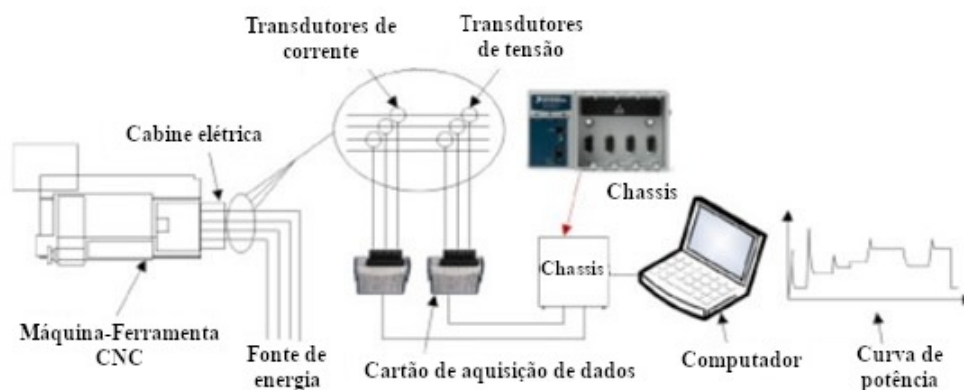
Como resultado, os autores definiram que o modelo analítico proposto previu o consumo de energia com uma precisão de aproximadamente 98 %, apresentando variação da magnitude do pico de energia durante o aumento de velocidade devido à exigência de torque, sendo equiparados aos dados adquiridos pelo LabVIEW®; portanto, o modelo auxilia na estimativa do consumo de energia do fuso com maior precisão, levando em consideração o pico de energia da aceleração no estado transitório da máquina.

Cuppini, D'errico e Rutelli (1990) desenvolveram a implementação de um método baseado em relações experimentais entre desgaste e potência de corte, utilizando um dispositivo de monitoramento de potência para detectar a potência total necessária para acionar o motor do fuso da máquina-ferramenta, e executar medições de corrente, tensão e potência do motor de fuso; a potência de corte real pode, então, ser obtida subtraindo o poder ocioso do fuso a partir da potência total, e os resultados obtidos demonstraram segurança para realizar substituições de ferramentas preventivas que nos permitem explorar toda a vida útil da ferramenta, mas a implementação necessita de uma melhoria da estratégia, integrando um controle adaptativo.

Lv et al. (2016) propuseram investigar as características energéticas e obter os modelos de potência de máquinas operatrizes CNC, com base nos dados de potência medidos e na

análise estatística da análise de regressão linear múltipla dos dados experimentais utilizando o software SPSS (*Statistical Package for the Social Sciences*), e buscar o potencial de economia de energia das máquinas-ferramentas CNC, por meio de um estudo experimental com o uso de sete máquinas-ferramentas CNC diferentes usadas para estudar as características de potência em diferentes movimentos. Durante cada teste, o consumo total de energia elétrica foi aferido usando três transdutores de tensão LEM LV25-P e três transdutores de corrente LEM LA55-P que foram conectados ao barramento principal do gabinete elétrico das máquinas-ferramentas; o sinal de tensão é adquirido e amostrado usando duas placas de aquisição de dados NI-9215 e um chassi de aquisição de dados compacto NI Cdaq-9174, com frequência de amostragem de 5000 Hz por canal, por meio da interface de programação LabVIEW®, como representado na Figura 2.18.

Figura 2.18 – Esquemático do sistema com a interface LabVIEW®



Fonte: Lv et al. (2016)

Em suas conclusões sobre os resultados obtidos, os autores supracitados constataram que as características de energia podem variar muito para diferentes tipos de máquinas-ferramentas CNC, devido à complexidade da estrutura da máquina-ferramenta, sendo que o consumo de energia de fresamento varia com as diferentes máquinas-ferramenta, e a potência de fresamento de cada máquina-ferramenta precisa ser modelada separadamente para que não ocorra erros durante o monitoramento de sinais.

Lv et al. (2017) apresentaram um estudo que relacionou o consumo de energia de aceleração do fuso, por meio da aquisição de dados da potência elétrica, via plataforma virtual LabVIEW®, com as abordagens para melhorar a eficiência energética e investigar possíveis abordagens para reduzir essa parte do consumo. Os experimentos foram conduzidos em um torno CNC CK6153i fabricado pela *Jinan First Machine Tool Group Co., Ltd*, sendo o fuso

acionado por um motor assíncrono trifásico de gaiola de esquilo fabricado pela *Shanghai Xi'anma Motor Co., Ltd.* ; a potência da máquina-ferramenta foi medida usando a configuração experimental, incluindo transdutores de tensão, transdutores de corrente, placa de aquisição de dados, chassi e software NI LabVIEW®.

Os resultados obtidos pelos autores mostraram que a potência de aceleração prevista do fuso concorda bem com os dados experimentais, e os erros médios de previsão de tempo e energia de aceleração do fuso estavam dentro de 6%, concluindo que os modelos propostos podem ser usados para estimar a potência, o tempo e o consumo de energia da aceleração do fuso, sem a realização de experimentos trabalhosos, e as abordagens para melhorar a eficiência energética incluem evitar paradas e reinicializações desnecessárias do fuso, encurtando o tempo de aceleração da máquina, com uma porcentagem de redução de energia por essas abordagens, variou de 10,6% a mais de 50%.

Ao projetar máquinas-ferramentas CNC, é importante considerar a dinâmica do controle, os componentes elétricos e a estrutura mecânica da máquina simultaneamente, Jönsson, Wall e Broman (2005). Apesar das vantagens dos sinais de potência, é difícil garantir o monitoramento em tempo real, devido ao pequeno intervalo de tempo entre a ocorrência de vibração e os sinais recebidos (CAO; ZHANG; CHEN, 2017).

Os recentes avanços na tecnologia de software e de computadores tornam possível a simulação prática nos processos de usinagem. Um exemplo disso é a aplicação do Método de Elementos Finitos, sendo uma ferramenta muito popular nas análises de operações de fabricação, tendendo a ter uma fácil aplicação e envolvendo, por muitas vezes, longas operações (MARANHÃO; SILVA; DAVIM, 2013).

A competitividade do mercado leva as empresas a buscar, na simulação de processos, uma nova tecnologia para o aperfeiçoamento contínuo da manufatura. Conseqüentemente, a cada dia, os produtos tornam-se mais perfeitos e qualificados, com preços mais competitivos e acessíveis, para atender a necessidades e exigências dos consumidores (MARANHÃO; SILVA; DAVIM, 2013).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, são apresentados os materiais e metodologias que foram utilizados para a realização deste trabalho. Estão incluídos informações sobre os equipamentos empregados, etapas de montagem da bancada experimental, os métodos implementados e delineamento experimental.

As simulações foram realizadas no Laboratório de Eletricidade (DAT-14) da Universidade Federal de Lavras - MG, no período de janeiro a setembro do ano de 2021, para a realização dos testes no sistema de aquisição de dados desenvolvido.

#### 3.1 Materiais

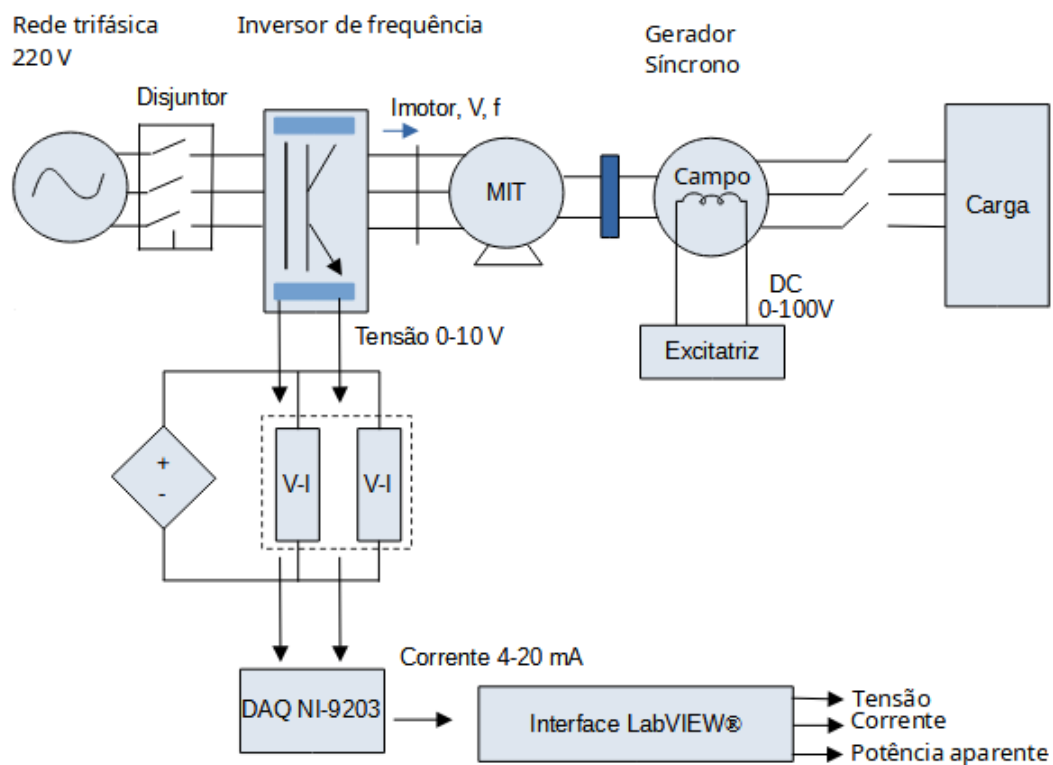
Este projeto consistiu no desenvolvimento de uma interface homem-máquina, realizando a aquisição de dados dos sinais elétricos (tensão e corrente) oriundos de ensaios realizados com motores que simularam o funcionamento de uma máquina operatriz.

O motor de indução trifásico (MIT) foi acoplado mecanicamente a um gerador síncrono (GS), que foi utilizado como carga mecânica para o motor de indução. Para o correto funcionamento, o gerador síncrono necessitou de uma excitatriz para gerar um sinal de 0 a 100V em corrente contínua e alimentou o enrolamento de campo. O gerador síncrono gerou uma tensão que variou de 0 a 220V, dependendo do seu ponto de operação. Essa tensão alimentou cargas resistivas, resultando na circulação de corrente. Essa corrente, que passou nos enrolamentos do gerador síncrono, simulou a ação de uma carga mecânica acoplada ao eixo de indução.

O motor de indução foi acionado por um inversor de frequência, que além de controlar sua velocidade de operação, informou ao usuário por meio de suas saídas analógicas, os valores de tensão e corrente de alimentação do motor. Esses valores analógicos variaram de 0 a 10V, passando pelo conversor de tensão para corrente que operaram na faixa de 4 a 20mA. Essa faixa de corrente permitiu a aquisição de dados pelo hardware NI-9203 e pelo software LabVIEW®, ambos da fabricante National Instruments. Por meio da aquisição de dados realizada durante os ciclos de trabalho do motor, os sinais elétricos de tensão, corrente e potência aparente foram aferidos por meio da rotina desenvolvida na plataforma virtual LabVIEW®, informando sobre as condições de funcionamento do motor elétrico durante os tratamentos que foram aplicados nos ensaios.

O esquema elétrico geral do experimento é representado pela Figura 3.1.

Figura 3.1 – Esquema elétrico geral



Fonte: Do autor (2022)

Cada equipamento, para a construção da bancada experimental, é detalhado nas subseções seguintes.

### 3.1.1 Banco de resistores

O banco de resistores utilizado possui uma tensão máxima de isolamento de 0,6 a 36 kV, uma potência de 5 a 1000 kW, detendo diversos valores ôhmicos e com variadas capacidades de dissipação de potência, representado na Figura 3.2.

Figura 3.2 – O painel frontal no qual foram realizadas as ligações (a), a visão da parte de trás, com a disposição das resistências (b)

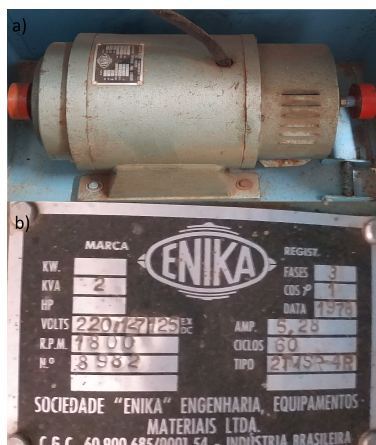


Fonte: Do autor (2022)

### 3.1.2 Gerador síncrono

O gerador síncrono trifásico, da fabricante Enika, modelo 2T4SR-4R, com tensão de alimentação de 220 V, rotação máxima de 1800 rpm, frequência de 60 Hz e a potência de saída equivalente a 2 kVA, conforme a placa de identificação apresentada na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Gerador Síncrono (a), placa de identificação (b)



Fonte: Do autor (2022)

### 3.1.3 Excitatriz

A excitatriz utilizada possui uma faixa ajustável de tensão de 0 a 100 V e para corrente de 0 a 20A, com a função de excitar o campo elétrico da máquina síncrona, como representado na Figura 3.4.

Figura 3.4 – Excitatriz

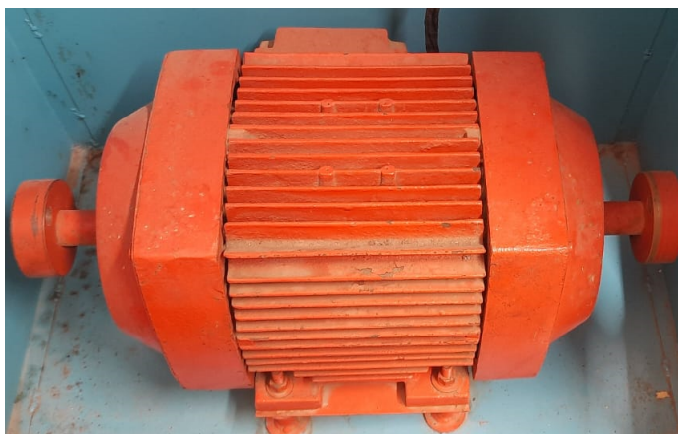


Fonte: Do autor (2022)

### 3.1.4 Motor de indução trifásico

Os testes foram realizados em um motor de indução trifásico com tensão de alimentação de 220 V, a placa de identificação não encontrada, mas possuía características de um motor de 5 cv, com 1800 rpm e frequência de 60 Hz, conforme representado na Figura 3.5.

Figura 3.5 – MIT utilizado



Fonte: Do autor (2022)

### 3.1.5 Inversor de Frequência

O inversor de frequência utilizado é da fabricante WEG, do modelo CFW09, como representado na Figura 3.6.

Figura 3.6 – Inversor de frequência CFW09



Fonte: Do autor (2022)

Em sua etiqueta de identificação, constam seu número de série 1005871556, número da peça 10413528, revisão de software 4.05, dados de entrada nominal: fase referente a rede/linha 220-230 VAC, corrente entre 3 a 54 A e frequência de trabalho 50/60 Hz. Os dados de saída nominal: 0 a 220-230 VAC, frequência 0-170/204 Hz, corrente de saída 45 A, frequência de saída 5kHz, VT: 45 A e Carga CT: 5kHz, conforme a Figura 3.7.

Figura 3.7 – Etiqueta de identificação do CFW09



Fonte: Do autor (2022)

Informações adicionais de especificações técnica do CFW09 são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Especificações técnicas CFW09

Tensão de trabalho	0 - 800 V
Frequência de trabalho	0-1020 Hz
Velocidade máxima de trabalho	1800 rpm
Potência de trabalho	1,5 a 1500 cv
Tensão de saída analógica	0 a 10 Vdc
Resolução	11 bits
Saídas analógicas	AO1 - 17 (terminal) AO2 - 19 (terminal)

Fonte: Do autor (2022)

### 3.1.6 Fonte de alimentação regulável

A fonte de alimentação regulável de tensão e corrente da fabricante Icel, modelo PS-5000, possui uma faixa ajustável de saída para tensão de 0 a 30 V, e para corrente de 0 a 3 A, como representado na Figura 3.8.

Figura 3.8 – Fonte de alimentação regulável



Fonte: Do autor (2022)

### 3.1.7 Conversor de sinal

O módulo conversor de sinais converte o sinal da tensão de 0 a 10V para um sinal de corrente de 4 a 20 mA, com precisão de 0,01 mA. O módulo conversor de sinais de tensão para corrente foi utilizado para converter os sinais de tensão da saída analógica do inversor de frequência em sinais de corrente para a entrada analógica do NI 9203, representado pela Figura 3.9.

Figura 3.9 – Conversor de sinal



Fonte: Do autor (2022)

### 3.1.8 DAQ (Data Acquisition)

O módulo de entrada analógica NI 9203 da fabricante National Instruments® é representado na Figura 3.10.

Figura 3.10 – NI-9203



Fonte: Do autor (2022)

Na Tabela 3.2, são detalhadas suas especificações técnicas.

Tabela 3.2 – Especificações técnicas NI-9203

Número de canais	8 canais de entrada analógica
Resolução	16 bits
Proteção contra sobretensão	$\pm 30$ V
Entrada nominal	0 a 20 mA - unipolar $\pm 20$ mA - bipolar
Taxa de amostragem	200 KS/s máx.
Tempo de conversão	5 $\mu$ s min.
Largura da banda de entrada	850 KHz
Tensão de segurança	30 V DC máximo
Tensão de isolamento	250 Vrms

Fonte: Do autor (2022)

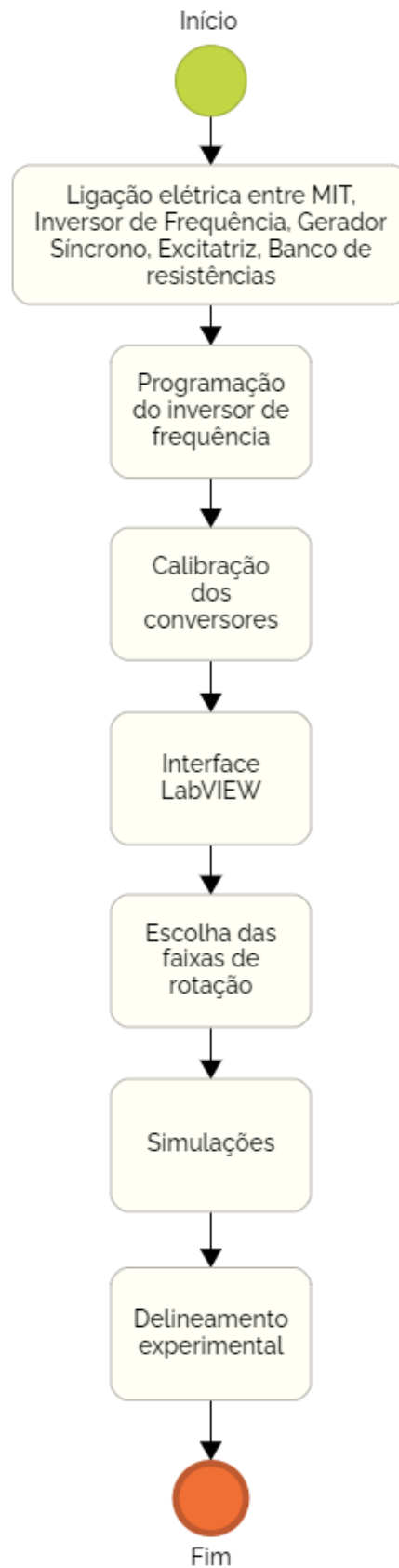
### 3.1.9 Notebook

Foi utilizado um notebook com processador Intel Core i5 7<sup>a</sup> geração, memória RAM de 4 GB, disco rígido de 1TB, no qual foi instalada a plataforma virtual LabVIEW® e executados os ensaios.

### 3.2 Métodos utilizados

Para a aplicação dos métodos utilizados neste projeto, foram determinados os seguintes procedimentos, para a montagem dos ensaios que foram realizados neste projeto, conforme a Figura 3.11.

Figura 3.11 – Etapas dos métodos aplicados ao projeto



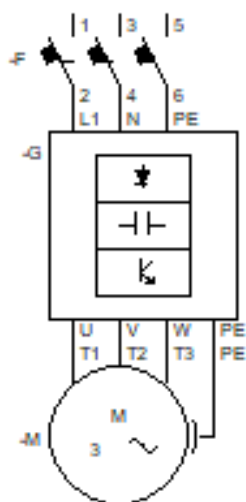
Fonte: Do autor (2022)

### 3.2.1 Ligação elétrica entre o motor de indução trifásico e o inversor de frequência

Para o acionamento do motor de indução trifásico, foi utilizado o método de ligação triângulo, devido à tensão de alimentação do equipamento, por intermédio do painel de contatos que estava disponível no equipamento. Os conectores que representaram a ligação em triângulo foram nomeados como T1-T2-T3.

A ligação triângulo do motor (T1 - T2 - T3) foi conectada ao inversor de frequência, para controlar a partida, a velocidade, a frequência de trabalho, potência, tensão e corrente do motor. O inversor foi conectado ao motor trifásico, nos contatos T1 - T2 - T3 do motor, conectados aos U - V - W do inversor de frequência, respectivamente. A Figura 3.12 representa a comunicação do inversor de frequência com o motor de indução trifásico.

Figura 3.12 – Etapas dos métodos aplicados ao projeto

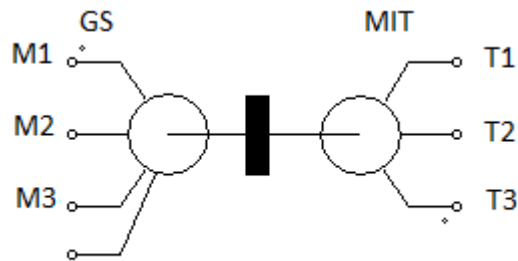


Fonte: Do autor (2022)

### 3.2.2 Ligação do gerador síncrono ao motor de indução trifásico

A ligação elétrica do gerador síncrono trifásico foi semelhante à do motor de indução trifásico, por intermédio dos 12 pontos de ligação disponíveis em seu painel de contatos. Os três conectores oriundos da ligação trifásica em triângulo foram nomeados como M1, M2 e M3, respectivamente. A conexão do gerador síncrono (GS) ao motor de indução trifásico (MIT) foi realizada por meio de um acoplamento flexível, como representado a Figura 3.13.

Figura 3.13 – Conexão entre o motor e o gerador síncrono

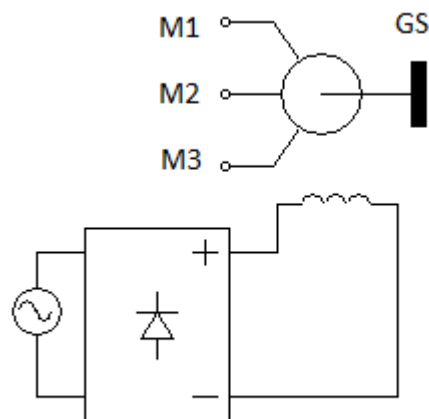


Fonte: Do autor (2022)

### 3.2.3 Ligação do gerador síncrono à excitatriz

Para que ocorresse a conexão entre o gerador síncrono (GS) e a excitatriz, os dois polos do campo da excitatriz alimentaram o gerador síncrono nos contatos referentes à linha, para excitar o campo do gerador com uma faixa de tensão de 0-100 V, como representado na Figura 3.14.

Figura 3.14 – Ligação elétrica entre o gerador síncrono e a excitatriz



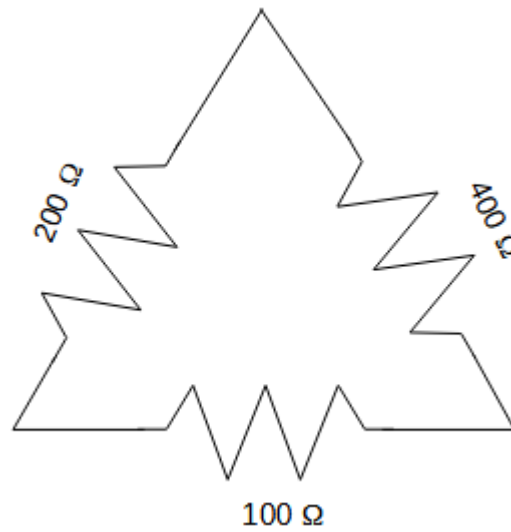
Fonte: Do autor (2022)

Desse modo, o equipamento pôde exercer sua função para adicionar atrito ao eixo do motor de indução trifásico.

### 3.2.4 Ligação do banco de resistências

A disposição das resistências disponíveis no equipamento, foram interligadas, para que a carga resistiva aplicada ao sistema fosse perceptível por meio do monitoramento dos dados elétricos. No painel de contatos, a ligação que foi realizada é representada no Figura 3.15.

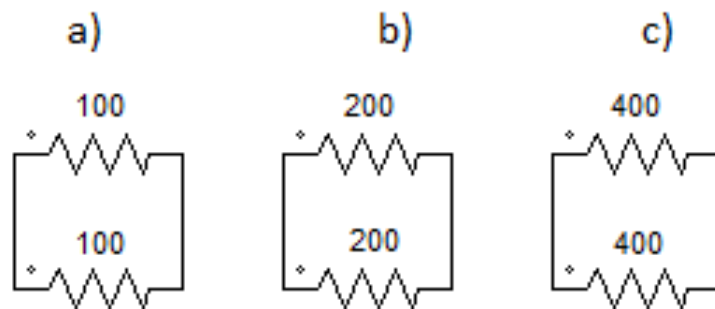
Figura 3.15 – Ligação no painel do banco de resistências



Fonte: Do autor (2022)

Essa disposição realizada foi pelo fato de o circuito ser trifásico; entretanto, a disposição do circuito das resistências era em paralelo, como representado na Figura 3.16.

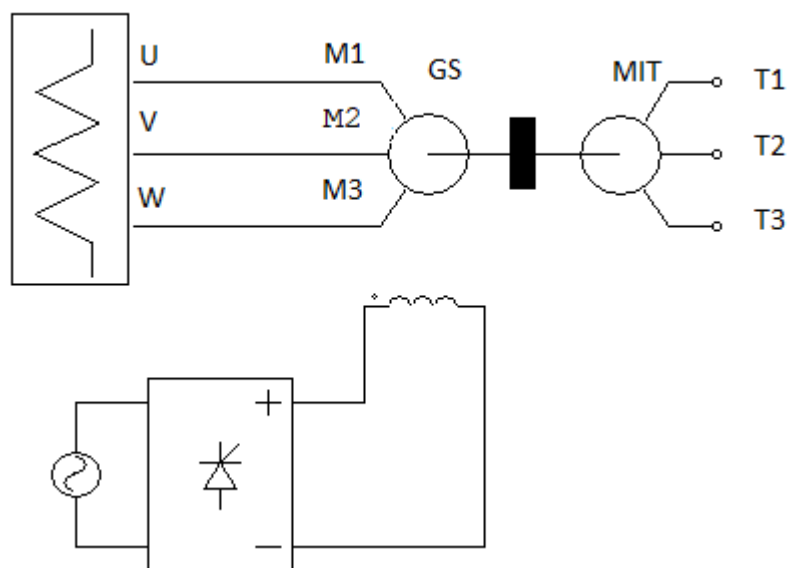
Figura 3.16 – a) paralelo da resistência de 100 Ohms, b) paralelo da resistência de 200 Ohms, c) paralelo da resistência de 400 Ohms



Fonte: Do autor (2022)

Por meio do cálculo da resistência equivalente, foi encontrado um valor que representasse a conexão de todos os resistores utilizados. Após esse procedimento, os conectores M1, M2 e M3 referentes ao gerador síncrono foram conectados aos contatos U, V e W, que representaram o banco de resistências, como representado na Figura 3.17.

Figura 3.17 – Ligação do banco de resistências ao gerador síncrono



Fonte: Do autor (2022)

### 3.2.5 Programação do inversor de frequência

O inversor de frequência foi programado seguindo parâmetros estabelecidos no manual de instruções; dessa forma, a saída parametrizada para saída de dados.

Utilizou-se o item referente aos parâmetros de fábrica (P204) para resetar a atividade anterior ao experimento. Logo após essa etapa, empregou-se a função PROG e foi adicionada a senha para carregar a frequência de 60 Hz, para se adequar à frequência de trabalho do motor. Em seguida, empregou-se o parâmetro P251 e houve a adequação da função PROG 14, referente à tensão de saída analógica que o inversor de frequência forneceu, em relação ao motor. Com essa programação, o inversor esteve apto para a sua utilização no experimento.

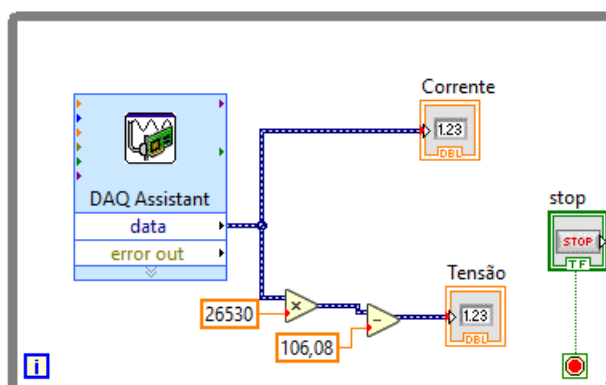
### 3.2.6 Calibração dos conversores

Para haver a conversão de sinais, foram conectados conversores de sinal ao inversor de frequência e a placa de aquisição NI 9203 da empresa National Instruments®. A conexão com o inversor de frequência ocorreu pelas saídas analógicas 17 e 19 do inversor. Os canais 18 e 20 são referentes ao (GND) *Graduated Neutral Density*, ou seja, o fio terra do inversor de frequência.

Ambos os conversores foram alimentados por uma fonte de tensão regulada a 10 V e 20 mA. Em seguida, após a conexão entre os conversores de sinais e a placa de aquisição NI 9203, a programação foi desenvolvida na plataforma virtual LabVIEW®.

A calibração dos conversores de sinal aferidas pelo hardware NI 9203 ocorreu com uma rotina desenvolvida na plataforma de programação virtual LabVIEW®, com o *DAQ Assistant*, como representado na Figura 3.18.

Figura 3.18 – Rotina de calibração do conversor de sinal



Fonte: Do autor (2022)

Por meio da aquisição de dados pelo canal AIO, que estava inserido no *DAQ Assistant*, o sinal de corrente foi dividido em duas vias: na primeira, o sinal de corrente foi mostrado pelo indicador numérico e, na segunda via, multiplicado pela constante 26530 e o produto da multiplicação foi subtraído de 106,03, para encontrar o sinal de tensão por meio da calibração.

As constantes inseridas nas rotinas de calibração foram provenientes dos dados coletados para a realização da calibração do conversor de sinal, conforme a Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Valores da calibração

rpm	Tensão (v)	Corrente (mA)
1200	157	10
1300	171	10,4
1400	185	10,9
1800	238	13

Fonte: Do autor (2022)

Por meio da Tabela 3.3, foi obtida uma função de primeiro grau, representada pela Equação 3.1.

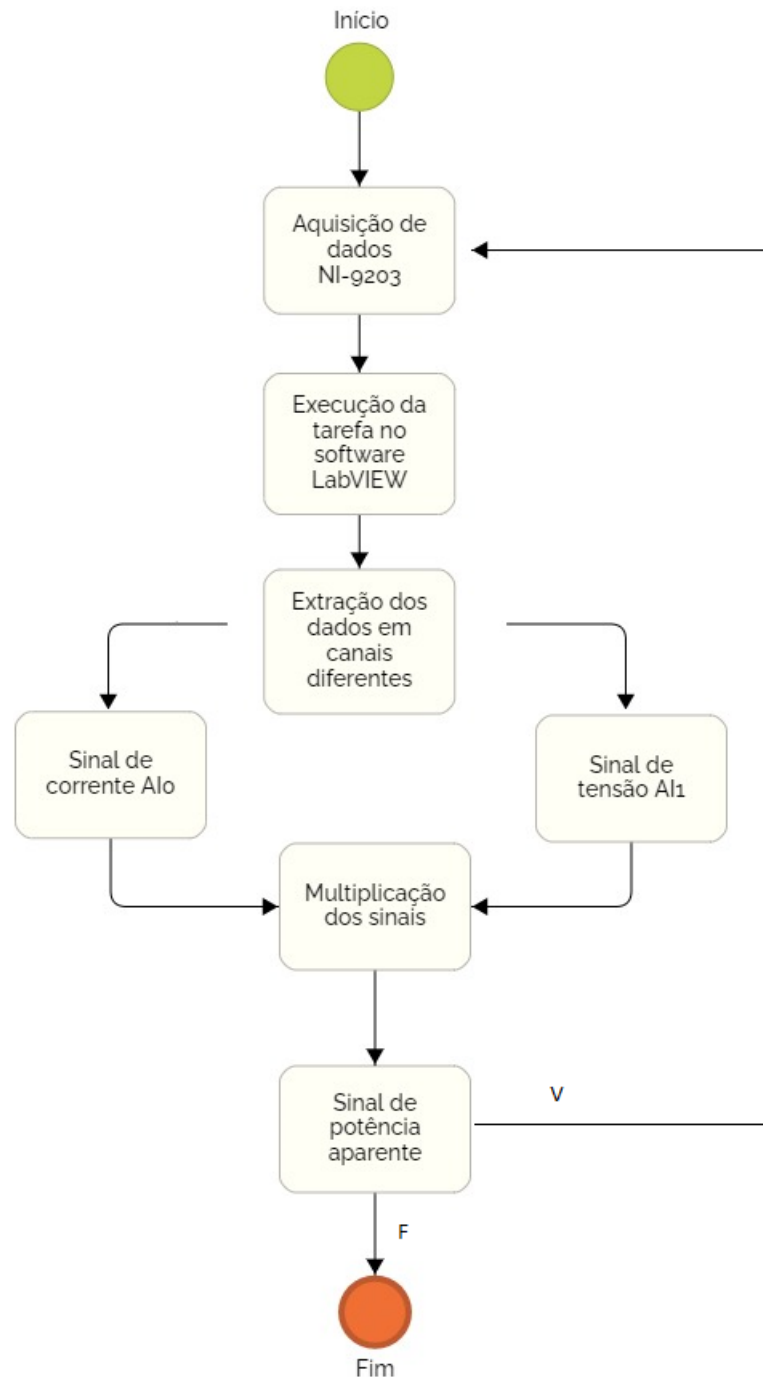
$$y = 26530x - 106,08 \quad (3.1)$$

No *DAQ Assistant*, foi inserida a Equação 3.1 para a correção da escala que estava no sistema. Após a correção, o modo de aquisição em que os dados foram submetidos foi selecionado como amostra contínua, para que não houvesse nenhuma interrupção no fluxo de dados das amostras, que foi programado para realizar a leitura de um dado por vez. Por fim, a taxa de aquisição foi selecionada com valor igual a 5. Após confirmar a calibração, a entrada AIO do NI 9203 estava apta a começar a aquisição de dados.

### **3.2.7 Interface LabVIEW®**

O código desenvolvido na plataforma virtual LabVIEW® é esquematizado na Figura 3.19.

Figura 3.19 – Interface virtual desenvolvida para aquisição e monitoramento de sinais



Fonte: Do autor (2022)

Após a aquisição de dados via NI-9203, no software LabVIEW®, os dados adquiridos são executados pelo DAQ Assistant Express, com uma taxa de aquisição de 5 ms para cada dado adquirido. Esses dados foram encaminhados para uma extração de sinais, que os organiza na mesma ordem em que foram adquiridos. Logo, os dados referentes ao sinal de corrente foram apresentados por um indicador numérico, e os dados que foram referentes à tensão foram multiplicados por 26530 e subtraídos de 106,08, para que fosse realizada a conversão do sinal

de corrente para tensão. Após esse processo, o sinal de tensão também foi apresentado por um indicador numérico para averiguação. Os sinais de tensão e corrente foram multiplicados dentro de um SubVI, e de seu produto derivou-se a potência aparente. Os dados foram apresentados em forma gráfica após esses procedimentos. Se o processo de aquisição de dados fosse verdadeira, chegaria ao fim; caso fosse falsa, o sistema repetiria todos os procedimentos até que a condição fosse atendida.

### 3.2.8 Escolha das faixas de rotação do motor elétrico

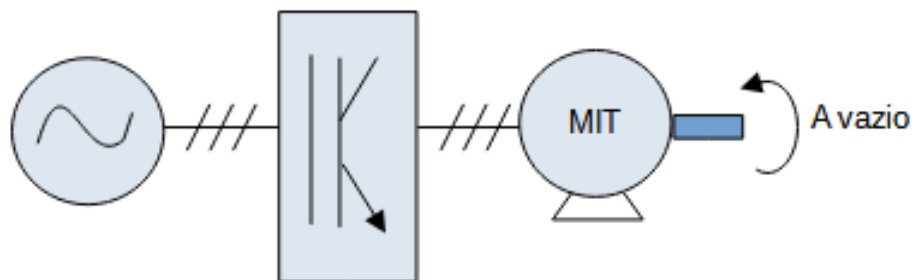
Para desenvolvimento e simulação deste projeto, foram adotadas as velocidades de 1200 rpm, 1500 rpm e 1800 rpm, devido às especificações técnicas cedidas pelos manuais de instruções do motor trifásico e do inversor de frequência, não podendo ultrapassar o limite de velocidade dos equipamentos, durante o processo de manufatura determinados para este experimento.

### 3.2.9 Simulações

#### Ensaio 1: Motor girando a vazio

Partindo da necessidade do monitoramento dos sinais elétricos, primeiramente lugar houve o acionamento do motor trifásico de indução (MIT) por intermédio do inversor de frequência, após esse acionamento, o motor passou a trabalhar em vazio, ou seja, sem qualquer elemento de incremento de atrito com velocidade de 90 rpm. A Figura 3.20 representa um esquema resumido do primeiro ensaio.

Figura 3.20 – Esquema resumido do primeiro ensaio



Fonte: Do autor (2022)

Em seguida, foi ajustada a fonte de alimentação em 10 V e 20 mA, para alimentar eletricamente os conversores de sinais na placa NI 9203. Após o acionamento do motor, os

sinais de tensão captados do inversor de frequência são encaminhados aos conversores de sinais, que foram alimentados pela fonte, sendo os sinais convertidos em corrente elétrica. Em seguida, os sinais de corrente conectados ao NI-9203 foram adquiridos pelo notebook, por onde ocorreu o controle e monitoramento dos dados referentes ao experimento.

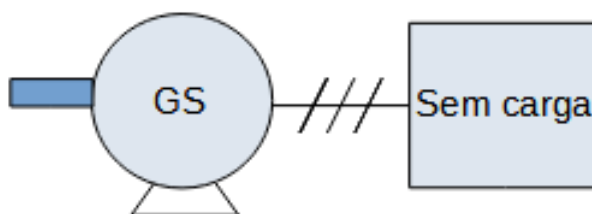
Logo, o código desenvolvido foi averiguado e preparado para o monitoramento dos sinais elétricos, sendo os conversores calibrados de acordo com o procedimento descrito no tópico 3.2.6. Com esses procedimentos preliminares, a velocidade do motor foi desenvolvida para o patamar de 1200 rpm e ocorreu o acionamento do início da simulação via LabVIEW®. Durante a simulação, foram coletados no inversor de frequência os valores de tensão de trabalho do motor, a corrente, o torque e potência de saída.

Logo após esse recolhimento, a simulação foi interrompida e a velocidade de trabalho do motor foi ajustada para 1500 rpm, repetindo processo que foi realizado em 1200 rpm para a coleta de dados. Da mesma forma, o plano de coleta de dados para a rotação em 1800 rpm foi adotado.

### **Ensaio 2: Motor girando com atrito**

Para realização desta, etapa houve uma alteração em relação à condição de trabalho do motor. Por intermédio de um acoplamento flexível ao gerador síncrono (GS), o motor transmitiu rotação e torque, simulando o começo do trabalho de um centro de usinagem, como representado na Figura 3.21.

Figura 3.21 – Esquema resumido do segundo ensaio



Fonte: Do autor (2022)

A geração de atrito dinâmico ocorreu pelo contato dos eixos das máquinas rotativas, e com a transmissão de rotação e torque do motor para o gerador síncrono, houve uma reação à propagação de força aumentando o atrito dinâmico gerado entre os dois equipamentos, que foi transmitido ao eixo do motor de indução trifásico, sendo também considerado o escorregamento

do motor de indução trifásico em contato com o escorregamento do gerador síncrono, formando o coeficiente de atrito.

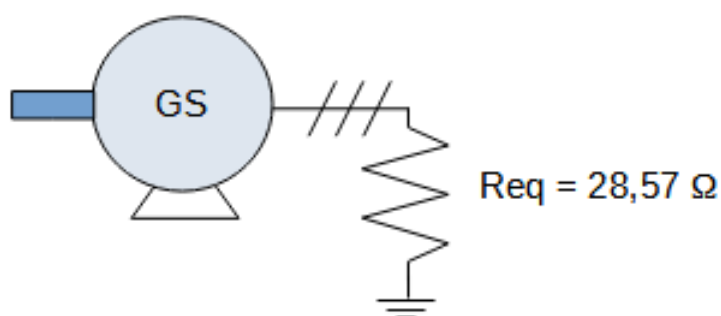
Por intermédio de um disjuntor, foi realizado o acionamento do gerador síncrono (GS), que foi acoplado ao eixo mecânico do motor de indução trifásico (MIT), que esteve conectado ao inversor de frequência e o restante das conexões foi semelhante ao ensaio anterior.

Após o acoplamento do motor de indução trifásico com o gerador síncrono trifásico, foram reiniciados todos os procedimentos do experimento anterior com os mesmos patamares de velocidade de 1200 rpm, 1500 rpm e 1800 rpm. Ao final deste experimento, novamente o inversor de frequência, a fonte de alimentação e o NI 9203 foram desconectados para a composição da bancada do próximo ensaio.

### Ensaio 3: Motor girando com carga resistiva

Valendo-se do acoplamento do experimento anterior, neste experimento houve a necessidade de conectar um banco de resistência juntamente com o gerador síncrono, que tem como função, por meio do valor de resistência elétrica equivalente, dificultar o fluxo de corrente, gerando uma carga mecânica no eixo do gerador que transmite esta carga e o atrito já existente ao motor de indução trifásico, como representado na Figura 3.22.

Figura 3.22 – Esquema resumido do terceiro ensaio



Fonte: Do autor (2022)

Essa composição simula o comportamento de um motor durante o ciclo de trabalho de um centro de usinagem, de acordo com a escolha das faixas de rotação do motor elétrico citada no subtópico 3.2.8, sendo que, para realizar esses ensaios, foram necessários todos os procedimentos de conexão das etapas anteriores, como o acionamento do inversor de frequência, excitação dos conversores de sinais e conexão via USB do NI-9203.

### 3.2.10 Delineamento experimental

Na realização de uma análise estatística dos dados monitorados e coletados pela plataforma virtual LabVIEW®, foi utilizado o método de Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC).

Considerado o mais simples dos delineamentos experimentais, os experimentos enquadrados a esse delineamento são denominados experimentos inteiramente casualizados, frequentemente, é o método mais utilizado em experimentos de laboratório, destacando-se pela sua simplicidade e flexibilidade, visto que o número de repetições e tratamentos são igualmente repetidos, com a possibilidade de maiores índices de graus de liberdade (BANZATTO; KRONKA, 2006).

Para início do planejamento desta etapa, foi realizado cálculo amostral, representado na Equação 3.2.

$$n = \frac{[z^2 * p(p - 1)]}{e^2} \quad (3.2)$$

Em que:

n = tamanho da amostra

z = grau de confiança em desvios padrões;

e = margem de erro escolhida;

p = constante igual a 0,5.

Considerando número de 301 amostras definido para os três tipos de tratamentos referentes a cada experimento, foi estimado o número de dez repetições para cada conjunto amostral. Assim, constituiu-se um conjunto de 2709 dados para a população, com relação às características em estudo.

Os tipos de tratamentos delineados nesta pesquisa foram: motor rotacionando a vazio como descrito no Ensaio 1; com um atrito em seu eixo como descrito no Ensaio 2; e o motor rotacionando com um peso mecânico gerado pela carga resistiva, como descrito no Ensaio 3. Para as amostras coletadas, usou-se a Equação 3.3 para determinar a margem de erro.

$$E_m \approx \frac{1,29}{\sqrt{n}} \quad (3.3)$$

Em que:

$E_m$  = Margem de erro

$n$  = tamanho da amostra

A margem de erro encontrada foi aproximadamente 7,43 %. Além disso, as amostras dos sinais elétricos adquiridos passaram por uma análise estatística, em que foi utilizada a técnica dos mínimos quadrados para obtenção de melhores resultados do projeto.

## 4 RESULTADO E DISCUSSÕES

Nesta secção, são discutidos os resultados obtidos no experimento. São apresentados sistematicamente os resultados estatísticos e, posteriormente, a sua discussão, com o objetivo de relacioná-los com os fenômenos físicos elétricos.

### 4.1 Teste de significância estatística

Realizou-se a leitura dos sinais de tensão, corrente e potência, e esses foram definidos como as variáveis dependentes do experimento, e como variáveis independentes, foram o torque, rotações e coeficiente de atrito.

Incluído ao teste de significância, houve a observação dos coeficientes relacionados ao teste, como o grau de liberdade (DF), a soma dos quadrados ajustada (SS) como uma medida de variação, os quadrados médios (MS), medindo quanto a variação o modelo explica, a significância global (F), comparando um modelo sem preditores com o modelo definido para este projeto, e o valor p, como nível de significância, para melhor interpretação dos dados.

Foram realizadas a análise de variância a 5% de significância para o sinal de tensão, corrente e potência (TABELA 4.1), em que todas as variáveis-resposta apresentaram diferença estatística ( $p < 0,05$ ) (MONTGOMERY, 2012), indicando uma associação entre as variáveis-resposta com as variáveis independentes.

Tabela 4.1 – Análise de variância para tensão

	Tensão				
	DF	SS	MS	F	P
Regressão	3	6.1852	2.0617	159.42	0,000
Erro residual	77	0.9958	0.0129		
Total	80	7.1810			
	Corrente				
	DF	SS	MS	F	P
Regressão	3	682.79	227.60	201.30	0,000
Erro residual	77	87.06	1.13		
Total	80	769.85			
	Potência				
	DF	SS	MS	F	P
Regressão	3	1068.23	356.08	63.38	0,000
Erro residual	77	432.62	5.62		
Total	80	1500.86			

Teste de variância a 5% de probabilidade

Fonte: Do autor (2022)

Esses resultados indicam que pelo menos uma variável independente causou efeito significativo nos sinais de tensão, corrente e potência. E para uma investigação mais detalhada, com o objetivo de determinar os efeitos dos tratamentos nas variáveis analisadas, foi realizado o teste de significância para regressão linear das variáveis dependentes, em função das variáveis independentes.

## 4.2 Análise de regressão linear

A fim de esclarecer a interação entre as variáveis dependentes: tensão, corrente e potência, com as variáveis independentes: torque, rpm e coeficiente de atrito, a análise por meio da regressão linear teve como objetivo determinar o ajuste do modelo ao conjunto de dados, coletados dos tratamentos da metodologia proposta.

Anexada à análise de regressão linear, houve a observação dos coeficientes relacionados a esse tipo de análise, como o coeficiente de regressão (COEF), que descreve o tamanho e a direção da relação entre o preditor e a variável- resposta; o erro padrão (SE COEF) do coeficiente, que estimou a variabilidade entre as estimativas do coeficiente; o valor t mediu a razão entre o coeficiente e seu erro padrão global; e o valor p como nível de significância, para melhor interpretação dos dados.

### Tensão elétrica em função do torque, velocidade e força de atrito

No teste de regressão linear para o sinal de tensão, houve significância estatística para os fatores torque e rpm; já para o fator atrito, não houve significância, como representado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Análise de regressão linear para tensão

Preditor	COEF	SE COEF	T	P
Constante	-1.00279	0.08553	-11.72	0.000
Torque	0.023363	0.001548	15.10	0.000
RPM	0.00081537	0.00005159	15.81	0.000
Atrito	0,004978	0.006928	0.72	0.475

Fonte: Do autor (2022)

Os resultados mostraram que dois preditores foram significantes devido aos seus valores  $p < 0,05$ , indicando que os fatores torque e rpm influenciaram significativamente no sinal de tensão. O coeficiente de determinação da equação de regressão  $R^2$  foi de 86.1%.

Para cada unidade de aumento do torque e rpm, o percentual de variação da tensão aumentou em 0.023363 e 0.00081537, respectivamente, conforme a Equação de regressão 4.1:

$$V = -1.00 + 0.0234T + 0.000815n + 0.00497\mu \quad (4.1)$$

Em que:

V = Tensão (V)

T = Torque (Nm)

n = Rotações por minuto (rpm)

$\mu$  = Atrito

### **Corrente elétrica em função do torque, velocidade e força de atrito**

Para a corrente elétrica, o teste de regressão linear apresentou comportamento semelhante para a tensão elétrica, na qual houve significância estatística para os fatores torque e rpm, e não para o fator atrito, conforme a Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Análise de regressão linear para corrente

Preditor	COEF	SE COEF	T	P
Constante	-7.1740	0.7997	-8.97	0.000
Torque	0.29500	0.01447	20.39	0.000
RPM	0.0066130	0.0004823	13.71	0.000
Atrito	0.03466	0.06478	0.54	0.594

Fonte: Do autor (2022)

Os resultados mostraram que dois preditores foram significantes devido aos seus valores  $p < 0,05$  indicando que os fatores torque e rpm influenciaram significativamente no sinal de corrente elétrica; o coeficiente de determinação da equação de regressão  $R^2$  foi de 88.7%.

Para cada unidade de aumento do torque e rpm, o percentual de variação da corrente aumentou em 0.29500 e 0.0066130, respectivamente, conforme a Equação de regressão 4.2:

$$I = -7.17 + 0.295T + 0.00661n + 0.0347\mu \quad (4.2)$$

Em que:

I = Corrente (A)

T = Torque (Nm)

n = Rotações por minuto (rpm)

$\mu$  = Atrito

### Potência em função do torque, velocidade e força de atrito

O teste de regressão linear aplicada ao sinal de potência apresentou-se estatisticamente significativo para os fatores de torque e rpm; entretanto, não significativo para o atrito, conforme a Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Análise de regressão linear para potência

Preditor	COEF	SE COEF	T	P
Constante	-14.524	1.783	-8.15	0.000
Torque	0.33548	0.03226	10.40	0.000
RPM	0.009724	0.001075	9.04	0.000
Atrito	0.0582	0.1444	0.40	0.688

Fonte: Do autor (2022)

Os resultados mostraram que dois preditores foram significantes devido aos seus valores  $p < 0,05$ , indicando que os fatores torque e rpm influenciaram significativamente no sinal de potência; o coeficiente de determinação da equação de regressão  $R^2$  foi de 71.2%.

Para cada unidade de aumento do torque e rpm, o percentual de variação da potência aumentou em 0.33548 e 0.009724, respectivamente, conforme a equação de regressão 4.3:

$$P = -14.5 + 0.335T + 0.00972n + 0.058\mu \quad (4.3)$$

Em que:

P = Potência (VA)

T = Torque (Nm)

n = Rotações por minuto (rpm)

$\mu$  = Atrito

Na análise de regressão linear, houve uma semelhança na significância dos preditores na equação, na qual para as três variáveis-resposta; tensão elétrica, corrente elétrica e potência, foram significativos os tratamentos torque e rpm e não significativo o coeficiente de atrito. Infere-se que essa semelhança nos resultados é pelo fato de às variáveis-resposta serem relacionadas entre si; então, o efeito dos preditores terão magnitude aproximada em todas as variáveis respostas.

Em relação aos efeitos dos preditores nos sinais de tensão elétrica, corrente elétrica e potência, a combinação de torque e rpm teve influência significativa. Infere-se que, com o sim-

Com o aumento do rpm do motor, controlado pelo inversor de frequência, haveria o aumento da demanda de tensão e corrente elétrica e, conseqüentemente, o aumento da potência fornecida ao motor. E com o aumento do torque solicitado, e para manter a velocidade de rotação definida nos tratamentos, os valores de tensão elétrica, corrente elétrica e, conseqüentemente, potência, fornecidos ao motor, aumentaram conforme o aumento do torque solicitado. Essa hipótese é reforçada pela análise das equações de regressão 4.1, 4.2 e 4.3; em que com o aumento da unidade de torque e rpm, há uma variação positiva nos valores de tensão, corrente e, conseqüentemente potência, que foram fornecidas ao motor.

Foram avaliados os picos de consumo de potência elétrica na aceleração do eixo de fresagem por meio de um motor trifásico, nas acelerações de 1000, 2000, 3000, 4000 e 5000 rpm, e foi constatado que o consumo de potência foi acrescido conforme houve o aumento do rpm, mesmo após a estabilização da velocidade do eixo. A plataforma de coleta de dados foi constituída de sensores de tensão (LEM LV25-P), sensores de corrente (LEM LA55-P), cartões de coleta de dados NI-9215, uma placa COMPACT DAQ e uma interface de software LabVIEW® (PAWAR; BERA; SANGWAN, 2022)

Lv et al. (2016), no estudo para a diminuição do gasto em energia elétrica, avaliaram o pico de potência em um torno CNC combinando diferentes tipos de transmissão, e constataram maior potência consumida pelo motor, nas maiores rotações. A potência da máquina-ferramenta foi medida usando a configuração experimental composta de transdutores de tensão, transdutores de corrente, placa de aquisição de dados, hardware e software da NI LabVIEW®.

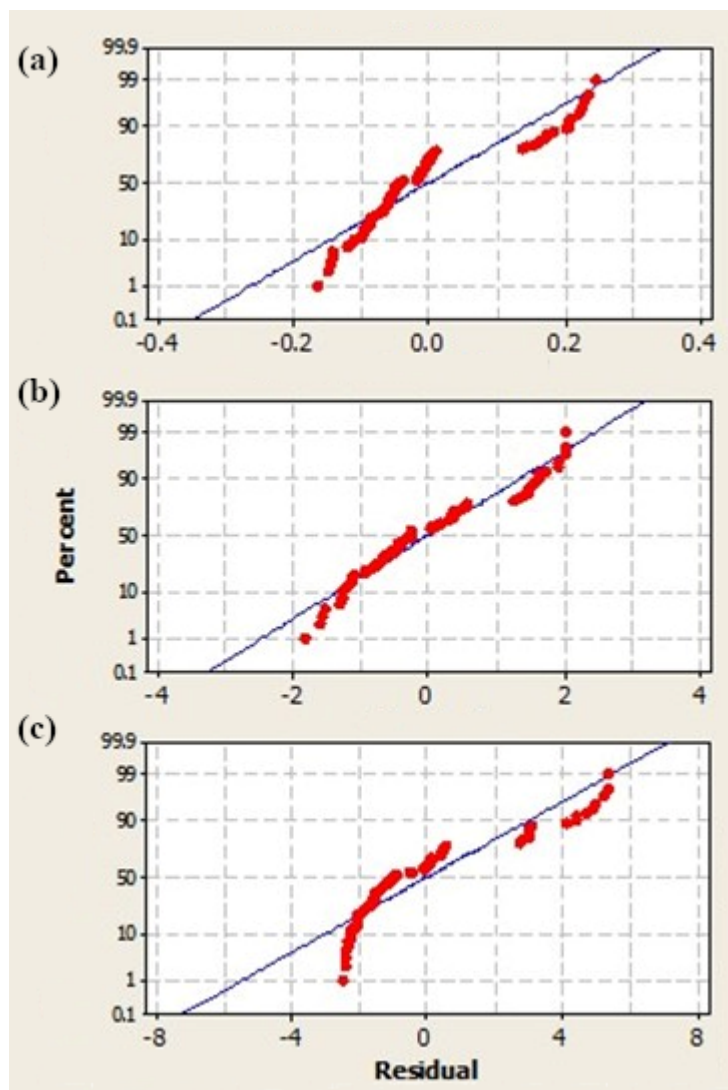
Esses resultados corroboram com os encontrados neste trabalho, em que com o aumento do rpm, também houve o aumento da potência consumida pelo motor e, conseqüentemente, aumento nos sinais de tensão e corrente elétrica.

Para o preditor coeficiente de atrito, o não efeito significativo, pode-se supor que com os valores definidos como tratamento, não foi o suficiente para gerar uma carga para o motor que necessitasse de um aumento significativo nos valores das variáveis dependentes.

#### **Análise de normalidade dos dados**

No gráfico de probabilidade normal de resíduos (FIGURA 4.1), com uma curva S invertida e a distribuição com caudas curtas, sugere uma não distribuição normal dos dados de tensão elétrica, corrente elétrica e potência.

Figura 4.1 – Probabilidade normal de resíduos: tensão elétrica (a), corrente elétrica (b), potência (c).



Fonte: Do autor (2022)

Para as três variáveis estudadas, os gráficos indicam que a distribuição dos dados não é normal; em uma percepção superficial, leva a concluir que houve algum problema com a coleta de dados; entretanto, como os valores coletados também são dependentes da característica da rede de distribuição elétrica, e seus valores de tensão, em condições ideais é fixo, então a não distribuição normal indica a coerência na coleta de dados, uma vez que esses valores tendem a se manter fixos, oscilando somente quando há uma instabilidade na rede ou mudança nas condições de trabalho nos equipamentos que estão ligados a ela.

## 5 CONCLUSÃO

Com foco na aquisição de dados de sinais de tensão e corrente em máquinas operatrizes por meio da plataforma virtual LabVIEW, destaca-se a relevância do uso das tecnologias voltadas para o estudo de motores elétricos aplicados às máquinas-ferramenta. Assim, este trabalho visou a desenvolver uma interface homem-máquina por intermédio de um algoritmo capaz de adquirir os sinais elétricos de um motor de indução trifásico.

Com o uso de três velocidades distintas utilizadas nas simulações deste estudo, nota-se que, a partir do momento em que o motor recebeu atrito em seu eixo em relação de seu funcionamento rotacionando a vazio, há uma variação crescente dos sinais elétricos em estudo, pois, à medida que aumenta a velocidade do motor com atrito em seu eixo via inversor de frequência, os sinais de tensão, corrente e conseqüentemente a potência tendem a aumentar devido à crescente solicitação de energia elétrica realizada pelo motor de indução trifásico. E para os sinais que além do atrito em seu eixo receberam uma carga mecânica, também existe uma variação positiva em relação às outras duas situações em que o motor é submetido a trabalho, havendo uma maior variação dos sinais elétricos comparados com as situações anteriores devido à maior solicitação de energia oriunda da rede.

Com a aplicação da análise de variância e regressão linear, constata-se que os dados possuem uma significância estatística ( $p < 0,05$ ) para os fatores torque e rpm, havendo uma variação de 7.1810, 769.85 e 1500.86 para tensão, corrente e potência, respectivamente; na análise de variância e para a análise de regressão linear, as porcentagens de variação na resposta foram de 86.1% para tensão elétrica, 88.7% para corrente elétrica e 71.2% para potência elétrica, sendo que quanto maior a porcentagem de variação, melhor o modelo escolhido se ajusta aos dados. E para a análise de normalidade, os dados não são normais devido à característica da rede elétrica, o que indica a coerência da coleta de dados ao decorrer da execução do experimento.

Nas análises dos dados, constata-se que as variações dos sinais elétricos no funcionamento de um motor de indução trifásico, submetidos a diferentes condições de trabalho, correspondem à realidade; portanto, conclui-se que a plataforma virtual desenvolvida no LabVIEW® foi capaz de monitorar e coletar as variações de sinais de tensão e corrente, alcançando, assim, o objetivo proposto neste trabalho.

## **6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS**

Aconselha-se para estudos futuros aplicar este experimento em máquinas operatrizes reais para dar continuidade a esta pesquisa, de uma maneira que o monitoramento possa ser feito além da interface de programação já utilizada neste trabalho, a fim de realizar o monitoramento dos sinais elétricos via LabVIEW®), e esses sinais serão enviados para o celular ou smartwatch do operador, podendo ter a oportunidade de lograr comportamentos diversos dos sinais elétricos em diferentes equipamentos que poderão ser trabalhados, podendo auxiliar em possíveis auditorias relacionadas ao processo de melhoria contínua.

## REFERÊNCIAS

- ABBASS, J. K.; AL-HABAIBEH, A. A comparative study of using spindle motor power and eddy current for the detection of tool conditions in milling processes. In: **2015 IEEE 13th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 766–770. ISSN 2378-363X.
- AL-SULAIMAN, F. A.; BASEER, M. A.; SHEIKH, A. K. Use of electrical power for online monitoring of tool condition. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 166, n. 3, p. 364–371, 2005. ISSN 0924-0136. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013604009884>>.
- ALTINTAS, R. S.; KAHYA, M.; ÜNVER, H. Ö. Modelling and optimization of energy consumption for feature based milling. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 86, n. 9-12, p. 3345–3363, 2016. ISSN 14333015.
- ALTINTAS, Y. Prediction of Cutting Forces and Tool Breakage in Milling from Feed Drive Current Measurements. **Journal of Engineering for Industry**, v. 114, n. 4, p. 386–392, 11 1992. ISSN 0022-0817. Disponível em: <<https://doi.org/10.1115/1.2900688>>.
- ALTINTAS, Y.; ASLAN, D. Integration of virtual and on-line machining process control and monitoring. **CIRP Annals**, v. 66, n. 1, p. 349–352, 2017. ISSN 0007-8506. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850617300471>>.
- ALTINTAS, Y. et al. Machine tool feed drives. **CIRP Annals**, v. 60, n. 2, p. 779–796, 2011. ISSN 0007-8506. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850611002125>>.
- AMBHORE, N. et al. Tool condition monitoring system: A review. **Materials Today: Proceedings**, Elsevier Ltd., v. 2, n. 4-5, p. 3419–3428, 2015. ISSN 22147853.
- ANDERSON, P.; FOUAD, A. **Power System Control and Stability**. 2nd. ed a john wiley sons inc. publication. ed. San Diego, Colorado: [s.n.], 2003. 672 p. ISBN 9780471238621.
- ASLAN, D.; ALTINTAS, Y. Prediction of cutting forces in five-axis milling using feed drive current measurements. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, v. 23, n. 2, p. 833–844, April 2018. ISSN 1941-014X.
- AXINTE, D.; GINDY, N. Assessment of the effectiveness of a spindle power signal for tool condition monitoring in machining processes. **International Journal of Production Research**, Taylor Francis, v. 42, n. 13, p. 2679–2691, 2004. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/00207540410001671642>>.
- BAL, B. C.; GÜNDEŞ, Z. Surface roughness of medium-density fiberboard processed with CNC machine. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, Elsevier Ltd, v. 153, p. 107421, 2020. ISSN 02632241. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107421>>.
- BANERJEE, S. et al. An investigation on reduction of cutting energy consumption using high efficiency machining strategy. **Procedia CIRP**, v. 105, p. 198–203, 2022. ISSN 2212-8271. The 29th CIRP Conference on Life Cycle Engineering, April 4 – 6, 2022, Leuven, Belgium. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827122000336>>.

BANZATTO, D.; KRONKA, S. **Experimentação agrícola**. 4th. ed fundação de apoio a pesquisa, ensino e extensão - funep.. ed. Jaboticabal, SP: [s.n.], 2006. ISBN 85-87632-71-X.

BHAGAT, S. N.; NALBALWAR, S. L. Labview based tool condition monitoring and control for cnc lathe based on parameter analysis. In: **2016 IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information Communication Technology (RTEICT)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1386–1388.

CAI, W. et al. A review on methods of energy performance improvement towards sustainable manufacturing from perspectives of energy monitoring, evaluation, optimization and benchmarking. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 159, p. 112227, 2022. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032122001502>>.

CAO, H.; ZHANG, X.; CHEN, X. The concept and progress of intelligent spindles: A review. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 112, p. 21–52, 2017. ISSN 0890-6955. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695516303911>>.

CHUANG, H.-C.; LI, G.-D.; LEE, C.-T. The efficiency improvement of ac induction motor with constant frequency technology. **Energy**, v. 174, p. 805–813, 2019. ISSN 0360-5442. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544219304232>>.

COSTA, J. N. d. A. et al. New formula proposal for the determination of variable speed pumps efficiency. **Rbrh**, v. 23, n. 0, 2018. ISSN 1414-381X.

CUPPINI, D.; D'ERRICO, G.; RUTELLI, G. Tool wear monitoring based on cutting power measurement. **Wear**, v. 139, n. 2, p. 303–311, 1990. ISSN 0043-1648. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/004316489090052C>>.

DENKENA, B. et al. Analysis and control/monitoring of the direct linear drive in end milling. **International Journal of Production Research**, Taylor Francis, v. 42, n. 24, p. 5149–5166, 2004. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/00207540412331299611>>.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. [S.l.]: Editora Edgard Blucher LTDA, 1977. v. 1. 751 p. ISBN 85-212-0257-1.

FILHO, J. M. **Instalações Elétricas**. 8ª edição. ed. São Paulo: [s.n.], 2013. ISBN 97885216184301.

FRACARO, J. **Fabricação pelo processo de usinagem e meios de controle**. 1st. ed intersaberes. ed. Rio de Janeiro,RJ: [s.n.], 2017. ISBN 9788559724899.

FRANCHI, C. M. **Acionamentos elétricos**. 4nd. ed editora Érica. ed. São Paulo: [s.n.], 2007. 255 p. ISBN 9788536501499.

FRANCHI, C. M. **Inversores de frequência: Teoria e aplicações**. 2st. ed editora Érica. ed. São Paulo: [s.n.], 2009. 193 p. ISBN 9788536502106.

GALORI, K. S.; SOUZA, R. D. de; GODOI, L. A. A. de. INVERSOR DE FREQUÊNCIA COM ACIONAMENTO DE MOTOR. **Revista Inovação, Tecnologia e Sustentabilidade na Engenharia Elétrica**, v. 1, n. 1, p. 203–224, 2018.

GHANI, U.; MONFARED, R. P.; HARRISON, R. Energy optimisation in manufacturing systems using virtual engineering-driven discrete event simulation. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 226, n. 11, p. 1914–1929, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/0954405412458625>>.

GHOBAKHLOO, M. Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. **Journal of Cleaner Production**, v. 252, p. 119869, 2020. ISSN 0959-6526. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619347390>>.

GIANDOMENICO, N. et al. Smart generator for micro-edm-milling. **Procedia CIRP**, v. 68, p. 813–818, 2018. ISSN 2212-8271. 19th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining, 23-27 April 2017, Bilbao, Spain. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827117311034>>.

GOKULACHANDRAN, J.; REDDY, B. B. K. A study on the usage of current signature for tool condition monitoring of drill bit. **Materials Today: Proceedings**, v. 46, p. 4532–4536, 2021. ISSN 2214-7853. International Conference on Advances in Materials and Manufacturing Applications. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320374216>>.

GOODALL, P.; PANTAZIS, D.; WEST, A. A cyber physical system for tool condition monitoring using electrical power and a mechanistic model. **Computers in Industry**, v. 118, p. 103223, 2020. ISSN 0166-3615. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361519306591>>.

GRIGORIEV, S. N.; MARTINOV, G. M. The control platform for decomposition and synthesis of specialized cnc systems. **Procedia CIRP**, v. 41, p. 858–863, 2016. ISSN 2212-8271. Research and Innovation in Manufacturing: Key Enabling Technologies for the Factories of the Future - Proceedings of the 48th CIRP Conference on Manufacturing Systems. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827115008793>>.

HU, S. et al. An on-line approach for energy efficiency monitoring of machine tools. **Journal of Cleaner Production**, v. 27, p. 133–140, 2012. ISSN 0959-6526. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965261200025X>>.

HUSSEIN, S. H.; AL-RAWE, M. A. A. Real time speed control of the dc motor in labview. In: **2020 7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE)**. [S.l.: s.n.], 2020. p. 137–141.

HUSSIN, Z. M.; CHENG, K.; HUO, D. - on-line modal identification of a cnc machining system based on surface roughness laser scattering: theoretical perspectives. In: PHAM, D.; ELDUKHRI, E.; SOROKA, A. (Ed.). **Intelligent Production Machines and Systems**. Oxford: Elsevier Science Ltd, 2006. p. 191–197. ISBN 978-0-08-045157-2. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080451572500389>>.

JAEN-CUELLAR, A. Y. et al. System for tool-wear condition monitoring in cnc machines under variations of cutting parameter based on fusion stray flux-current processing. **Sensors**, v. 21, n. 24, 2021. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/21/24/8431>>.

JÖNSSON, A.; WALL, J.; BROMAN, G. A virtual machine concept for real-time simulation of machine tool dynamics. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 45, n. 7, p. 795–801, 2005. ISSN 0890-6955. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695504002986>>.

KARAVASILIS, R. G. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, **Estudo de motores acionados por conversores de frequência e influências no sistema isolante**. Universidade Federal de Santa Catarina: [s.n.], 2008. 148 p.

KIM, H. et al. Real-time drill wear estimation based on spindle motor power. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 124, n. 3, p. 267–273, 2002. ISSN 0924-0136. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013602001115>>.

KIM, M.; BALOG, R. S. Thd analysis for a high frequency link scr based pwm inverter. p. 1–6, 2018.

KLOCKE, F. et al. Computer-based monitoring of the polishing processes using labview. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, n. 20, p. 6039–6047, 2009. ISSN 0924-0136. Special Issue: 1st International Conference on Abrasive Processes. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013609003045>>.

LENZ, M. L. et al. **Acionamentos elétricos**. 1st. ed sagah. ed. Porto Alegre,RS: [s.n.], 2019. ISBN 9788533500235.

LI, B. et al. Trajectory smoothing method using reinforcement learning for computer numerical control machine tools. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 61, n. May 2019, 2020. ISSN 07365845.

LOTTI, G. et al. New trends in the design of human-machine interaction for CNC machines. **IFAC-PapersOnLine**, Elsevier Ltd, v. 52, n. 19, p. 31–36, 2019. ISSN 24058963. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.080>>.

LU, X. et al. Measurement and prediction of vibration displacement in micro-milling of nickel-based superalloy. **Measurement**, v. 145, p. 254–263, 2019. ISSN 0263-2241. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224119305391>>.

LU, Z.; WANG, M.; DAI, W. A condition monitoring approach for machining process based on control chart pattern recognition with dynamically-sized observation windows. **Computers Industrial Engineering**, v. 142, p. 106360, 2020. ISSN 0360-8352. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835220300942>>.

LUMI, P. et al. Proceso, complejidad y calidad: comparación entre objetos similares producidos por diferentes tecnologías de Prototipado Rápido Process, complexity and quality: comparison between similar objects produced by different Rapid Prototyping technologies Proces. p. 50–56, 2018.

LV, J.; TANG, R.; JIA, S. Therblig-based energy supply modeling of computer numerical control machine tools. **Journal of Cleaner Production**, v. 65, p. 168–177, 2014. ISSN 0959-6526. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652613006872>>.

LV, J. et al. Experimental study on energy consumption of computer numerical control machine tools. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 3864–3874, 2016. ISSN 0959-6526. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652615009294>>.

LV, J. et al. An investigation into reducing the spindle acceleration energy consumption of machine tools. **Journal of Cleaner Production**, v. 143, p. 794–803, 2017. ISSN 0959-6526. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965261632100X>>.

MACHADO, A. R. et al. **Teoria da usinagem dos metais**. 1st. ed edgar blusher ltda. ed. São Paulo, SP: [s.n.], 2009. ISBN 9788521204527.

MARANHAO, C.; SILVA, L. R.; DAVIM, J. P. Comportamento termo mecânico no micro-torneamento ortogonal do aço aisi 1045 (ck45 - din): Simulação via elementos finitos e validação experimental. **Ciência Tecnologia dos Materiais**, v. 25, n. 1, p. 57–66, 2013. ISSN 0870-8312. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0870831213000074>>.

MASTERS, B. et al. Design and manufacture of a microchannel plasma reactor by cnc milling. **Microelectronic Engineering**, v. 136, p. 51–56, 2015. ISSN 0167-9317. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167931715001719>>.

MELICHAR, M.; KUTLWAŠER, J. The issue of contactless setup before measuring process. **Procedia Engineering**, v. 69, p. 1088–1093, 2014. ISSN 1877-7058. 24th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814003415>>.

MOHANRAJ, T. et al. Tool condition monitoring techniques in milling process — a review. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 1, p. 1032–1042, 2020. ISSN 2238-7854. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785418313061>>.

MONTEIRO, C. et al. Improving the machining process of the metalwork industry by upgrading operative sequences, standard manufacturing times and production procedure changes. **Procedia Manufacturing**, v. 38, p. 1713–1722, 2019. ISSN 2351-9789. 29th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing ( FAIM 2019), June 24-28, 2019, Limerick, Ireland, Beyond Industry 4.0: Industrial Advances, Engineering Education and Intelligent Manufacturing. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978920301074>>.

MONTGOMERY, D. **Desing and Analysis of Experiments**. 8th. ed john wiley sons, inc.. ed. Arizona State University: [s.n.], 2012. ISBN 9781118146927.

MORCOS MM E LAKSHMIKANTH, A. Dsp-based solutions for ac motor drives. **IEEE Power Engineering Review**, v. 19, n. 9, p. 57–59, 1999.

NASCIMENTO, C. H. **Estudo do erro de posicionamento do eixo X em função da temperatura de um centro de usinagem**. 104 p. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Área de Concentração em Processos e Gestão de Operações), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2015.

NATIONAL INSTRUMENTS. "**What is LabVIEW?**". 2021. Disponível em: <<https://www.ni.com/pt-br/shop/labview.html>>. Acesso em: 09 fev.2021.

NEKOEI, F.; KAVIAN, Y. S.; STROBEL, O. Fpga-based speed control of three-phase induction motor. **International Journal of Electronic Engineering Research**, v. 3, n. 2, p. 265–277, 2011. ISSN 0975 - 6450. Disponível em: <<http://www.ripublication.com/ijeer.htm>>.

NTEMI, M. et al. Infrastructure monitoring and quality diagnosis in cnc machining: A review. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 38, p. 631–649, 2022. ISSN 1755-5817. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1755581722001079>>.

OLIVEIRA, O. C. d. Departamento de Engenharia Elétrica, **Desacoplamento de um gerador síncrono através de um controle adaptativo por modelo de referência baseado em funções de base radial**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte: [s.n.], 2011. 86 p.

PAWAR, S. S.; BERA, T. C.; SANGWAN, K. S. Modelling of spindle energy consumption in cnc milling. **Procedia CIRP**, v. 105, p. 192–197, 2022. ISSN 2212-8271. The 29th CIRP Conference on Life Cycle Engineering, April 4 – 6, 2022, Leuven, Belgium. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827122000324>>.

PERACA, M. T.; BATISTA, F. A. B.; MARCELINO, L. M. Five-level inverter based on the three-state model. In: **2010 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications - INDUSCON 2010**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–6.

PONCE, P. et al. Real time simulation for dc and ac motors based on labview fpgas. **IFAC Proceedings Volumes**, v. 45, n. 6, p. 1777–1784, 2012. ISSN 1474-6670. 14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016334085>>.

RAMESH, R.; MANNAN, M.; POO, A. Error compensation in machine tools — a review: Part i: geometric, cutting-force induced and fixture-dependent errors. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 40, n. 9, p. 1235–1256, 2000. ISSN 0890-6955. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695500000092>>.

RIVERA, M. A. **Procesos y técnicas**. 7th. ed editorial uh y editorial universitaria félix varela. ed. Universidad Félix Varela: [s.n.], 2019. 717-760 p. ISBN 978-959-7211-84-6.

RODRIGUES, G. S.; Espíndola Ferreira, J. C.; ROCHA, C. R. A novel method for analysis and optimization of electric energy consumption in manufacturing processes. **Procedia Manufacturing**, v. 17, p. 1073–1081, 2018. ISSN 2351-9789. 28th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM2018), June 11-14, 2018, Columbus, OH, USAGlobal Integration of Intelligent Manufacturing and Smart Industry for Good of Humanity. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978918311958>>.

ROMI S.A. **Máquinas-ferramentas**. 2022. Disponível em: <<https://www.romi.com/categoria/maquinas-ferramenta/>>. Acesso em: 05 jul.2022.

SÁ, J. M. P. de. Departamento de Engenharia Mecânica, **Projeto de um variador de velocidades escalonado com reversão para máquinas operatrizes**. Universidade Federal do Rio de Janeiro: [s.n.], 2016. 142 p.

- SCHMUCKER, B. et al. Implementation of an intelligent system architecture for process monitoring of machine tools. **Procedia CIRP**, v. 96, p. 342–346, 2021. ISSN 2212-8271. 8th CIRP Global Web Conference – Flexible Mass Customisation (CIRPe 2020). Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827121001268>>.
- SEGUNDO, A. K. R.; RODRIGUES, C. L. C. **Eletrônica de Potência e Acionamentos Elétricos**. 1st. ed rede e-tec brasil. ed. [S.l.: s.n.], 2015. 130 p. ISBN 9788568198025.
- SHAO, H.; WANG, H.; ZHAO, X. A cutting power model for tool wear monitoring in milling. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 44, n. 14, p. 1503–1509, 2004. ISSN 0890-6955. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S089069550400118X>>.
- SHINNO, H.; HASHIZUME, H.; SATO, H. In-process monitoring method for machining environment based on simultaneous multiphenomena sensing. **CIRP Annals**, v. 46, n. 1, p. 53–56, 1997. ISSN 0007-8506. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607607744>>.
- SIVARANJANI, S. et al. Visualization of virtual environment through labview platform. **Materials Today: Proceedings**, 2020. ISSN 2214-7853. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320381827>>.
- STEMMER, C. **Livro- Ferramentas de Corte I - Stemmer.pdf**. 1993. 249 p.
- TETI, R. et al. Advanced monitoring of machining operations. **CIRP Annals**, v. 59, n. 2, p. 717–739, 2010. ISSN 0007-8506. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850610001976>>.
- TROYSI, F. et al. Investigation of austenitic stainless steel coatings on mild steel produced by friction surfacing using a conventional CNC machining center. **Materials Research**, v. 22, n. 2, 2019. ISSN 19805373.
- VERGURA, S.; NATANGELO, E. Labview-matlab integration for analyzing energy data of pv plants. **Renewable Energy and Power Quality Journal**, v. 1, p. 1248–1252, 04 2010.
- VIANA, R. et al. Monitoramento da Potência Ativa na Usinagem Utilizando um Sistema de Baixo Custo. **9º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, n. January, 2017.
- VICHARE, P. et al. A unified manufacturing resource model for representing cnc machining systems. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 25, n. 6, p. 999–1007, 2009. ISSN 0736-5845. 18th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S073658450900043X>>.
- VIHAROS, Z. J.; FARKAS, B. Z. Microsecond measurement resolution for process cycle diagnostics of micro-edm milling. **Measurement: Sensors**, v. 18, p. 100123, 2021. ISSN 2665-9174. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2665917421000866>>.
- VIJAYARAGHAVAN, A.; DORNFELD, D. Automated energy monitoring of machine tools. **CIRP Annals**, v. 59, n. 1, p. 21–24, 2010. ISSN 0007-8506. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850610000430>>.

WOŹNIAK, A.; MĘCZYŃSKA, K. Measurement hysteresis of touch-trigger probes for cnc machine tools. **Measurement**, v. 156, p. 107568, 2020. ISSN 0263-2241. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224120301056>>.

YUSOF, Y.; LATIF, K. New interpretation module for open architecture control based cnc systems. **Procedia CIRP**, v. 26, p. 729–734, 2015. ISSN 2212-8271. 12th Global Conference on Sustainable Manufacturing – Emerging Potentials. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827114008646>>.

ZAHID FAISAL E ILYAS, K. e. Q. H. Design and implementation of a microcontroller-based monitoring and control system for current, voltage, frequency and three-phase ac power phase. p. 531–536, 2019.

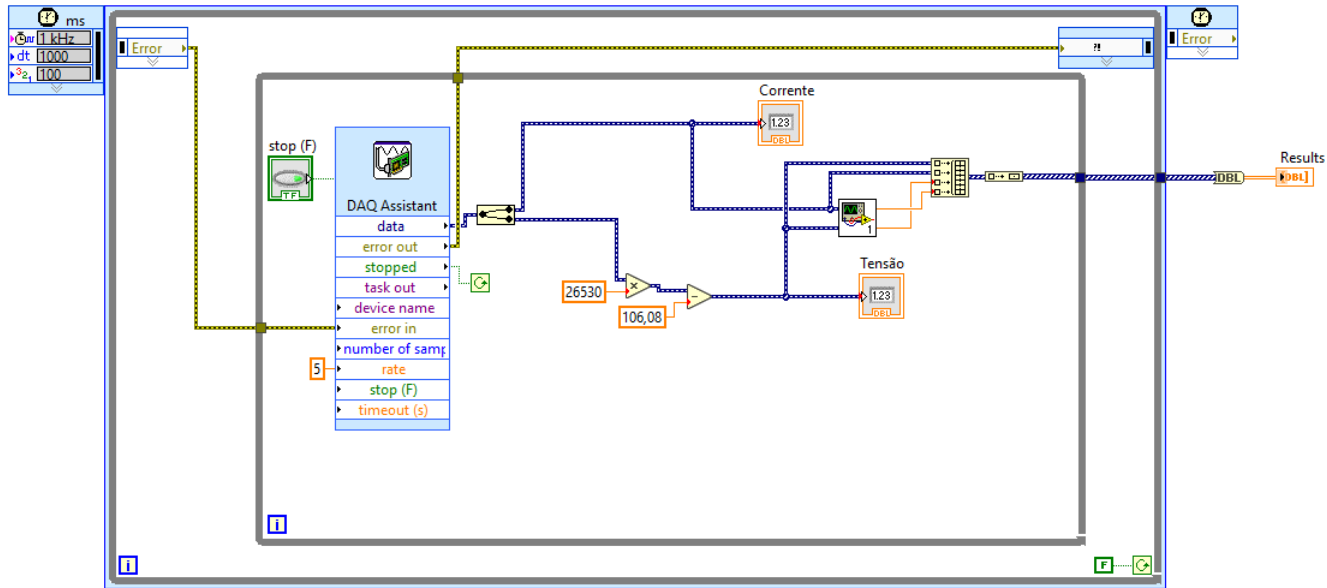
ZHONG, Q. et al. Evaluation on models of calculating energy consumption in metal cutting processes: a case of external turning process. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 82, p. 2087–2099, 2016. ISSN 1433-3015. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-015-7477-4#citeas>>.

ZHOU, Z. et al. Integrated condition monitoring and fault diagnosis for modern manufacturing systems. **CIRP Annals**, v. 49, n. 1, p. 387–390, 2000. ISSN 0007-8506. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607629710>>.

## A ANEXO - INTERFACES DESENVOLVIDAS E BANCADAS EXPERIMENTAIS

O código desenvolvido via plataforma LabVIEW® para realizar a aquisição e monitoramento dos dados de tensão e corrente é representado na Figura 7.1:

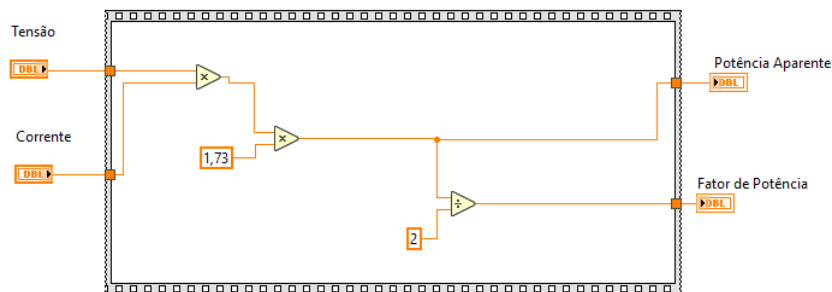
Figura A.1 – Interface desenvolvida via LabVIEW® para os dados de tensão e corrente



Fonte: Do autor (2022)

O código auxiliar desenvolvido via LabVIEW® para realizar a aquisição e monitoramento dos sinais de potência aparente é representado pela Figura 7.2.

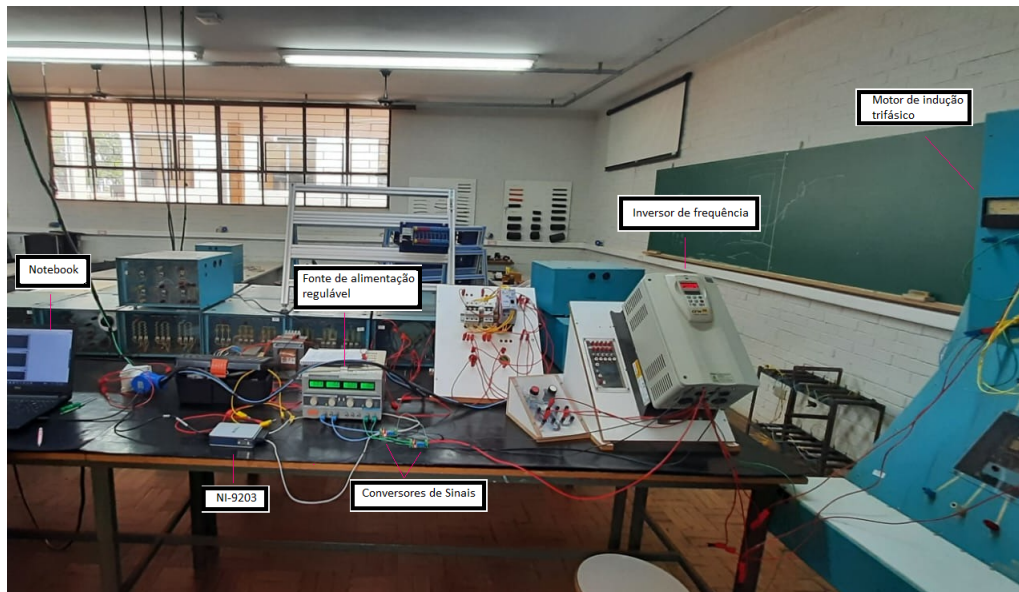
Figura A.2 – Interface desenvolvida via LabVIEW® para potência aparente



Fonte: Do autor (2022)

A bancada com os equipamentos utilizados no primeiro ensaio é representada na Figura 7.3:

Figura A.3 – Equipamentos utilizados no primeiro ensaio



Fonte: Do autor (2022)

A bancada com os equipamentos utilizados no segundo ensaio é representada na Figura 7.4:

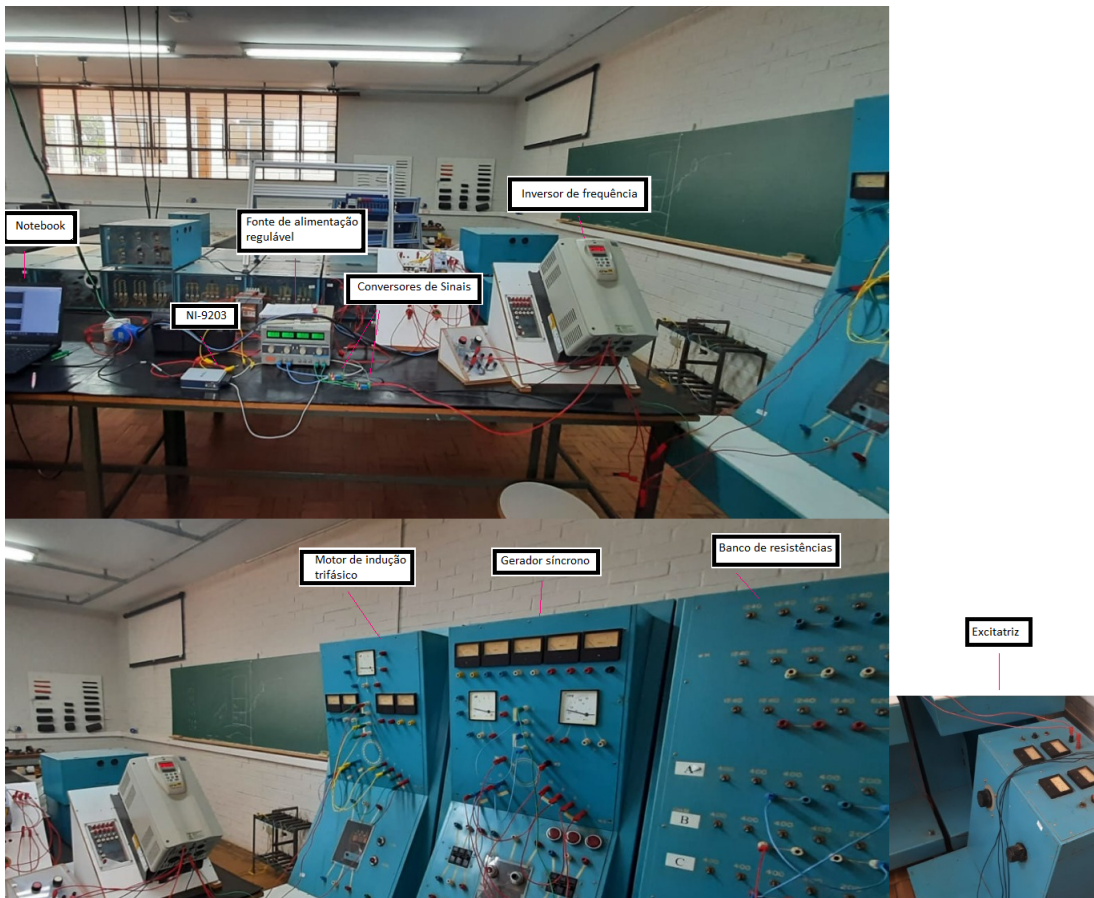
Figura A.4 – Equipamentos utilizados no segundo ensaio



Fonte: Do autor (2022)

A bancada com os equipamentos utilizados no terceiro ensaio é representada na Figura 7.5:

Figura A.5 – Equipamentos utilizados no terceiro ensaio



Fonte: Do autor (2022)