



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CATALÃO

FACULDADE DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**MONITORAMENTO EM TEMPO REAL DO
DESGASTE DA FERRAMENTA NO PROCESSO DE
TORNEAMENTO POR MEIO DA MEDIÇÃO DA
CORRENTE ELÉTRICA UTILIZANDO INTERNET DAS
COISAS**

DANILO CORINTO DE MESQUITA

Catalão - GO

2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
UNIDADE ACADÊMICA ESPECIAL DE ENGENHARIA

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

☒ Dissertação ☐ Tese ☐ Outro*: _____

*No caso de mestrado/doutorado profissional, indique o formato do Trabalho de Conclusão de Curso, permitido no documento de área, correspondente ao programa de pós-graduação, orientado pela legislação vigente da CAPES.

Exemplos: Estudo de caso ou Revisão sistemática ou outros formatos.

2. Nome completo do autor

DANILO CORINTO DE MESQUITA

3. Título do trabalho

MONITORAMENTO EM TEMPO REAL DO DESGASTE DA FERRAMENTA NO PROCESSO DE TORNEAMENTO POR MEIO DA MEDIÇÃO DA CORRENTE ELÉTRICA UTILIZANDO INTERNET DAS COISAS

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento ☒ SIM ☐ NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

- a) consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);
- b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Marco Paulo Guimaraes, Orientador**, em 02/10/2023, às 13:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **DANILO CORINTO DE MESQUITA, Discente**, em 02/10/2023, às 13:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 4090715 e o código CRC 103E2AD4.

MONITORAMENTO EM TEMPO REAL DO DESGASTE DA FERRAMENTA NO PROCESSO DE TORNEAMENTO POR MEIO DA MEDIÇÃO DA CORRENTE ELÉTRICA UTILIZANDO INTERNET DAS COISAS

DANILO CORINTO DE MESQUITA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da Faculdade de Engenharia, da Universidade Federal de Catalão, como parte dos requisitos para obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**.

Área de Concentração: Engenharia de Operações e Processos Industriais.

Orientador: Prof. Dr. Marco Paulo Guimarães

Coorientador: Prof. Dr. André Alves de Resende

Catalão - GO

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFCAT.

de Mesquita, Danilo Corinto

Monitoramento em tempo real do desgaste da ferramenta no
processo de torneamento por meio da medição da corrente elétrica
utilizando internet das coisas. / Danilo Corinto de Mesquita. - 2023.
85, f.

Orientador: Prof. Dr. Marco Paulo Guimarães; co-orientador Prof.
Dr. André Alves de Resende.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Catalão,
Faculdade de Engenharia, Catalão, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Produção, Catalão, 2023.

Bibliografia. Anexos. Apêndice.

Inclui siglas, fotografias, abreviaturas, símbolos, gráfico, tabelas,
lista de figuras, lista de tabelas.

1. Monitoramento do desgaste da ferramenta. 2.
Microcontroladores. 3. Corrente Elétrica. 4. IoT (Internet das Coisas). I.
Guimarães, Marco Paulo, orient. II. Título.

CDU 658.5



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

UNIDADE ACADÊMICA ESPECIAL DE ENGENHARIA

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº **34** da sessão de Defesa de Dissertação de **DANILO CORINTO DE MESQUITA**, que confere o título de Mestre em Engenharia de Produção, na área de concentração em Engenharia de Operações e Processos Industriais.

"Banca Examinadora de Qualificação/Defesa Pública de Dissertação/Tese realizada em conformidade com a Portaria da CAPES n. 36, de 19 de março de 2020, de acordo com seu segundo artigo: Art. 2º. A suspensão de que trata esta Portaria não afasta a possibilidade de defesas de tese utilizando tecnologias de comunicação à distância, quando admissíveis pelo programa de pós-graduação stricto sensu, nos termos da regulamentação do Ministério da Educação."

Aos vinte e um dias do mês de agosto de dois mil e vinte e três, a partir das nove horas, na sala virtual (<https://meet.google.com/rip-kwvb-kph?hs=224>), realizou-se a sessão pública de Defesa de Tese/Dissertação intitulada "**MONITORAMENTO EM TEMPO REAL DO DESGASTE DA FERRAMENTA NO PROCESSO DE TORNEAMENTO POR MEIO DA MEDIÇÃO DA CORRENTE ELÉTRICA UTILIZANDO INTERNET DAS COISAS**" nas dependências da Universidade Federal de Catalão, onde os programas de pós-graduação stricto sensu em funcionamento encontram-se provisoriamente vinculados à Universidade Federal de Goiás, em virtude de procedimentos técnicos relacionados à CAPES, já sendo realizada a transferência da Biblioteca Digital de Dissertações e Teses (BDTD). Assim, justifica-se os nomes das instituições neste documento, uma no cabeçalho (UFG), outra no corpo do texto (UFCAT). Os trabalhos foram instalados pelo Orientador, Professor Doutor MARCO PAULO GUIMARÃES (PPGEP/UFCAT), com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor Doutor FERNANDO NUNES BELCHIOR (PPGEP/UFG), membro titular externo, Professora Doutora ALINE GONÇALVES DOS SANTOS (PPGEP/UFCAT), membro titular interno, e do co-orientador Professor Doutor ANDRÉ ALVES DE RESENDE (PPGEP/UFCAT). A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido o candidato **aprovado** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Professor Doutor Marco Paulo Guimarães, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos vinte e um dias do mês de agosto de dois mil e vinte e três.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por **Marco Paulo Guimarães, Professor do Magistério Superior**, em 21/08/2023, às 17:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Andre Alves De Resende, Professor do Magistério Superior**, em 21/08/2023, às 17:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Aline Gonçalves Dos Santos, Professor do Magistério Superior**, em 21/08/2023, às 19:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fernando Nunes Belchior, Professor do Magistério Superior**, em 22/08/2023, às 09:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3948177** e o código CRC **9351657B**.

Referência: Processo nº 23070.044412/2023-28

SEI nº 3948177

Ao meu avô, Paulo Braz Corinto (in memoriam), dedico este trabalho. Ele foi uma pessoa que teve um impacto enorme na minha vida, sempre me ensinou sobre a importância de ter uma postura íntegra e honesta, e a cultivar um sentimento de gratidão a Deus em todas as situações da vida.

Ele foi um exemplo vivo de honestidade e integridade. Sempre agiu com ética e respeito, e me ensinou que a honestidade é um valor inegociável em qualquer situação. Sua postura incorruptível me inspirou a ser uma pessoa íntegra e comprometida com a verdade em todas as áreas da vida.

Além disso, me ensinou a importância de cultivar um sentimento de gratidão a Deus em todas as situações. Ele acreditava que a gratidão era uma atitude fundamental para se alcançar a felicidade e a realização pessoal. Sua postura de gratidão me inspirou a valorizar as pequenas coisas da vida, e a ser uma pessoa agradecida e comprometida com a generosidade e a compaixão.

Meu avô já não está mais entre nós, mas seu legado de honestidade e gratidão a Deus continuará vivo em minha vida. É com imenso carinho e reconhecimento que dedico este trabalho a ele, em função de tudo que ele representou para mim.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer a Deus por cada novo dia de vida, pela saúde e força que me permitiram superar os desafios diários e concluir este trabalho.

À minha amada esposa, Eloisa, e aos meus filhos, José Paulo e Davi, quero expressar minha gratidão pela paciência, amor e compreensão que demonstraram durante os dias intermináveis de reclusão e noites em claro que dediquei a este projeto. Vocês foram minha inspiração para manter o foco e não desistir. Obrigado por serem a minha base, minha fortaleza e meu porto seguro.

Também gostaria de agradecer aos meus pais, Indiara e José, que sempre acreditaram em mim, mesmo quando eu mesmo duvidava das minhas capacidades. Obrigado por me apoiarem em todas as minhas escolhas e por serem meu suporte incondicional em cada etapa da minha vida.

À minha querida irmã, Ana Paula, quero agradecer por comemorar comigo cada vitória, por estar sempre presente e por me apoiar de todas as formas possíveis.

Quero expressar minha imensa gratidão ao meu Orientador, o Prof. Dr. Marco Paulo Guimarães, e ao meu Coorientador, o Prof. Dr. André Alves de Resende, por todo o apoio, orientação e ensinamentos ao longo desta jornada de mestrado.

Marco Paulo, em especial, foi incansável em sua dedicação e comprometimento com meu trabalho. Seu incentivo e encorajamento foram fundamentais para que eu pudesse superar os momentos mais desafiadores dessa jornada.

Agradeço também ao Prof. Dr. André Alves de Resende por toda a contribuição e ensinamentos valiosos que me ajudaram a enxergar as coisas de forma diferente e a ir além do que eu pensava ser possível.

Aos meus amigos, que contribuíram de forma direta e indireta para a conclusão deste trabalho, quero expressar minha gratidão sincera. Obrigado por cada palavra de encorajamento, por cada conversa motivadora e por cada momento de descontração que me permitiu recarregar as energias.

Por fim, gostaria de agradecer ao assistente administrativo Bruno César Guerreiro Ferreira, da Faculdade de Engenharia, e a todos os colaboradores da universidade que contribuíram de alguma forma para a conclusão deste trabalho. Obrigado pela paciência, profissionalismo e disponibilidade em ajudar a todo e qualquer momento. Vocês foram essenciais para que eu pudesse alcançar este resultado.

MESQUITA, D. C. **Monitoramento em tempo real do desgaste da ferramenta no processo de torneamento por meio da medição da corrente elétrica utilizando internet das coisas.** 85p. Dissertação Mestrado, Universidade Federal de Catalão, GO. 2023.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um sistema de monitoramento em tempo real do desgaste da ferramenta durante o desbaste no processo de torneamento, utilizando a medição da corrente elétrica do motor do eixo-árvore da máquina por meio da Internet das Coisas. Embora existam vários métodos para medir o desgaste, os métodos de medição em tempo real tornam o processo mais ágil, pois não é necessário interromper a máquina para avaliar o desgaste. Os capítulos iniciais deste trabalho incluem uma revisão bibliográfica sobre torneamento, tipos e métodos de medição do desgaste de ferramentas de corte. Além disso, conceitos teóricos e recursos que são utilizados para o desenvolvimento de dispositivos IoT são explorados. Em seguida, são apresentados os materiais e métodos utilizados para conceber esta pesquisa, incluindo a metodologia do trabalho, como a placa de aquisição de dados foi desenvolvida e os materiais, equipamentos e métodos utilizados nos ensaios. Os resultados mostram que a solução proposta para o sistema de aquisição de dados, utilizando microcontroladores, computação em nuvem e recursos como InfluxDB e Grafana, foi capaz de diagnosticar o desgaste da ferramenta durante o processo de desbaste.

Palavras-chave: Monitoramento do desgaste da ferramenta. Microcontroladores. Corrente Elétrica. IoT (Internet das Coisas).

MESQUITA, D. C. **Real-time tool wear monitoring in the turning process through electrical current measurement using the Internet of Things**. 85p. Master's Thesis, Federal University of Catalão, GO. 2023.

ABSTRACT

This study aims to develop a real-time tool wear monitoring system during the roughing operation in the turning process, utilizing the measurement of electrical current from the machine's spindle motor through the Internet of Things (IoT). While there are several methods for measuring wear, real-time measurement methods make the process more efficient as there is no need to interrupt the machine to assess wear. The initial chapters of this work include a literature review on turning, types, and measurement methods of cutting tool wear. Additionally, theoretical concepts and resources used for the development of IoT devices are explored. Subsequently, the materials and methods employed to conceive this research are presented, including the work methodology, the development of the data acquisition board, and the materials, equipment, and methods used in the experiments. The results demonstrate that the proposed solution for the data acquisition system, utilizing microcontrollers, cloud computing, and resources such as InfluxDB and Grafana, was capable of diagnosing tool wear during the roughing process.

Keywords: Tool wear monitoring. Microcontrollers. Electrical current. Internet of Things (IoT).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação dos Processos de Fabricação	17
Figura 2 - Ilustração processo de usinagem - (a) Uma vista em corte transversal do processo de usinagem. (b) Ferramenta com ângulo de saída negativo, em contraposição ao ângulo de saída a positivo apresentado em (a).....	18
Figura 3 - Representação do processo de torneamento.....	19
Figura 4 - (a) Uma ferramenta monocortante mostrando a superfície de saída, o flanko e a ponta da ferramenta; e (b) uma fresa helicoidal, representativa de ferramentas com múltiplas arestas de corte	21
Figura 5 - Tipos de desgastes em ferramentas de torneamento	25
Figura 6 - NodeMCU	33
Figura 7 - Parâmetros técnico modelos de sensores não invasivos	41
Figura 8 - Sensor SCT-013-030	41
Figura 9 - Arquitetura proposta	43
Figura 10 - Modelo de comunicação MQTT	46
Figura 11 - Parâmetros inseridos no MQTTDash	48
Figura 12 - Circuito eletrônico	49
Figura 13 - Montagem final do dispositivo	50
Figura 14 - Ensaios de aferição	51
Figura 15 - Gráfico aferição.....	52
Figura 16 - Material em processo de pré-usinagem	55
Figura 17 - Torno mecânico	56
Figura 18 - Geometria da ferramenta	57
Figura 19 - Gráfico desgaste Taylor	58
Figura 20 - Porta-ferramentas	59
Figura 21 - Sistema de medição do desgaste da ferramenta	59
Figura 22 - Tarugo pré-usinado e demarcado	60
Figura 23 - Sistema de aquisição de dados montando.....	61
Figura 24 - Sensor de corrente elétrica acoplado ao circuito elétrico do torno.....	61
Figura 25 - Ferramentas utilizadas no estudo	62
Figura 26 - Interface Grafana	65
Figura 27 - InfluxDB	66
Figura 28 - MQTTDash	66
Figura 29 - Curva de Taylor da vida útil da ferramenta.....	70
Figura 30 - Gráfico de barras desgaste do flanko versus corrente elétrica média	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Métodos de medição	23
Tabela 2 - Comparação entre os microcontroladores	39
Tabela 3 - Características da ferramenta.....	56
Tabela 4 - Microscopia ferramentas	63
Tabela 5 - Dados coletados.....	67
Tabela 6 - Teste de normalidade Shapiro-Wilk.....	68
Tabela 7 - Correlação de Pearson.....	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A – Ampere;
AC – Corrente alternada;
 a_p – Profundidade de corte;
APC – Aresta postiça de corte;
API – *Application programming interface*;
ASM – *American Society for Metals*;
BLE – *Bluetooth Low Energy*;
CoAP – *Constrained Application Protocol*;
DC – Corrente contínua;
E/S – Entrada/Saída;
EA – Emissão acústica;
ESP 32 – *Espressif Systems 32*;
f – Avanço;
GPIO – *General Purpose Input/Output*;
HBS – Brinell Standard;
HTTP – *Hypertext Transfer Protocol*;
Hz – Hertz;
I2C – *Inter-Integrated Circuit*;
IIoT – *Industrial Internet of Things*;
IoT – *Internet of Things*;
KT – Profundidade de cratera;
MCU – *Microcontroller unit*;
MQTT – *Message Queue Telemetry Transport*;
NIST – *National Institute of Standards and Technology* – USA;
PWM – *Pulse Width Modulation*;
SaaS – *Software como serviço*;
SPI – *Serial Peripheral Interface*;
UART – *Universal Asynchronous*;
USB – *Universal Serial Bus*;
V – Volts;
 VB_B – Desgaste de flanco médio;
 $VB_{máx}$ – Desgaste de flanco máximo;
 VB_N – Desgaste de entalhe;
VC – Velocidade de corte;
 V_{pp} – Tensão pico a pico.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivo Geral	16
1.2 Objetivos Específicos	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Processos de Fabricação	17
2.2 Ferramenta de corte	20
2.2.1 Desgaste da Ferramenta de corte	22
2.3 Monitoramento do desgaste da ferramenta de corte	26
2.4 Microcontroladores	31
2.5 Computação em nuvens	34
2.6 Internet das coisas (<i>IoT – Internet of Things</i>)	35
3 MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1 Sistema de aquisição de dados	38
3.1.1 Microcontrolador	38
3.1.2 Sensor de corrente SCT-013	40
3.1.3 Arquitetura e funcionalidades	42
3.1.4 <i>Cloud computing</i> (Computação em nuvem)	44
3.1.5 <i>Message Queuing Telemetry Transport</i> (MQTT)	44
3.1.6 <i>Broker</i>	45
3.1.7 InfluxDB	46
3.1.9 Aplicação <i>mobile</i>	48
3.1.10 Montagem	49
3.1.11 Aferição	50
3.1.12 Programação	53
3.2 Ensaios de usinagem	53
3.2.1 Programação	53
3.2.2 Torno Mecânico	55
3.2.3 Ferramenta de corte	56
3.2.4 Microscópio digital	59
3.2.5 Parâmetros de corte e condições de usinagem	60
3.2.6 Monitoramento dos dados	61
3.2.7 Seleção e medição das ferramentas	62
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	64
4.1 Monitoramento da corrente elétrica	64
4.2 Relação da corrente elétrica com o desgaste	67

4.3 Resultados obtidos e análise da similaridade com a curva de Taylor.....	69
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
5.1 Conclusões	73
5.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	74
REFERÊNCIAS.....	76
APÊNDICE A - PROGRAMAÇÃO ESP32	82
APÊNDICE B - PROGRAMAÇÃO ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	84

Os Programas de Pós-Graduação *stricto sensu* em funcionamento na Universidade Federal de Catalão (UFCAT), em virtude de procedimentos técnicos relacionados à CAPES, continuam provisoriamente vinculados à Universidade Federal de Goiás (UFG), por isso, todos os elementos pré-textuais do trabalho apresentado estão identificados como Universidade Federal de Goiás/Universidade Federal de Catalão em implantação, em função da migração da BDTD ter ocorrido a partir de 16 de agosto de 2021, assim como pelo fato das pesquisas e produtos serem realizados na UFCAT.

1 INTRODUÇÃO

O mundo passa por muitas transformações, entretanto a necessidade de produção em larga escala continua intensa. Fabricar peças com um preço mínimo, qualidade superior e no menor tempo possível é uma necessidade. Na busca pela produtividade, é cada vez mais comum que novos métodos para melhorar os processos de fabricação surjam. Dentro desse contexto, os processos de usinagem se destacam por estarem presentes em praticamente várias etapas de fabricação de produtos industrializados. A fim de garantir processos de usinagem mais eficazes e eficientes, resultando em peças bem-acabadas e com tolerâncias dimensionais adequadas, as máquinas são desenvolvidas com cada vez mais tecnologia embarcada (KLOCKE, 2011).

Apesar de todo avanço ocorrido nas máquinas-ferramenta, ainda existem pontos críticos a serem tratados e que causam consideráveis perdas de tempo nos processos de fabricação por usinagem. O desgaste da ferramenta e a imprevisibilidade da sua quebra são importantes barreiras na busca pela melhoria contínua destes processos. Em usinagem, isso pode ser considerado um ponto crítico: determinar o exato momento da troca da ferramenta, considerando sua máxima utilização e respeitando os limites da qualidade da peça produzida, possibilitando uma diminuição do custo de produção (ERTUNC; LOPARO; OCAK, 2001).

Segundo Ferraresi (2006), a vida da ferramenta é o tempo em que ela trabalha efetivamente, sem perder o corte, ou até que se atinja um critério de fim de vida previamente estabelecido. Através do controle de fatores como qualidade da peça, ruído, força e vibração, é possível saber quando a ferramenta deve ser substituída e estabelecer o seu limite econômico, utilizando-a ao máximo e prolongando sua vida útil.

Por muitos anos, essa estimativa de vida da ferramenta foi determinada de forma empírica, a partir das experiências e percepções do operador da máquina. Nas décadas de 1980 e 1990, em que práticas antigas de troca de ferramentas começaram a ser alteradas, surgiu a possibilidade de se aplicar procedimentos de mudança de ferramentas baseados no monitoramento do desgaste das arestas de corte por meio da implementação de mecanismos adaptativos de inspeção da ferramenta (DIMLA, 2000).

A medição do desgaste da ferramenta pode ser realizada de forma direta ou indireta. Os métodos diretos de medição do desgaste são mais confiáveis, contudo, é necessária a parada do processo para o acompanhamento da variável que se quer estudar, causando uma interrupção na produção, isto é, gerando tempos improdutivos e, consequentemente, prejuízo na indústria (SILVA, 2010; TOLEDO, 2015).

Com o objetivo de diminuir estas paradas, propõe-se neste trabalho desenvolver um método de medição e monitoramento do desgaste da ferramenta em tempo real (*on-line*), utilizando IoT (*Internet of Things*), visando indicar a substituição desta no momento adequado.

A integração da IoT possibilita a comunicação em tempo real entre máquinas, sistemas de gestão e operadores, criando um ambiente de produção mais eficiente e adaptável. Os dados coletados podem ser utilizados para monitorar o desempenho das máquinas-ferramenta, identificar padrões de falha, evitando paradas não programadas e aumentando a produtividade.

Dessa forma, a adoção da IoT traz benefícios significativos para os processos de usinagem, permitindo a tomada de decisões mais assertivas reduzindo custos de produção, melhorando a qualidade das peças e aumentando a eficiência operacional. Neste trabalho será explorado o potencial da IoT como uma ferramenta estratégica para o monitoramento e controle do desgaste da ferramenta, contribuindo para a melhoria contínua dos processos de fabricação por usinagem.

1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desse trabalho é desenvolver uma metodologia para monitorar o desgaste da ferramenta utilizada no processo de torneamento através da medição em tempo real da corrente elétrica de alimentação do motor principal da máquina, utilizando Internet das Coisas (IoT).

1.2 Objetivos Específicos

- Identificar na bibliografia existente métodos de medição de desgaste de ferramentas de corte que sejam eficientes;
- Implantar um sistema de baixo custo e fácil instalação para aquisição, leitura e interpretação de dados, com comunicação via interface de *smartphone* para indicação dos valores monitorados durante o processo de usinagem;
- Desenvolver ensaios de torneamento para medição do desgaste da ferramenta em condições de desbaste durante a usinagem, a fim de coletar os dados de corrente elétrica do motor do eixo-árvore e utilizar técnicas para determinação dos pontos de troca da ferramenta.

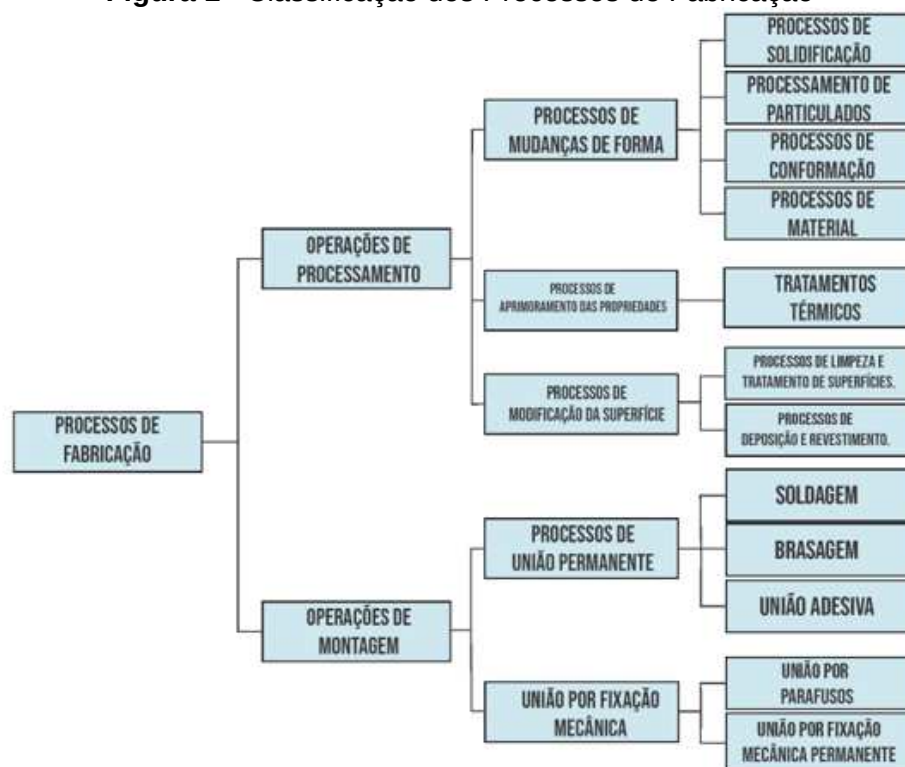
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem como objetivo apresentar a revisão da literatura sobre o processo de usinagem, ferramentas de corte e mecanismos de desgaste, protocolos de comunicação e utilização de plataformas de código aberto para coleta e integração de dados.

2.1 Processos de Fabricação

Conforme apontado por Groover (2014), o processo de fabricação é um procedimento que tem o objetivo de realizar transformações físicas e/ou químicas no material inicial com o objetivo de agregar valor a este material, sendo normalmente considerada a operação unitária, isto é, um passo único da sequência de passos necessários para a transformação do material inicial no produto. Uma operação unitária é em geral executada em um equipamento único e de modo independente das demais operações da fábrica. Conforme aponta a Figura 1 uma classificação dos processos de fabricação.

Figura 1 - Classificação dos Processos de Fabricação

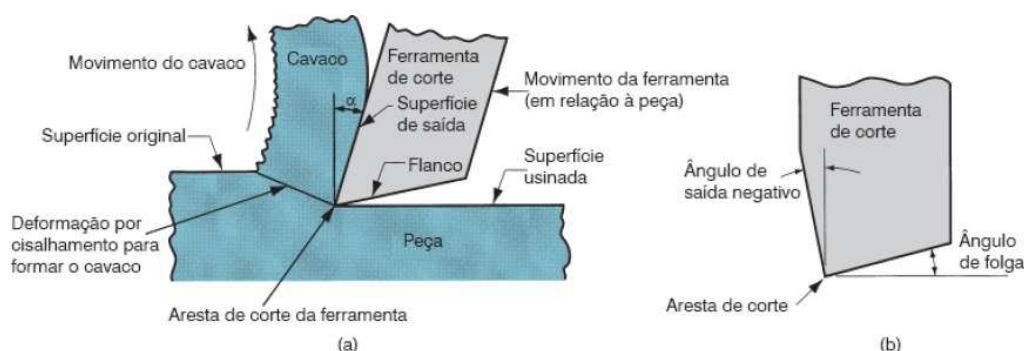


Fonte: (GROOVER, 2014).

Groover (2014) aponta a usinagem como um processo de fabricação em que uma ferramenta de corte afiada é utilizada para remover material e produzir o formato da peça

desejada. A ação predominante de corte na usinagem envolve a deformação por cisalhamento do material trabalhado para formar o cavaco; conforme o cavaco é removido, uma nova superfície é exposta. A usinagem é aplicada mais frequentemente para dar forma a metais. O processo é ilustrado no diagrama da Figura 2.

Figura 2 - Ilustração processo de usinagem - (a) Vista em corte transversal. (b) Ferramenta com ângulo de saída negativo, em contraposição ao ângulo de saída positivo apresentado em (a)



Fonte: (GROOVER, 2014).

A usinagem desempenha um papel importante na fabricação desde a Revolução Industrial, contribuindo para o crescimento da economia de manufatura em todo o mundo. Seu desenvolvimento está intimamente ligado às diversas operações de usinagem. Comercial e tecnologicamente, a usinagem possui vantagens e desvantagens, conforme apontado por Groover (2014).

Para Ferraresi (2006), a usinagem é um processo que confere à peça a forma, ou as dimensões ou o acabamento, ou ainda uma combinação qualquer destes três itens; e durante esse processo é produzido o cavaco.

Em relação às vantagens, a usinagem é capaz de lidar com uma ampla variedade de materiais. Metais sólidos são facilmente usinados, assim como plásticos e compósitos de plástico. Embora as cerâmicas apresentem desafios devido à sua dureza e fragilidade, a maioria delas pode ser cortada com sucesso através de processos abrasivos de usinagem.

Além disso, a usinagem permite a criação de diversas formas e características geométricas nas peças. Desde superfícies planas até furos redondos e cilindros, a usinagem pode alcançar geometrias comuns. Com variações nas formas e trajetórias das ferramentas, é possível obter geometrias irregulares, como filetes de rosca e ranhuras-T. Ao combinar diferentes operações de usinagem em sequência, é possível produzir peças de grande complexidade e variedade. Outra vantagem da usinagem é a precisão dimensional. Ela é capaz de produzir dimensões com tolerâncias muito estreitas, com alguns processos atingindo tolerâncias de $\pm 0,025$ mm, superando muitos outros métodos de fabricação.

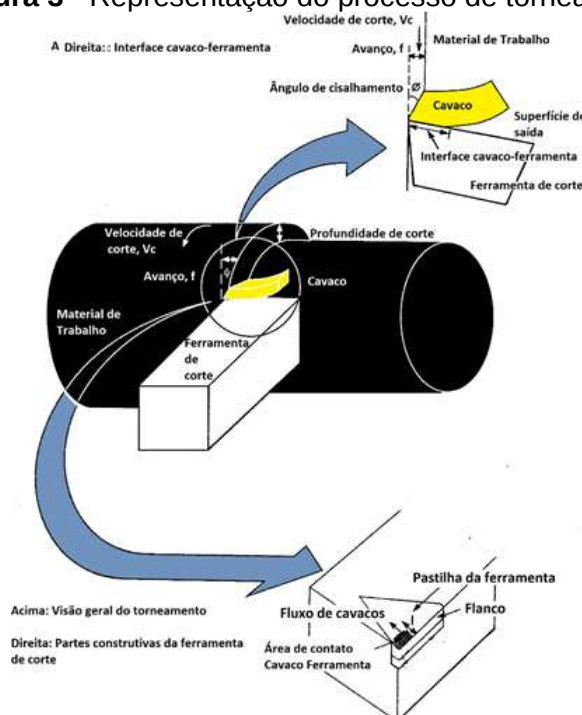
Por outro lado, a usinagem e outros processos de remoção de materiais apresentam algumas desvantagens. Um dos problemas é o desperdício de material, já que a usinagem gera cavacos que se tornam resíduos. Embora esses cavacos possam ser reciclados na maioria dos casos, eles ainda representam um desperdício em termos de operação.

Além disso, a usinagem é geralmente mais demorada em comparação a processos alternativos, como fundição ou forjamento, para dar forma a uma peça específica. É importante ressaltar que a usinagem é frequentemente realizada após outros processos de fabricação, como fundição ou deformação volumétrica, que criam a forma geral da peça bruta. A usinagem desempenha um papel essencial ao fornecer a geometria precisa, as dimensões exatas e o acabamento necessário.

Dentre os processos de usinagem, Trent (2000) define o processo de torneamento como a operação de usinagem mais comumente empregada em trabalhos de corte de metal. O torneamento é o processo de usinagem usado para fabricar peças de revolução cilíndricas, no qual a ferramenta desenvolve um deslocamento linear, enquanto a peça exerce um movimento rotacional.

Além disso, Trent (2000) define o processo de torneamento como uma operação onde o material de trabalho é mantido no mandril de um torno e girado. A ferramenta é mantida rigidamente em uma porta ferramenta e movida a uma taxa constante ao longo do eixo da barra, cortando uma camada de metal para formar um cilindro ou uma superfície de perfil mais complexo. Isto é mostrado esquematicamente na Figura 3.

Figura 3 - Representação do processo de torneamento



Fonte: Adaptado de Trent (2000).

Existem, no torneamento, dois fatores cuja influência (independentemente do material da peça e da ferramenta) determina o resultado do processo: os parâmetros de corte e a geometria da aresta de corte.

Para executar uma operação de usinagem, é necessário movimento relativo entre a ferramenta e a peça. O movimento primário é realizado a uma determinada velocidade de corte (V_c). Além disso, a ferramenta deve ser movimentada de um lado a outro da peça. Esse percurso é realizado de forma muito mais lenta e é chamado avanço f (*feed*). A outra dimensão do corte é a penetração da ferramenta de corte abaixo da superfície original, chamada profundidade de corte (a_p). A velocidade de corte, o avanço e a profundidade de corte, em conjunto, são chamados condições de corte e formam as três dimensões do processo de usinagem. Para certas operações (por exemplo, a maioria das operações com ferramenta monocortante), as condições de corte podem ser usadas para calcular a taxa de remoção de material para o processo, segundo Groover (2014).

Para Trent (2000), velocidade de corte (V_c) é a velocidade linear relativa entre a ponta da ferramenta e a peça em rotação, a qual é expressa normalmente em m/min. O avanço (f) é a distância percorrida pela ferramenta por revolução da peça, e a profundidade de corte (a_p) é a espessura ou profundidade de penetração da ferramenta medida perpendicularmente ao plano de trabalho.

Segundo Machado et al. (2015), basicamente duas operações podem ser executadas, sendo o “desbaste” e o “acabamento”. Em operação de desbaste geralmente são utilizadas velocidades de corte mais baixas e maiores avanços e profundidade de corte resultando em maior taxa de remoção de material. Na operação de acabamento são utilizadas maiores velocidades de corte, com menores avanços e profundidades de corte, resultando em menor taxa de remoção de material.

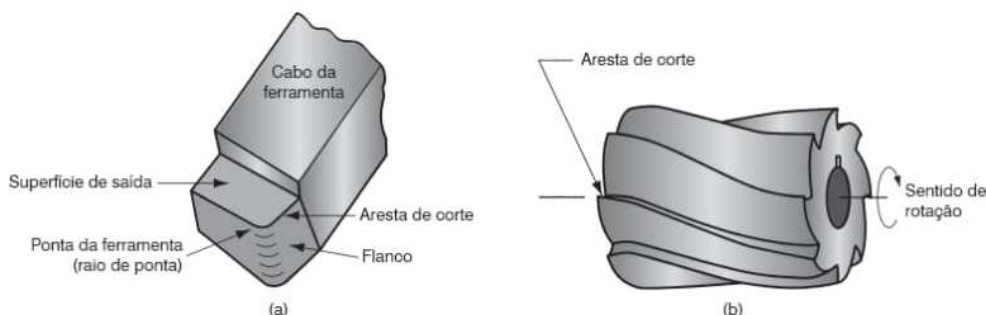
2.2 Ferramenta de corte

Para Groover (2014), uma ferramenta de corte possui uma ou mais arestas de corte afiadas e é composta de material mais duro que o material a ser usinado. A aresta de corte serve para separar o cavaco do material de origem, como mostrado na Figura 2. Duas superfícies da ferramenta estão conectadas à aresta de corte: a superfície de saída e o flanco. A superfície de saída, que direciona o fluxo do cavaco recém-formado, é orientada em certo ângulo denominado ângulo de saída α . O ângulo de saída é medido em relação a um plano perpendicular à superfície gerada e pode ser positivo, como na Figura 2 (a), ou negativo como em (b). O flanco da ferramenta fornece uma folga entre a ferramenta e a superfície de trabalho recém-gerada, protegendo, dessa forma, a superfície usinada contra a abrasão, que

degradaria o acabamento. A superfície do flanco é orientada em um ângulo denominado ângulo de folga.

Na prática, a maioria das ferramentas de corte possui geometria mais complexa que a exposta na Figura 2. Existem dois tipos básicos de ferramentas: (a) ferramentas monocortantes e (b) ferramentas multicortantes, e exemplos de cada um desses tipos estão ilustrados na Figura 4.

Figura 4 - (a) ferramenta monocortante; e (b) fresa helicoidal, com múltiplas arestas de corte



Fonte: (GROOVER, 2014).

Uma ferramenta monocortante possui uma aresta de corte e é utilizada para operações tais como a de torneamento. Além das características geométricas ilustradas na Figura 2, a ferramenta apresenta uma única ponta de corte, de onde deriva o nome desse tipo de ferramenta. Durante a usinagem, a ponta da ferramenta penetra abaixo da superfície original da peça. A ponta é geralmente arredondada, com um determinado raio, chamado raio de ponta.

As ferramentas multicortantes têm mais de uma aresta de corte e, em geral, realizam seu movimento em relação à peça por rotação. Furação e fresamento utilizam ferramentas multicortantes rotativas. A Figura 4 (b) mostra uma fresa.

Diferentes formatos e materiais podem ser usinados conferindo forma e função a uma peça. Cada material tem suas características exclusivas, que são influenciadas pelos elementos de liga, tratamento térmico, dureza e outros. A combinação desses elementos instiga significativamente a escolha da geometria da ferramenta de corte, a classe e os dados de corte, segundo Sandvik (2019).

O desempenho da usinagem está diretamente ligado à geometria da ferramenta de corte, assim, se a geometria da ferramenta escolhida para executar um determinado trabalho não for adequada, pode não haver êxito na operação (MACHADO et al., 2004).

Conforme a NBR-6163 (1990), a geometria da ferramenta influencia a formação e a saída do cavaco, a força de corte, o desgaste da ferramenta e a qualidade final do trabalho.

2.2.1 Desgaste da Ferramenta de corte

As formas de contato entre a ferramenta e a peça têm uma primordial influência sobre o comportamento de desgaste dos materiais das ferramentas de corte, por isso o processo deve ser desenvolvido de modo a suportar a grande variação de cargas estáticas e dinâmicas (OST, 2016).

Segundo Ferraresi (2006), a vida da ferramenta é o tempo em que ela trabalha efetivamente, sem perder o corte ou até que se atinja um critério de fim de vida previamente estabelecido. Através do controle de fatores como qualidade da peça, ruído, força, vibração é possível saber quando a ferramenta deve ser substituída e estabelecer o limite econômico de uma ferramenta, utilizando-a ao máximo e prolongando sua vida útil.

Estes parâmetros de processos devem ser bem compreendidos para a sua adequada seleção, com a finalidade de otimizar a produtividade através da diminuição dos tempos de usinagem e do incremento da vida da ferramenta.

Segundo Klocke (2011), o termo “vida útil da ferramenta” foi introduzido para descrever o comportamento do material e da ferramenta de corte durante o processo de usinagem.

É importante ressaltar que o desgaste da ferramenta influencia diretamente a temperatura da interface ferramenta-peça, a qualidade da superfície usinada, a precisão dimensional e, finalmente o custo do produto. Segundo a Norma ISO 3685 (1993), a vida da ferramenta pode ser expressa por fatores como:

- Número de peças produzidas;
- Percurso de avanço (mm);
- Percurso efetivo de corte (km);
- Tempo de trabalho (min);
- Volume de material removido;
- Velocidade de corte para determinado tempo de vida.

A falha de uma ferramenta de corte pode ocorrer de três formas distintas: lascamento, desgaste de flanco e desgaste na face.

O lascamento representa uma falha acidental e prematura da ferramenta, ocasionado pelas sobre solicitações de origem mecânica ou térmica do gume. As solicitações mecânicas são causadas por cortes interrompidos ou impactos, usinagem de material muito duro, dimensões excessivas do cavaco e vibrações mecânicas. As solicitações térmicas causam um fissuramento no gume devido a um resfriamento brusco da ferramenta, tanto na afiação, quanto na usinagem (STEMMER, 2005).

Segundo Diniz et al. (2001), avaliar o desgaste de uma ferramenta de corte envolve a consideração de variáveis tais como: material, geometria e revestimento da ferramenta,

características do material da peça, condições de corte, tipo e método de aplicação do fluido de corte, e as características dinâmicas da ferramenta e da máquina. Nos desgastes ocorridos em ferramentas de corte, as propriedades do material de corte são de fundamental importância no que diz respeito à vida e ao desgaste da ferramenta, assim como os parâmetros adotados para o processo de usinagem.

O desgaste da ferramenta de corte pode ser avaliado através de métodos diretos e indiretos. Nos métodos diretos, mede-se a geometria da ferramenta usando dispositivos óticos. Já nos métodos indiretos utiliza-se a aquisição de valores medidos de variáveis do processo como: força de corte, temperatura, vibração, emissão acústica, perda de qualidade. Na Tabela 1 é possível verificar tais métodos de forma resumida.

Tabela 1 - Métodos de monitoramento de ferramentas de corte			
Método	Procedimento	Medição	Transdutor/Sensor
DIRETO	Óptico	Contorno ou posição da aresta de corte (região desgastada)	Câmera eco; sensor de fibra óptica; microscópio
	Perda volumétrica global da ferramenta	Tamanho e concentração de partículas desprendidas da ferramenta no cavaco	Análise via radioatividade: espectrofotômetro e cintilador; análise eletroquímica
	Resistência da junção	Alterações na resistência elétrica da junção ferramenta-peça	Voltímetro
	Tamanho da peça	Dimensão da peça	Micrômetros; transdutor: óptico, pneumático, ultrassom, eletromagnético
	Distância ferramenta-peça	Distância entre a peça e a ferramenta ou suporte	Micrômetro; transdutor indutivo (LVDT), capacitivo ou ultrassom
	Força de usinagem	Alterações no comportamento da força	Dinamômetros: piezelétricos ou resistivos (<i>strain-gage</i>); sensor de torque no eixo-árvore
	Emissão acústica	Ondas de deformação elástica	Transdutor piezelétrico
INDIRETO	Som	Ondas acústicas	Microfone
	Vibração	Oscilações da ferramenta e/ou suporte	Acelerômetro piezelétrico
	Temperatura	Variação da temperatura na região de corte	Termopar; pirômetro; reflexão da superfície do cavaco ou coloração
	Potência	Potência ou corrente consumida no motor (avanço ou rotação)	Amperímetro; sensor de corrente; sensor de potência
	Acabamento da superfície usinada	Mudanças na rugosidade da superfície	Rugosímetro; laser, métodos ópticos: sensor de fibra óptica. câmera eco

Fonte: (SOUZA, 2015).

Os limites para o desgaste da ferramenta de corte de aço-rápido, metal duro e cerâmica são qualificados pela norma ISO 3685 (1993), utilizando os seguintes parâmetros:

- Desgaste de Flanco médio (VB_B) = 0,30mm;
- Desgaste de Flanco máximo ($VB_{m\acute{a}x}$) = 0,60mm;
- Profundidade de cratera (KT) = $0,60 + 0,3 F_c$;
- Desgaste de entalhe (VB_N) = 1,00mm;
- Falha catastrófica.

Não existe um consenso da literatura em relação à classificação dos mecanismos de desgaste. Segundo alguns autores, existem pelo menos seis diferentes processos de desgaste que podem acontecer nas ferramentas de corte: deformação plástica superficial por cisalhamento a altas temperaturas; deformação plástica da aresta de corte sob altas tensões de compressão; desgaste difusivo; desgaste por aderência e arrastamento; desgaste abrasivo; e desgaste de entalhe. Este último não é propriamente um mecanismo, mas sim um tipo de desgaste, conforme mencionado anteriormente, isto porque não se sabe com exatidão o mecanismo que o provoca. Portanto, é comum tratar este tipo de desgaste como um mecanismo (ISO, 1993; MACHADO e SILVA, 1999). Diniz et al. (1999), no entanto, citam como fenômenos causadores dos desgastes da ferramenta: a aresta postiça de corte (APC); a abrasão mecânica; a aderência; a difusão; e a oxidação.

Além dos desgastes, podem ocorrer avarias em uma ferramenta de usinagem devido a: deformação plástica da aresta de corte, martelamento dos cavacos, lascamento, trincas e quebras. A deformação plástica da aresta de corte é causada pela elevada pressão aplicada à ponta da ferramenta, aliada à alta temperatura, o que pode causar a deformação da aresta. O martelamento ocorre quando a parte da aresta de corte que não está em uso é danificada pelo martelamento de cavacos e a provável causa é o desvio dos cavacos contra a aresta de corte. O lascamento consiste na retirada, durante o processo de corte, de pequenas partículas da ferramenta (GAMA, 2014).

A evolução do desgaste pode levar à quebra da ferramenta, embora isso possa acontecer devido a outros fatores como: ferramenta muito dura, carga excessiva sobre a ferramenta e corte interrompido. (DINIZ et al., 2001). As trincas, por sua vez, são causadas pela variação da temperatura e/ou pela variação dos esforços mecânicos, como acontecem nos cortes interrompidos (GAMA, 2014).

A experiência mostra que dentre os parâmetros de corte, o que mais influencia o desgaste é velocidade de corte seguida pelo avanço e pela profundidade de usinagem. A velocidade de corte é a principal responsável pela temperatura na região de formação de cavacos. Isso se deve ao fato de aumentar diretamente a potência de corte, a velocidade de cisalhamento, além de aumentar a velocidade relativa na interface cavaco-ferramenta. Esses fatores culminam com um acentuado aumento na temperatura. O aumento do avanço produz efeitos semelhantes, porém em proporções menores, da mesma forma que a profundidade

de usinagem. Por essas razões, a velocidade de corte é principal responsável pela ocorrência e modificações nos mecanismos de desgaste.

A Figura 5, elaborada por Sandvik (2019), ilustra os principais tipos de desgaste de ferramentas de corte bem como a descrição das causas.

Figura 5 - Tipos de desgastes em ferramentas de torneamento

Forma do Dano da Ferramenta	Causa	Sugestão de Solução
Desgaste Frontal 	- Classe é muito tenaz. - Velocidade de corte é muito alta. - Ângulo de folga é muito pequeno. - Avanço é extremamente baixo.	- Classe com alta resistência ao desgaste. - Reduzir a velocidade de corte. - Aumentar ângulo de folga. - Aumentar o avanço.
Craterização 	- Classe é muito tenaz. - Velocidade de corte é muito alta. - Avanço é muito alto.	- Classe com alta resistência ao desgaste. - Reduzir a velocidade de corte. - Diminuir o avanço.
Micro Lasca 	- Classe é muito dura. - O avanço é muito alto. - É necessário uma aresta de corte mais resistente. - É necessário maior rigidez de suporte e fixação.	- Classe com alta tenacidade. - Diminuir o avanço. - Aumente a preparação da aresta (Troque o honed por chanfros) - Use um tamanho de haste maior.
Quebras 	- Classe é muito dura. - Avanço é muito alto. - É necessário uma aresta de corte mais resistente. - É necessário maior rigidez de suporte e fixação.	- Classe com alta tenacidade. - Diminuir o avanço. - Aumente a preparação da aresta (Troque o honed por chanfros) - Use um tamanho de haste maior.
Deformação Plástica 	- Classe é muito tenaz. - Velocidade de corte é muito alta. - Profundidade de corte e avanço são muito grandes. - Temperatura de usinagem é muito alta.	- Classe com alta resistência ao desgaste. - Reduzir a velocidade de corte. - Diminua profundidade de corte e avanço. - Classe com alta condutividade térmica.
Aresta Postiça 	- Velocidade de corte é baixa. - Geometria pouco positiva. - Classe não aplicável	- Aumente a velocidade de corte. (Para aço 1045, velocidade de corte 80m/min.) - Aumente o ângulo de folga - Classe com baixa afinidade. (Classe de cobertura e cermet)
Trincas Térmicas 	- Dilatação ou contração devido à temperatura da usinagem. - Classe é muito dura. *Especialmente em fresamento.	- Usinagem sem refrigeração. (Para usinagem com refrigeração, inunde a peça usinada com líquido refrigerante) - Classe com alta tenacidade.
Entalhe 	- Superfícies duras ou não usinadas, peças coquilhadas e camada endurecida pela usinagem. - Fricção causada pela forma pontiaguda do cavaco. (Causada por pequenas vibrações).	- Classe com alta resistência ao desgaste. - Aumente o ângulo de ataque para melhorar a geometria de corte.

Lascamento		- Aresta postiça e adesão. - Evacuação de cavacos ruim.	- Aumente a ângulo de ataque para melhorar a geometria de corte. - Aumente o bolsão de cavacos.
Quebra do Desgaste Frontal *Dano característico de CBN E PCD		Dano devido a falta de resistência de uma aresta de corte curva.	- Aumente a preparação da aresta. - Classe com alta tenacidade.
Quebra da Craterização *Dano característico de CBN E PCD		- Classe é muito tenaz. - Esforço de usinagem é muito alto e causa alta temperatura de usinagem.	- Diminua a preparação da aresta. - Classe com alta tenacidade ao desgaste.

Fonte: (SANDVIK, 2019).

2.3 Monitoramento do desgaste da ferramenta de corte

O cenário da indústria da usinagem é complexo, caracterizado pela concorrência extrema, por margens operacionais estreitas e por um mercado com clientes cada vez mais exigentes. Além disso, os desafios técnicos e ambientais impostos por requisitos complexos de formas, altíssimos parâmetros de usinagem, introdução de novos materiais e exigências ambientais em busca de produções cada vez mais sustentáveis, tornam o mercado da usinagem ainda mais conflitante e paradoxo (KARPAT & ÖZEL, 2007; ARANTES, 2007; SINGH & RAO, 2007; CUS & ZUPERL, 2006).

Uma maneira de se determinar o momento exato da troca de uma ferramenta de corte é adotar o critério de final de vida para esta, valor máximo e médio para o desgaste do flanco, valor da profundidade para o desgaste de cratera, nível de vibração do conjunto, potência consumida, distância percorrida pela ferramenta durante o corte, dentre outros. Independentemente do método escolhido, a medição da evolução da intensidade destes valores torna-se necessária.

Para Pontes (2006), o monitoramento do desgaste da ferramenta é fundamental para a manutenção da qualidade do produto que está sendo usinado, para o aumento de produtividade e a diminuição dos custos no processo produtivo.

Existem diversos sistemas de medição do desgaste das ferramentas de corte que, conforme já citado, são classificados em diretos e indiretos. Os métodos diretos de medição são bem confiáveis, e neles são utilizados diversos sensores, todavia apresentam um problema clássico que impacta diretamente na produtividade do processo, somente podem ser utilizados quando a ferramenta está fora de operação (SILVA, 2010; LI; TSO, 1999), ou seja, a parada da máquina para verificar a condição da ferramenta se faz necessária.

A principal dificuldade dos métodos indiretos de monitoramento é estabelecer uma relação entre o que está sendo medido e o sinal adquirido, além da eliminação da interferência dos ruídos que vem junto com o sinal. Rangwala e Dornfeld (1991) afirmam que a maioria dos

métodos indiretos tem baixa sensibilidade aos efeitos micro mecânicos da deformação e do processo de atrito que ocorrem na zona de cisalhamento.

Embora existam diversas técnicas para o referido monitoramento, não se pode enxergá-las de forma simplista, ou seja, é necessário entender as variáveis do processo e observar alguns requisitos mínimos relativos aos sensores no monitoramento indireto, conforme citado por Toledo (2015):

- O (s) sensor (es) deve (m) estar o mais próximo possível do ponto de corte;
- A rigidez da ferramenta não deve ser reduzida para a introdução do sensor;
- Não deve ser reduzido o espaço de trabalho;
- Não se deve alterar as condições de corte;
- Os sensores devem ser livres de desgaste e manutenção, facilmente substituíveis e terem baixo custo;
- A função dos sensores deve ser independente da ferramenta e/ou peça;
- As características metrológicas devem ser adequadas;
- Devem resistir à sujeira, aos cavacos e às influências mecânicas, eletromagnéticas e térmicas; e
- A transmissão de sinal deve ser confiável.

Com o intuito de mitigar os problemas de parada da máquina para avaliação dos parâmetros de vida da ferramenta, diversas soluções para o monitoramento *on-line* do desgaste vêm sendo desenvolvidas, que podem ser baseadas em: medições da força de corte, da emissão acústica, da temperatura de corte, da vibração, da corrente elétrica, das dimensões da peça, dos sinais ultrassônicos e óticos, do acabamento superficial (LI; TSO, 1999; TOLEDO, 2015).

Medir as forças envolvidas durante o corte pode ser uma das soluções para o acompanhamento do desgaste da ferramenta. Conhecer a força de usinagem que age na ferramenta e o estudo do comportamento de suas componentes é de grande importância, não apenas porque a potência requerida para executar o corte pode ser estimada, como também porque elas devem ser consideradas no projeto das máquinas, das ferramentas e de seus elementos. Ela pode ser responsável direta pelo colapso da ferramenta de corte por deformação plástica do gume, além de influenciar no desenvolvimento de outros mecanismos e processos de desgaste.

Dentre as diversas variáveis de um processo de usinagem, as forças envolvidas no corte são muito pesquisadas, isto em função de duas razões, a primeira é a facilidade de se medir as forças de usinagem por dinamometria, um método amplamente conhecido; e a segunda é que há um “consenso” de que a força de usinagem é um bom parâmetro indicador sobre desgaste, quebra ou outras anomalias referentes à ferramenta (TOLEDO, 2015).

Porém, como desvantagem, Anicic et al. (2018) sugerem cuidado ao determinar as condições de usinagem, pois dependendo quais forem os valores escolhidos, mesmo com o aumento do desgaste da ferramenta, as forças terão uma variação pouco significativa, impactando diretamente nos resultados.

Vários estudos que visam a medição das forças de usinagem são encontrados na literatura, todavia trata-se de um processo dispendioso, e que também possui limitações, problemas de confiabilidade do sensor em ambiente severo, restrições de *layout* (espaço, peso) e interferência no desempenho do corte, são típicos deste tipo de método (LI et al., 2004). Outro problema em medir as forças de usinagem é que o sinal medido pode ser severamente afetado pelas vibrações de ressonância no dinamômetro (SILVA, 2010). Neste cenário, o sensor que mais se destaca é o dinamômetro piezelétrico. Ele é baseado no fato de que cristais piezoelétricos, uma vez comprimidos, produzem um sinal elétrico proporcional às forças aplicadas a eles. Contudo, os custos destas soluções, por meio das medições com uso dos dinamômetros, são relativamente caros.

Em relação aos métodos baseados na Emissão Acústica, segundo Ravindra; Srinivasa; Krishnamurthy (1993), a emissão acústica (EA) pode ser definida como sendo ondas de tensão elástica resultante da rápida liberação de energia de uma ou mais fontes dentro de um material submetido a estímulo externo. Estas ondas vibracionais se devem a um rearranjo interno na estrutura cristalina dos metais e a frequência de propagação normalmente está acima de 20 kHz (DOLINSEK; KOPAC, 1999). Estas ondas de tensão produzem deslocamentos na superfície do material, podendo então ser detectadas por sensores piezelétricos que transformam estes deslocamentos em sinais elétricos.

Os sinais de emissão acústica classificam-se em dois tipos: o sinal contínuo e sinal de pico (transiente) (BLUM & INASAKI, 1990; MATSUMOTO & DINIZ, 1997). O sinal de pico é caracterizado por um pico de grande amplitude e pequena duração, enquanto o sinal contínuo tem amplitudes relativamente menores e maior duração. No caso da usinagem, o sinal contínuo normalmente está associado às deformações plásticas em materiais dúcteis e o sinal de pico, oriundos da propagação de trincas e impactos do cavaco.

Já em relação a técnicas de medição por meio da temperatura, grandes quantidades de calor são geradas na usinagem. A energia mecânica do processo é transformada em calor durante o corte através da deformação plástica no cavaco e o atrito entre a ferramenta e a peça. As altas temperaturas resultantes nas imediações da aresta de corte têm influência direta nas taxas e nos mecanismos de desgaste, no atrito entre o cavaco e a ferramenta e entre a ferramenta e a superfície de folga (DIMLA, 2000).

A remoção do calor gerado é feita através do cavaco, da peça e da ferramenta. Como a distribuição de temperatura não é uniforme, não é fácil aferir a quantidade exata de calor que é passada à ferramenta. Porém, a quantidade de calor removida pelo cavaco, do total

gerado, é considerada na literatura como cerca de 80 a 90%, o que implica que 10%, ou até menos, é absorvido ou dissipado pela ferramenta e a peça (BOOTHROYD, 1975). Se nenhum fluido refrigerante for empregado, a perda de calor para o ambiente é insignificante. Portanto, a medida da temperatura durante o corte é importante na investigação do comportamento da ferramenta, pois permite controlar os fatores que influenciam no seu uso, tais como vida e desgaste (DE CARVALHO, 2005).

Quanto aos métodos indiretos por meio da análise de vibrações, na usinagem as vibrações são consequências das variações cíclicas nos componentes dinâmicos das forças de corte (DIMLA, 2000). Normalmente, estas vibrações começam como pequenas trepidações (*chatter*), responsáveis pelo aspecto ondulado na superfície usinada e por irregularidades na espessura do cavaco e, posteriormente, progride para a vibração propriamente dita.

Dimla (2000), em um trabalho de monitoramento do desgaste de uma ferramenta no torneamento, verificou que, no domínio do tempo, a amplitude dos sinais de vibração não era um bom indicador da evolução do desgaste, mas distinguiam claramente fraturas e lascamento. No domínio das frequências, as vibrações captadas na direção de corte (eixo z) se mostraram mais sensíveis às condições da ferramenta que os outros eixos, enquanto o eixo x foi a que apresentou a pior correlação.

Por fim, o monitoramento da usinagem através dos parâmetros elétricos do motor é um método bastante simples, de baixo custo e não intrusivo, pois fica instalado perto do motor e longe da região de corte. Segundo Dan (1990), durante o processo de corte, a potência consumida pelo motor principal da máquina aumenta com o desgaste da ferramenta de corte. Assim, quanto maior o desgaste da ferramenta, maior o esforço de corte e, conseqüentemente, maior a corrente necessária ao processo. Portanto, a vida da ferramenta pode ser monitorada através da análise do comportamento dos sinais elétricos do motor da máquina.

Medir os parâmetros elétricos do motor é medir indiretamente os esforços de corte (FERRARESI, 2006). Este fato se explica, pois, o motor da máquina-ferramenta, para gerar a potência mecânica necessária para executar uma operação de usinagem, consome corrente elétrica em uma quantidade diretamente proporcional à potência e as forças de corte geradas.

O monitoramento através dos parâmetros elétricos do motor apresenta como principais vantagens (DOS SANTOS, 1988):

- É uma técnica pouco intrusiva;
- Baixo custo, principalmente se comparado com outros sistemas de monitoramento;
- Tecnologia e operação relativamente simples;
- Fácil instalação, não necessitando nenhum projeto especial para sua adaptação;

- Não requer muito espaço, podendo ser instalado no armário de alimentação da máquina;
- Pode ser aplicado à maioria dos motores elétricos (AC e DC);
- Pode realizar o monitoramento em processo (*on-line*);
- É um bom sistema de monitoramento para operações de fresamento, pois os valores de potência são pouco sensíveis aos choques na entrada da ferramenta.

Como principais deficiências deste sistema podem-se destacar:

- Baixa sensibilidade ao estado de desgaste da ferramenta, sendo pouco diferenciados os valores de potência entre uma ferramenta nova e uma já desgastada. Porém, quando a ferramenta apresenta elevados níveis de desgaste, este sistema de monitoramento é mais sensível (BRAGA, 1992).
- Como nem toda potência elétrica consumida é transformada em potência mecânica (devido a perdas com atrito e com inércia do sistema), há uma fonte de incerteza adicional, externa, adicionada ao sistema de monitoramento.

Caldeirani Filho (1998) realizou um trabalho de monitoramento por meio da aquisição do sinal de corrente elétrica e de emissão acústica no processo de fresamento. Segundo o autor, a evolução do sinal de corrente elétrica apresentou um comportamento bastante similar à evolução do desgaste ao longo do percurso de avanço. O autor também sugere que a corrente elétrica do motor pode ser, aliada a outros sinais, um bom parâmetro de entrada de uma rede neural a fim de estabelecer o fim de vida da ferramenta.

Os sinais de corrente elétrica são captados pelo sensor de efeito Hall, que é instalado em torno dos condutores que alimentam o motor. Estes sinais são transformados em tensão elétrica, proporcional à corrente no primário do sensor, para a posterior entrada no conversor analógico-digital (A/D). Neste caso, a placa tem a função de transformar os sinais analógicos em digitais para serem armazenados e analisados no microcomputador (MATSUMOTO; DINIZ, 1997).

Zhang et al. (1994) usaram um sensor de efeito Hall para medir a corrente fornecida ao motor do fuso de uma fresadora e um dinamômetro para mensurar as forças de corte. Com o auxílio de algoritmos de computador, foram desenvolvidos modelos matemáticos dessas grandezas, a fim de compará-las com as que estavam sendo medidas. O estudo concluiu que, para diagnóstico da quebra da ferramenta, as medições de correntes eram bem mais confiáveis que as medições da força de usinagem.

Durante o procedimento de corte, a corrente e a potência do motor estão relacionadas ao torque e à componente tangencial da força de corte. A utilização de uma ferramenta mais

afiada vai exigir um menor torque e, conseqüentemente, uma menor potência do motor (LI, 2005; SHAO; WANG; ZHAO, 2004). Esta potência possui um comportamento proporcional, ou seja, à medida que aumenta o desgaste da ferramenta, ocorre uma elevação da potência consumida.

Este fato ocorre devido à evolução do desgaste de flanco, que ocasiona um aumento da área de contato entre a ferramenta e a peça, mesmo diminuindo a profundidade do corte (NAVES, 2009).

Conforme apontado por Silva (2010), o aumento da área de contato entre ferramenta e peça em função do desgaste faz com que o atrito se eleve o que inevitavelmente altera os valores de potência e as forças necessárias para que haja o corte efetivo. O efeito do aumento de área, ocorrido por conta do desgaste de flanco, parece prevalecer sobre a redução da resistência do material usinado devido ao aumento de temperatura. Logo, há um acréscimo nos valores da potência de corte consumida durante a usinagem.

Para Khajavi e Nasernia (2016), dentre os vários métodos utilizados, a medição da corrente elétrica é considerada um dos meios mais eficazes de monitoramento de desgaste de ferramentas nos processos de usinagem. Entretanto, para Kim (2002) e outros pesquisadores, todos os parâmetros relacionados ao aumento da corrente elétrica do motor e o fim da vida útil da ferramenta ainda não foram completamente desvendados e pequenas variações das condições de usinagem podem alterar os valores da corrente, o que impacta os diagnósticos.

Shao, Wang e Zhao (2004) apontam que a determinação da condição da ferramenta por meio da potência de corte durante o processo de usinagem é baseada no fato de que uma ferramenta nova exigirá menos potência do motor elétrico do que uma ferramenta usada, uma vez que o aumento no consumo de energia de corte se deve ao atrito gerado em função do aumento da área de contato entre a peça e a ferramenta. Ressalta-se que o consumo de energia de corte também é afetado pelas condições de corte e geometria da ferramenta.

Comparado com outros métodos de monitoramento, como emissão acústica e vibração, o método de avaliação de desgaste da ferramenta por meio do monitoramento da corrente não requer equipamentos de medição caros ou que apresentem configurações complicadas (SHI et al., 2018).

2.4 Microcontroladores

Os microcontroladores são dispositivos constituídos por um processador, pinos de entradas/saídas e memória. Por meio da programação destes podem-se definir suas saídas e entradas, baseado nas entradas ou em um programa interno (MARTINS, 2005).

Basicamente, um microcontrolador é um circuito integrado compacto projetado para controlar uma operação específica em um sistema embarcado. Um microcontrolador típico inclui processador, memória e pinos de entrada/saída (E/S) em um único chip. Geralmente são projetados para serem usados sem componentes adicionais pois podem interagir diretamente com sensores e outros componentes.

Também conhecido como um controlador embarcado ou microcontrolador (MCU, abreviação do termo em inglês *Microcontroller Unit*), os microcontroladores são encontrados em vários setores e aplicações, incluindo automação residencial, manufatura, robótica, automação automotiva, iluminação, energia, automação industrial, comunicações e Internet das Coisas.

Atualmente, o mercado conta com uma infinidade de tipos e modelos de microcontroladores, dentre os mais conhecidos pode-se citar: Arduino, PIC, ESP, NodeMCU e Raspberry.

A popularização do conceito de IoT é recente, bem como o aumento no número de adeptos. O custo dos dispositivos foi significativamente reduzido, assim como seu tamanho e peso. Atualmente, a grande maioria dos módulos são dispositivos de código aberto e sem restrições em sua proposta de operação e programação. Nesse contexto, o microcontrolador NodeMCU da *Espressif Systems* tem se apresentado como uma ótima alternativa para aplicação IoT. Seu baixo custo e excelente performance tem chamado atenção de adeptos (ALLAFI; IQBAL, 2017).

A escolha adequada de um microcontrolador, para qualquer projeto, é de suma importância. Para que seja possível realizar a correta seleção do dispositivo, deve-se considerar a arquitetura proposta, consumo, periféricos, velocidade e capacidade de processamento, tamanho e escalabilidade. Para Garcia (2018), o microcontrolador é um computador em tamanho reduzido, implantado em um único chip, para a realização de funções específicas.

De origem chinesa, da fabricante *Espressif Systems*, o ESP 32 é um microcontrolador de 12 bits e com tensão de funcionamento de 3,3 Volts (CURVELLO, 2015). Com relação aos pinos de entradas e saídas, esse microcontrolador contém 17 interfaces que podem ser utilizados como entradas ou saídas, além de conter 4 interfaces de *Pulse Width Modulation* (PWM) e uma interface analógica com dez bits de precisão (OLIVEIRA, 2017).

Para facilitar a utilização desse chip, vários fabricantes produzem placas e módulos de desenvolvimento, variando de acordo com seu tamanho, quantidade de pinos e tipo de comunicação com o computador. Os modelos de módulos e placas de desenvolvimento que utilizam o microcontrolador ESP32 são:

- a) ESP-01: É o módulo mais simples disponível, contendo em sua composição o microcontrolador, uma memória externa de 512 KB ou 1 MB, e 8 pinos que são

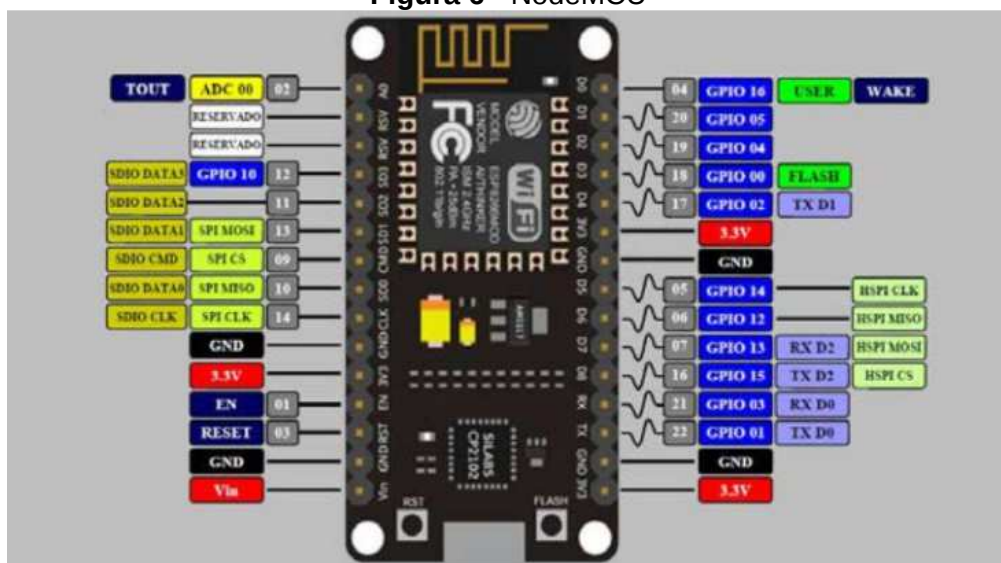
compostos por alimentação de 3,3 Volts e comunicação *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter* (UART) (OLIVEIRA, 2017).

- b) ESP 12: Módulo construído com o intuito de ser integrado em placas de circuitos impressos, possibilitando, assim, a integração de componentes extras, como conversor USB-serial para facilitar a comunicação com o computador para gravar o código fonte, ou até mesmo regulador de tensão que permite a utilização de fontes de alimentação externas, como a conexão direta com o USB (*Universal Serial Bus*) do computador, uma vez que esta fornece 5 Volts e o módulo tem tensão nominal máxima de 3,3 Volts. Existem dois tipos desse módulo, o ESP-12E e ESP-12F, que variam somente na localização dos pinos.

A plataforma de desenvolvimento mais utilizada com a aplicação desse módulo é a NodeMCU, pois, além de ser possível utilizar o mesmo ambiente de desenvolvimento do Arduino, ela também permite o desenvolvimento de projetos utilizando a linguagem Lua, que nasceu e cresceu no Grupo de Tecnologia em Computação Gráfica da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, combinando programação procedural com tabelas associativas e semântica extensível, se destacando pela fácil aprendizagem e integração, além de ser gratuita (OLIVEIRA, 2017).

A NodeMCU é uma placa de desenvolvimento que abrange todas as funcionalidades do microprocessador ESP32, porém com conversor serial e regulador de tensão próprio. Além disso, conta com 11 pinos digitais para entrada e saída de sinais e um pino analógico, permitindo comunicação *Inter-Integrated Circuit* (I2C), *Serial Peripheral Interface* (SPI) entre outros (OLIVEIRA, 2017). O diagrama esquemático do dispositivo pode ser observado na Figura 6.

Figura 6 - NodeMCU



Fonte: Adaptado de Ifuturetech (2018).

2.5 Computação em nuvens

A proposta básica da computação em nuvem é que a provisão de recursos computacionais seja de responsabilidade de empresas especializadas ou que seja abstraído o fornecimento dos mesmos em níveis que apenas especialistas venham se preocupar em gerenciá-los e mantê-los, e ainda os mesmos recursos sejam disponibilizados como serviços (CARR, 2008).

Neste contexto, a provisão de recursos precisa ser vista em várias camadas, onde cada camada representa um gênero específico de recursos que podem ser providos de diferentes formas. Esta proposta é extremamente desafiadora porque representa uma grande quebra de paradigma, visto que até pouco tempo atrás, empresas e pessoas físicas utilizavam exclusivamente os recursos computacionais de forma proprietária, ou seja, os donos são responsáveis pela gestão, manutenção e atualização dos recursos computacionais que dispõem.

A nuvem pode ser considerada uma metáfora para a internet, sendo baseada em abstrações que ocultam a complexidade de infraestruturas, onde cada parte é disponibilizada como serviço e hospedada em centros de dados que utilizam *hardware* compartilhado para computação e armazenamento (BUYA, 2009).

A computação em nuvem pode ser definida, de forma simplificada, como um paradigma de infraestrutura que permite o estabelecimento do SaaS (*software* como serviço), sendo um grande conjunto de serviços baseados na *web* com o objetivo de fornecer funcionalidades, que até então, necessitavam de grandes investimentos em *hardware* e *software*, e que funciona através de um modelo de pagamento pelo uso.

Um modelo de computação onde as capacidades relacionadas a tecnologias da informação são escaláveis e elásticas, sendo que elas são providas como serviços para os usuários finais através da internet conforme Cearley (2009).

Após estudo no qual foram consideradas várias definições distintas para o conceito de computação na nuvem, os autores em (VAQUERO et al., 2008) chegaram à definição de que nuvens são grandes repositórios de recursos virtualizados, tais como *hardware*, plataformas de desenvolvimento e *software*, que são facilmente acessíveis. Além disto, estes recursos podem ser configurados dinamicamente de modo a ajustar-se a diferentes cargas de trabalho com a intenção de otimizar sua utilização. O modelo de cobrança utilizado para a exploração destes repositórios está baseado em pagamento pelo uso. Um ponto de vista que considera as características de *hardware* é fornecido em Armbrust (2009). Nesta obra, a computação em nuvem é definida como um paradigma com a ilusão de recursos infinitos, que estarão disponíveis sempre que houver necessidade. Ressalta-se que poucos investimentos iniciais

em infraestrutura são necessários e existe a possibilidade de contratação de recursos computacionais por prazos curtos e específicos.

Para Buyya (2008), uma nuvem é um tipo de sistema paralelo e distribuído que consiste em uma coleção de computadores virtualizados e interconectados que são provisionados de forma dinâmica e apresentados como um ou mais recursos computacionais unificados. Estes recursos são disponibilizados e controlados através de acordos relacionados aos serviços que são estabelecidos entre um prestador e um consumidor sendo definidos a partir de negociações entre as partes.

O termo computação em nuvem, segundo Taurion (2009), surgiu em 2006 em uma palestra de Eric Schmidt, da Google, sobre como sua empresa gerenciava seus *data-centers*. Hoje, a computação em nuvem se apresenta como o cerne de um movimento de profundas transformações do mundo da tecnologia.

A nuvem é uma representação para a internet ou infraestrutura de comunicação entre componentes arquiteturais, baseada em uma abstração que oculta à complexidade da infraestrutura. Cada parte desta infraestrutura é provida como um serviço, e estes serviços são normalmente alocados em *data centers*, utilizando *hardware* compartilhado para computação e armazenamento (SOUSA, 2009).

Encerrando este tópico, apresenta-se a definição do NIST (*National Institute of Standards and Technology - USA*), onde a computação em nuvem representa um conveniente modelo de acesso a um conjunto compartilhado de recursos computacionais configuráveis, tais como redes, servidores, armazenamento, aplicações e serviços, que podem ser disponibilizados rapidamente. Para isto, o esforço de gerenciamento e interação com o provedor dos serviços é mínimo ou nenhum.

2.6 Internet das coisas (IoT – Internet of Things)

O termo IoT, ou Internet das Coisas, refere-se à rede coletiva de dispositivos conectados à tecnologia que facilita a comunicação entre os dispositivos e a nuvem, bem como entre os próprios dispositivos. O advento de *chips* de computador baratos e telecomunicações de alta largura de banda tem possibilitado que uma vasta gama de dispositivos seja conectada à Internet. Isso significa que dispositivos do dia a dia, como escovas de dentes, aspiradores, carros e máquinas, podem usar sensores para coletar dados e responder de forma inteligente aos usuários.

O desenvolvimento de sistemas de monitoramento é uma tarefa complexa que envolve diversos conhecimentos tecnológicos em vários níveis e em diversas tecnologias. É nesta conjuntura que se torna viável o uso da Internet das Coisas (IoT do inglês *Internet of Things*), onde diversos dispositivos são conectados. Aplicações IoT são capazes de adicionar

“inteligência” em qualquer ambiente, objeto, eletrodoméstico etc. Em níveis de maior complexidade e segurança, poderão ser utilizados em aplicações industriais, a técnica é conhecida como IIoT (*Industrial Internet of Things*).

Al-Fugaha et al. (2015) define que os elementos básicos para a construção de aplicações IoT envolvem identificação, sensores/atuadores, comunicação, processamento de dados, serviços e semântica.

A identificação tem a função de gerar uma identidade para que um objeto tenha uma espécie de código único dentro da rede. Neste contexto, poderão ser utilizados dois tipos de Protocolo da Internet, a versão 6 ou 4, respectivamente IPv6 ou IPv4, do inglês *Internet Protocol* v6 ou v4. Os sensores por sua vez, serão responsáveis por coletar as diversas informações e enviá-las a um banco de dados.

A fim de realizar a comunicação entre os dispositivos, diversos protocolos de aplicações e comunicação foram criados (SANTOS et al., 2016). Dentre os diversos protocolos de aplicação, destacam-se o *Constrained Application Protocol* (CoAP) e o *Message Queue Telemetry Transport* (MQTT). Estes são ideais para dispositivos com baixo poder de processamento e que necessitam de baixo consumo de energia (Santos et al., 2016). Quanto aos protocolos de comunicação, os padrões ZigBee e *Bluetooth Low Energy* (BLE) são interessantes para aplicações IoT, principalmente por pouparem energia dos dispositivos (SANTOS et al., 2016).

O padrão Wi-Fi é muito comum em nosso dia a dia estando presente em praticamente todas as residências, indústrias, comércios, hospitais e escolas. Entretanto, tem a limitação do consumo de energia que é alto, tornando-o por vezes, inadequado para esse tipo de aplicação (SANTOS et al., 2016). Porém, alguns dispositivos criados podem resolver esse problema, como por exemplo o ESP32, que viabiliza a utilização do Wi-Fi em aplicações IoT.

Por meio dos protocolos de aplicação e comunicação, é possível enviar os dados coletados por meio dos sensores para um servidor na nuvem. Nesse local esses dados são armazenados, permitindo que aplicações clientes vinculados aos mesmos tenham acesso às informações em tempo real ou históricas sempre que desejarem.

As unidades de processamento (por exemplo, microcontroladores e microprocessadores) e aplicações de *software* representam o “cérebro” e a capacidade computacional da IoT (AL-FUQAHA et al., 2015). Diversos *hardwares* foram desenvolvidos para suportar aplicações IoT, como por exemplo Arduino, UDOO, Intel Galileo, Raspberry PI, BeagleBone, entre outros.

Uma aplicação IoT deve disponibilizar uma gama de serviços. Dentre eles destacam-se os serviços que permitam a identificação única de cada objeto; serviços que coletam e tratam medições sensoriais brutas; serviços que tomam decisões e atuam de acordo com os dados coletados; e serviços de colaboração e inteligência, que devem estar disponíveis em

qualquer momento que eles forem necessários, assim como para qualquer um e em qualquer lugar (AL-FUQAHA et al., 2015).

Por fim, no contexto de IoT, refere-se à habilidade de extrair conhecimento de diferentes dispositivos para fornecer os serviços solicitados (AL-FUQAHA et al., 2015).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, são apresentadas as funcionalidades do sistema e sua arquitetura, assim como as tecnologias, *hardware*, algoritmos, cenários e métodos experimentais utilizados para o desenvolvimento do trabalho.

A solução desenvolvida é composta por *hardware* e *software*. O dispositivo é composto por um ESP32 conectado a um sensor de efeito Hall não invasivo SCT013 20 A / 1 V. A finalidade do *hardware* é obter as informações de corrente elétrica durante a usinagem, pré-processar os dados e enviá-los para o servidor, utilizando o protocolo *Message Queue Telemetry Transport* (MQTT), bem como armazenar os dados e disponibilizá-los em um painel visual (*dashboard*).

Isso torna possível, após o tratamento dos sinais adquiridos, a avaliação referente ao desgaste de ferramentas de corte de modo *on-line*.

3.1 Sistema de aquisição de dados

Um sistema de aquisição de dados é um conjunto de dispositivos e *software* projetados para coletar, armazenar e processar informações provenientes de sensores, instrumentos ou outros dispositivos de medição. Esse sistema tem como objetivo obter dados precisos e confiáveis de diferentes variáveis físicas, como temperatura, pressão, velocidade, corrente elétrica, entre outras, de forma contínua ou em intervalos regulares. O sistema de aquisição de dados pode envolver a utilização de sensores específicos, *hardware* de aquisição, interfaces de comunicação e *software* de análise e visualização dos dados coletados. Ele é amplamente utilizado em áreas como engenharia, ciência, automação industrial e monitoramento de processos, possibilitando o acompanhamento e controle efetivo das variáveis envolvidas.

3.1.1 Microcontrolador

O microcontrolador ESP32 tem se tornado uma opção popular para projetos que envolvem comunicação *Message Queue Telemetry Transport* (MQTT) ou *Hypertext Transfer Protocol* (HTTP) devido a suas várias vantagens. Além disso, o ESP32 possui conectividade Wi-Fi e Bluetooth, o que significa que pode se comunicar com outros dispositivos de forma sem fio. Isso pode ser especialmente útil em projetos que precisam enviar ou receber dados em tempo real.

O ESP32 também tem recursos de *hardware* que o tornam adequado para aplicações de IoT. O dispositivo tem um processador de dois núcleos e pode ser configurado com até

520 KB de RAM. Isso significa que o ESP32 pode lidar com várias tarefas simultaneamente, tornando-o uma opção ideal para projetos de IoT que exigem multitarefa. Além disso, o ESP32 possui uma variedade de interfaces, incluindo GPIO (*General Purpose Input/Output*), SPI (*Serial Peripheral Interface*) e I2C (*Inter-Integrated Circuit*), o que o torna compatível com uma variedade de sensores e outros dispositivos. Outra vantagem do ESP32 é a facilidade de programação. Ele pode ser programado usando a IDE Arduino, que é uma plataforma popular de desenvolvimento de código aberto. A IDE Arduino é conhecida por sua facilidade de uso e flexibilidade. Isso significa que desenvolvedores de todos os níveis podem usar o ESP32 com facilidade. Além disso, existem muitas bibliotecas disponíveis para a IDE Arduino, o que torna a programação do ESP32 ainda mais fácil.

A Tabela 2 mostra algumas diferenças entre alguns modelos de microcontroladores que podem ser utilizados.

Tabela 2 - Comparação entre os microcontroladores

Parâmetros	Arduíno UNO / NANO	NodeMCU	Wemos D1
Processador	ATMega328P	TenSilica Xtensa LX106	TenSilica Xtensa LX106
Tensão Operacional	5V	3,3V	3,3V
Clock	16MHz	80MHz	80MHz – 160MHz
Memória RAM	2KB	64KB	64KB
Memória Flash	32KB	4MB	4MB
EEPROM dedicada	1KB	-	-
Placa WiFi	-	IEEE 802.11 b/g/n	IEEE 802.11 b/g/n
Pinos Digitais de I/O	14	11	11
Pinos Analógicos	6	1	1

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em resumo, o ESP32 é uma opção atraente para projetos de IoT que envolvem comunicação MQTT. Suas capacidades de *hardware*, conectividade e facilidade de programação tornam-no uma opção popular entre os desenvolvedores, além do baixo custo de aquisição, por isso sua escolha.

3.1.2 Sensor de corrente SCT-013

O sensor de corrente SCT-013 foi desenvolvido com base no princípio físico de que todo condutor onde flui uma corrente elétrica induz ao seu redor um campo magnético proporcional a corrente elétrica que passa por ele. Cabe ressaltar que SCT é a sigla para *Split-core Current Transformer* em inglês, que traduzido significa Transformador de corrente de núcleo dividido.

A corrente elétrica alternada se comporta como uma senoíde, portanto, sua intensidade varia ao longo do tempo indo do máximo positivo ao máximo negativo. Este comportamento oscilatório possui uma frequência, sua unidade de medida é o Hertz (Hz), que equivale à frequência de um fenômeno periódico cujo período é de um segundo. Tais frequências podem sofrer variações conforme país e/ou região, podendo ser adotados parâmetros de 50 Hz ou de 60 Hz. O Brasil acata a frequência de 60 Hz como padrão.

Graças a esse comportamento, e à Lei de Faraday (também conhecida como Lei da Indução Eletromagnética), que afirma que a variação no fluxo de campo magnético através de materiais condutores induz o surgimento de uma corrente elétrica que varia ao longo do tempo e induz em uma espira uma força eletromotriz que gera uma corrente elétrica proporcional a intensidade do campo magnético, esse dispositivo torna-se muito versátil para medição de corrente elétrica.

O dispositivo tem como principal vantagem o fato de não precisar de contato elétrico com o circuito para medir a corrente elétrica alternada, isto é, não se faz necessário seccionar o circuito para realizar a ligação em série com a carga, basta apenas “envolver” um dos condutores por onde circula a corrente elétrica que os seus níveis poderão ser monitorados.

Baseado neste princípio de funcionamento, vários modelos de sensores de corrente elétrica não invasivos foram criados. A Figura 7 apresenta os parâmetros técnicos para a linha de sensores SCT-013. Cada modelo é caracterizado pela corrente máxima a ser medida (*input current*) – e o tipo de saída do sensor (*output type*).

Nota-se que somente o modelo SCT-013-000 apresenta uma variação de corrente em sua saída (de 0-50 mA), já os outros modelos apresentam saída em tensão (de 0 a 1 V). Por meio da variação destas grandezas no secundário do sensor é possível mensurar a corrente elétrica no primário.

Figura 7 - Parâmetros técnico modelos de sensores não invasivos

Model	SCT-013-000	SCT-013-005	SCT-013-010	SCT-013-015	SCT-013-020
Input current	0-100A	0-5A	0-10A	0-15A	0-20A
Output type	0-50mA	0-1V	0-1V	0-1V	0-1V
Model	SCT-013-025	SCT-013-030	SCT-013-050	SCT-013-060	SCT-013-000V
Input current	0-25A	0-30A	0-50A	0-60A	0-100A
Output type	0-1V	0-1V	0-1V	0-1V	0-1V

Fonte: (YHDC, 2019).

Em função dos valores de corrente elétrica a serem monitorados, o sensor não invasivo modelo SCT-013-020 foi escolhido para este estudo, ele apresenta uma faixa de medição de (0 a 20) A e saída em tensão de (0 a 1) V.

Para conhecer a taxa de variação, tanto da corrente elétrica, quanto da tensão pode-se realizar o quociente do valor máximo da saída pelo valor máximo da entrada. Portanto, o sensor escolhido apresenta a seguinte sensibilidade (de catálogo):

$$\frac{1}{20} \cong 0,05 \text{ V/A}$$

Isto significa que para cada um Ampere medido, seja esta variação para mais ou para menos, a variação na saída será de 0,05 V, também para mais ou para menos.

A Figura 8 ilustra o componente escolhido. Importante considerar que, de acordo com o *datasheet* do fabricante, se faz necessário um circuito eletrônico para a utilização deste sensor, que será descrito adiante.

Figura 8 - Sensor SCT-013-020

Fonte: Arquivos do autor.

3.1.3 Arquitetura e funcionalidades

A comunicação entre os sensores e a API (*Application Programming Interface*), que é uma interface de programação de aplicativos, é estabelecida para facilitar a interação e a comunicação entre diferentes programas e sistemas (MASSÉ, 2011). A API expõe um conjunto de dados estruturados e funções específicas que podem ser acessadas por outros programas, permitindo a integração e o compartilhamento de informações de forma padronizada.

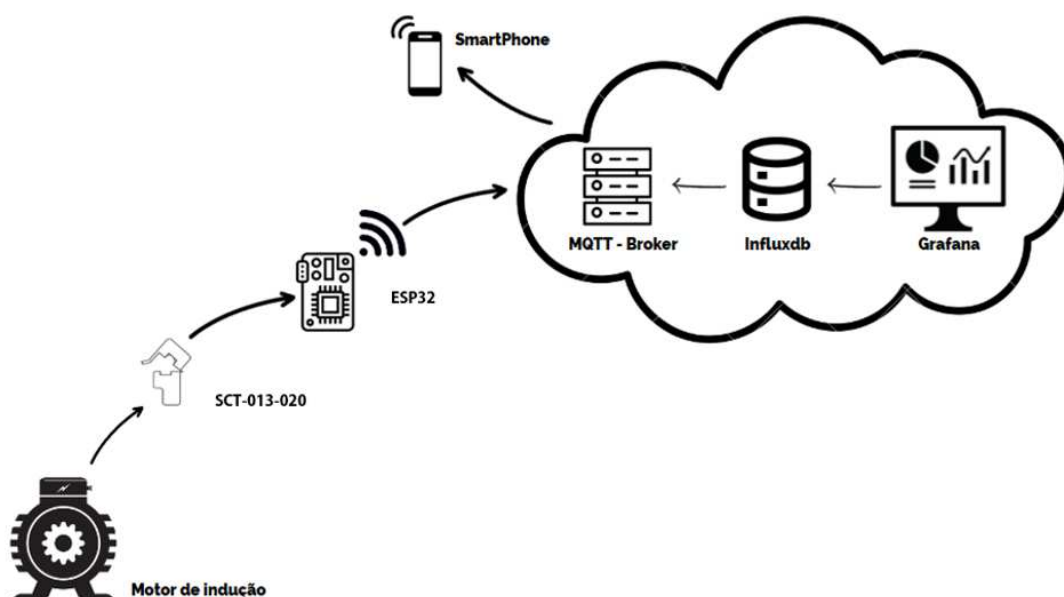
No contexto do sistema em estudo, a API desempenha um papel fundamental na comunicação entre os sensores e o restante do sistema. Ela fornece um conjunto de métodos e *endpoints* que permitem a troca de dados entre os dispositivos de medição, como o sensor de corrente não invasivo SCT013 20 A / 1 V, e o servidor ou plataforma que hospeda a API.

A API atua como um intermediário entre os sensores e o *broker* MQTT, o qual é utilizado para a comunicação no sistema. O sensor, conectado ao ESP32, envia os dados coletados utilizando o protocolo MQTT através dos tópicos previamente definidos. A API, por sua vez, está inscrita nesses tópicos e recebe os dados enviados pelos sensores.

Essa abordagem permite que a API processe e manipule os dados recebidos, realizando ações específicas com base nas informações coletadas. Por exemplo, a API pode armazenar os dados em um banco de dados, realizar análises e cálculos, enviar notificações ou acionar eventos de acordo com as condições definidas.

Portanto, a API desempenha um papel essencial na comunicação e interação entre o sensor e o sistema, proporcionando um conjunto de funcionalidades e abstrações que facilitam a integração e o compartilhamento de dados, contribuindo para a eficiência e eficácia do sistema de aquisição de dados desenvolvido (MASSÉ, 2011). A arquitetura proposta neste trabalho é ilustrada na Figura 9.

Figura 9 - Arquitetura proposta



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como o objetivo desta pesquisa é monitorar o desgaste da ferramenta durante o processo de usinagem, mais precisamente durante o corte efetivo do material, para alcançar esse propósito torna-se essencial armazenar os dados coletados, sendo o InfluxDB o sistema escolhido para essa finalidade específica.

No entanto, em virtude das limitações da interface de visualização dos dados disponibilizada pelo InfluxDB, que não oferece uma interpretação rápida e intuitiva dos dados coletados, é necessário recorrer à adoção do Grafana como solução complementar. O Grafana, por sua vez, proporciona uma visualização mais eficiente e de fácil compreensão do comportamento da corrente elétrica por meio de gráficos atualizados em tempo real.

Essa integração entre o InfluxDB e o Grafana possibilita uma análise facilitada dos dados coletados, permitindo uma avaliação mais detalhada do desgaste da ferramenta durante o processo de usinagem. Dessa forma, o Grafana desempenha um papel fundamental ao fornecer uma interface visual que otimiza a interpretação e a compreensão dos dados, possibilitando a tomada de decisões mais embasadas e assertivas no contexto do monitoramento do desgaste da ferramenta.

Por fim, também é possível o acompanhamento do valor da corrente elétrica através de um *smartphone* com sistema operacional Android, por meio do aplicativo MQTTDash, disponível na *Play Store* para *download* gratuito. Portanto, como opção é possível visualizar os dados via aplicação *web* ou *mobile*.

3.1.4 *Cloud computing* (Computação em nuvem)

Como pode ser observado na Figura 9, o projeto proposto nesse trabalho inclui computação em nuvem. Tal recurso tem se tornado cada vez mais essencial para o desenvolvimento das atividades relacionadas à Tecnologia da Informação (TI).

A palavra nuvem desperta uma ideia de local desconhecido, do qual se pode ver apenas seu início e fim. Por este motivo, esta nomenclatura foi empregada para este modelo, no qual toda a infraestrutura e recursos computacionais ficam ocultos. O usuário tem acesso apenas a uma interface padrão através da qual é disponibilizado todo o conjunto de aplicações e serviços.

O mercado atual está repleto de empresas que oferecem esse tipo de serviço, dentre elas a *Microsoft Azure*, *Amazon Web Services* (AWS), *Google Cloud* e várias outras. Para esta pesquisa optou-se pela utilização do serviço da AWS, em função da característica intuitiva de sua *interface* e ainda pela quantidade de tecnologias disponíveis que facilitam o desenvolvimento de aplicações em IoT. A AWS também oferece uma quantidade consideravelmente maior de serviços do que qualquer outro provedor de nuvem: de tecnologias de infraestrutura, como computação, armazenamento e bancos de dados, a tecnologias emergentes como *machine learning* e inteligência artificial, *data lakes*, análises e Internet das Coisas.

Dentre os serviços disponíveis na plataforma, para este trabalho a *Amazon Elastic Compute Cloud* (EC2) foi utilizada, nela é possível criar máquinas virtuais e executá-las em um dos centros de dados. Essas máquinas virtuais pegam uma fatia desse centro e simulam o *hardware* de um servidor físico. Por meio dela é possível escolher entre uma variedade de configurações de máquina que possuem diferentes poderes de processamento, configurações de memória e tamanhos de discos rígidos virtuais, obtendo-se desde serviços gratuitos até os pagos.

Uma vez determinada a classe da máquina para utilização, se faz necessário carregar uma *Amazon Machine Image* (AMI). Existem várias AMIs públicas que poderão ser escolhidas pois o serviço é personalizável. A maioria dos públicos são baseado no sistema Linux, que foi utilizado nessa pesquisa para executar o *broker* MQTT.

3.1.5 *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT)

MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) é um protocolo de comunicação máquina para máquina (M2M - Machine to Machine) com foco em *Internet of Things*. O MQTT é um protocolo simples e leve de envio de mensagens do tipo *publish/subscribe*.

É uma forma de comunicação ideal para aplicações onde minimizar a largura de banda e o consumo de energia é de suma importância (MQTT, 2018). Tornando-se muito versátil e popular em função da simplicidade, baixo consumo de dados e possibilidade de comunicação bilateral, o que também proporcionará a escolha deste protocolo para essa pesquisa.

Os clientes podem ser *publishers* e/ou *subscribers*. Quando atua como *publisher*, o cliente envia dados para o broker em um tópico específico (PATEL et al., 2015). Já o cliente que atua como *subscriber* se inscreve para receber os dados de um ou mais tópicos (PATEL et al., 2015).

O principal componente para que se possa fazer uso do protocolo MQTT é o *broker*, responsável por concentrar e distribuir as informações publicadas. Quando houver uma nova publicação em algum tópico, o *broker* distribui a mesma para os clientes que se inscreveram nesse tópico (PATEL et al., 2015). De forma simplista, podemos afirmar que o *broker* é um grande servidor que recebe todas as mensagens dos seus clientes e envia essas mensagens aos clientes de destino. Como exemplo, alguns clientes podem ser desde sensores IoT ou até uma aplicação que recebe os dados dos sensores e os processa. A seguir é possível se ter uma ideia do funcionamento do algoritmo nesse tipo de serviço.

- A assinatura surge, pois, o cliente se conecta e “assina” algum tópico específico de mensagens no broker;
- O outro cliente então publica as mensagens nesse tópico, enviando a mensagem e o tópico ao broker;
- Este broker então disponibiliza essa mensagem no tópico e o primeiro cliente que realizou a assinatura recebe a mensagem.

3.1.6 Broker

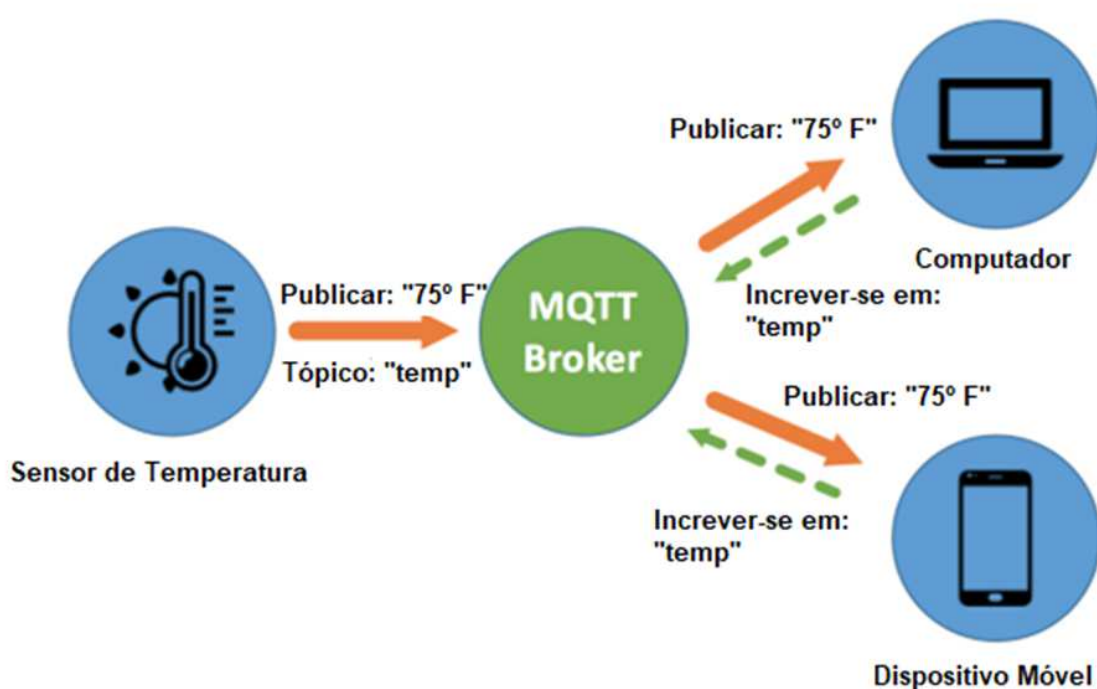
A principal função de um *broker* é receber, filtrar e encaminhar as mensagens aos clientes, portanto, é o responsável por gerir as publicações e as subscrições do protocolo MQTT. Ele é como uma espécie de mediador entre as máquinas, capaz de fazer com que a comunicação de fato ocorra entre elas. O *broker* permite um desacoplamento entre as partes, novidade entre esse tipo de sistema. Além disso, o *broker* é capaz de armazenar dados, tanto informações de registro dos assinantes, como as informações publicadas.

Conforme apontado por Egli (2022), o *broker* é altamente escalável e resistente a falhas e pode ser integrado a outros sistemas. Existem diferentes *brokers* disponíveis, tanto soluções em nuvem, quanto em *hardware*, pagos ou de graça, com a grande maioria *open-source*. Um dos mais conhecidos é o Mosquitto por ser um *software* livre e ser suportado pela eclipse.org. Além disso, o *broker* citado apresenta algumas outras vantagens, que são relevantes para a escolha deste dispositivo para esta pesquisa, conforme listado:

- O *broker*, assim como o próprio protocolo, possui alta confiabilidade para atuar em máquinas complexas sem prejudicar sua efetividade. Além de uma excelente estabilidade no uso de sensores residenciais e industriais;
- Extremamente fácil de ser instalado com plataforma intuitiva, possibilitando o uso de entusiastas e popularização dele;
- Tem código aberto e está disponível para qualquer pessoa, possui ótima compatibilidade, podendo ser aplicado em diversos maquinários.

A Figura 10 apresenta uma ilustração da lógica de funcionamento do sistema, a fim de tornar mais claro o modelo de comunicação MQTT, descrito nos dois últimos tópicos.

Figura 10 - Modelo de comunicação MQTT



Fonte: Curto-Circuito (2022).

3.1.7 InfluxDB

Para realização do armazenamento dos dados coletados pelo sensor de corrente e publicados no *broker* através do ESP32, se fez necessária a escolha de um banco de dados. Este desempenha papel fundamental em toda a estrutura da pesquisa, pois tais métricas serão fundamentais na avaliação do desgaste da ferramenta.

Uma base de dados é um conjunto de dados inter-relacionados, organizados de forma a permitir a recuperação da informação. Armazenadas por meios ópticos ou magnéticos e elétricos SSD's (*Solid State Drive*), acessadas local ou remotamente. Permite gerir enormes volumes de dados de modo a facilitar a organização, a manutenção e a pesquisa de dados,

bem como outros tipos de operações processados por meios informáticos. As bases de dados são compreendidas como fontes de informação eletrônicas, pesquisáveis de modo interativo ou conversacional através de um computador (POBLACIÓN; WITTER; SILVA, 2006).

O InfluxDB é uma base de dados que foi construída para coletar, armazenar, processar e visualizar métricas e eventos. A sua utilização é gratuita e pode ser realizada em sistemas operacionais Linux e em Windows. Além disso, se trata de um banco de dados de código aberto designado para lidar com um alto volume de consultas e escritas por segundo sem causar muito impacto no sistema operacional.

A facilidade para coleta desses dados para análise e visualização é um ponto positivo da utilização do InfluxDB. Com seus comandos já próprios para coleta de dados, é possível desenvolver códigos, sendo que o InfluxDB provê uma sintaxe para a realização da consulta muito parecida com a do SQL (*Structured Query Language*). Outra vantagem da utilização deste tipo de base de dados foi a conexão com o *software* Grafana, que é responsável pela rápida visualização dos dados, por meio de gráficos em tempo real.

3.1.8 Grafana

A coleta de dados é uma etapa de extrema importância para a construção do projeto, todavia visualizá-los somente na interface do InfluxDB não traz vantagens em termos de análise. Em função da necessidade de visualização rápida dos dados bem como seu comportamento, através do sistema de monitoramento da corrente elétrica do motor de indução do torno mecânico durante o processo de usinagem, é fator preponderante a escolha de um *software* que permitisse a integração com o InfluxDB, para rápida avaliação dos valores medidos através de gráficos e monitoramento em tempo real. Optou-se pelo uso do *software* Grafana.

O Grafana é um aplicativo *web* de código aberto e de visualização interativa multiplataforma. Ele fornece tabelas, gráficos e até mesmo alertas dos dados que estão conectados a ele. Sua utilização é muito comum em casos de banco de dados de séries temporais, pois ele é de fácil utilização, além de possuir extensão gratuita.

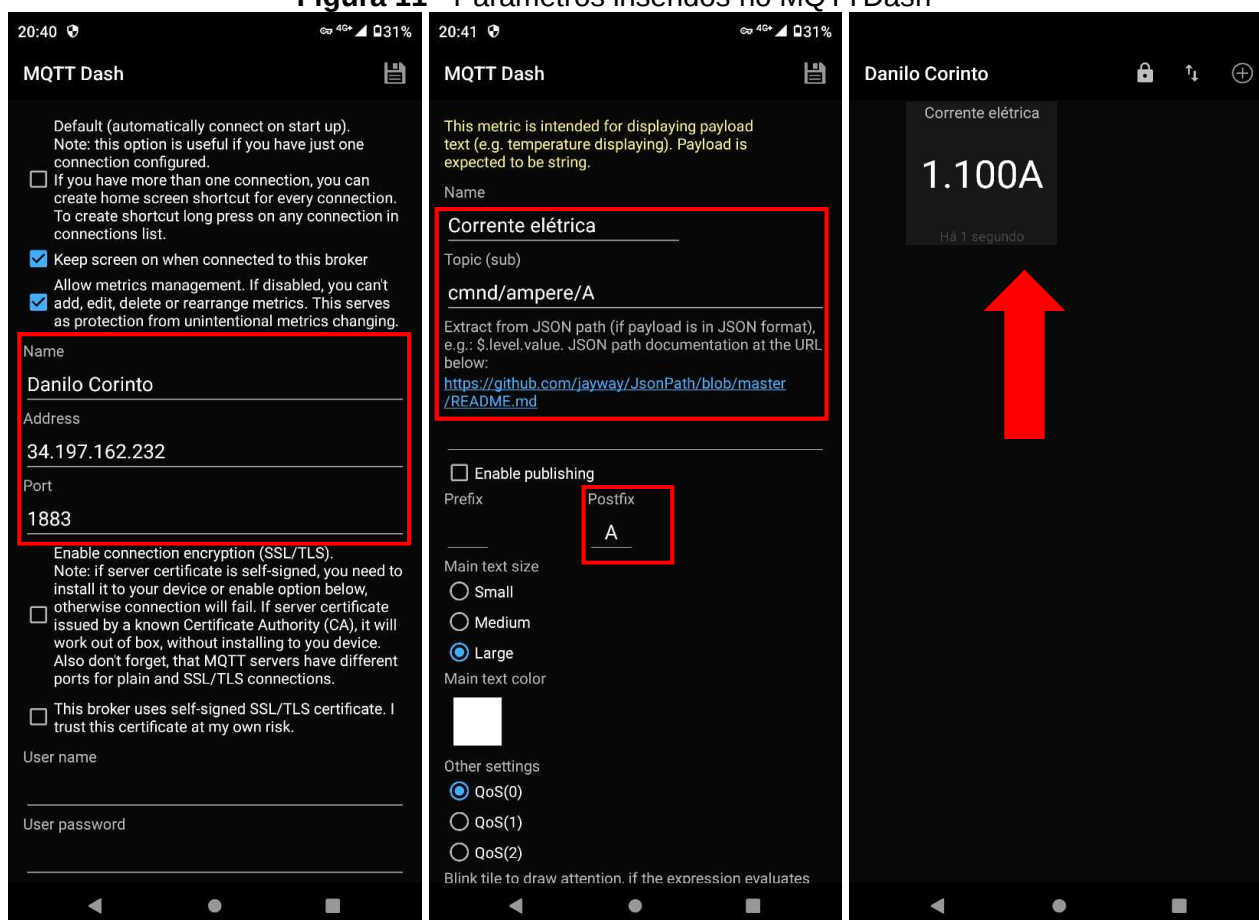
Nesse projeto, a escolha para sua utilização deve-se pelo fato de existir conexão praticamente em tempo real com a base de dados, onde foi possível a construção de gráficos com as informações desejadas.

3.1.9 Aplicação *mobile*

Para monitoramento via aplicativo de celular, a fim de viabilizar o acompanhamento dos dados coletados por meio de aplicação *mobile*, é utilizado um aplicativo Android chamado “**MQTTDash**”. Ele encontra-se disponível na *Play Store* para *download* gratuito. Com interface amigável e bastante intuitivo, ele pode ser configurado para acompanhamento dos dados de corrente elétrica relacionados ao desgaste das ferramentas, objetivo desta pesquisa.

Cabe destacar que através do aplicativo é possível não somente monitorar dados, como também controlar dispositivos de qualquer lugar do planeta desde que conectado a uma rede de internet. A Figura 11 ilustra os dados a serem inseridos no aplicativo, da esquerda para a direita, possibilitando que o usuário *mobile*, desde que tenha conexão de internet no *smartphone* possa ter acesso ao dado coletado pelo sensor e publicado pelo ESP32.

Figura 11 - Parâmetros inseridos no MQTTDash



Fonte: Elaborado pelo autor.

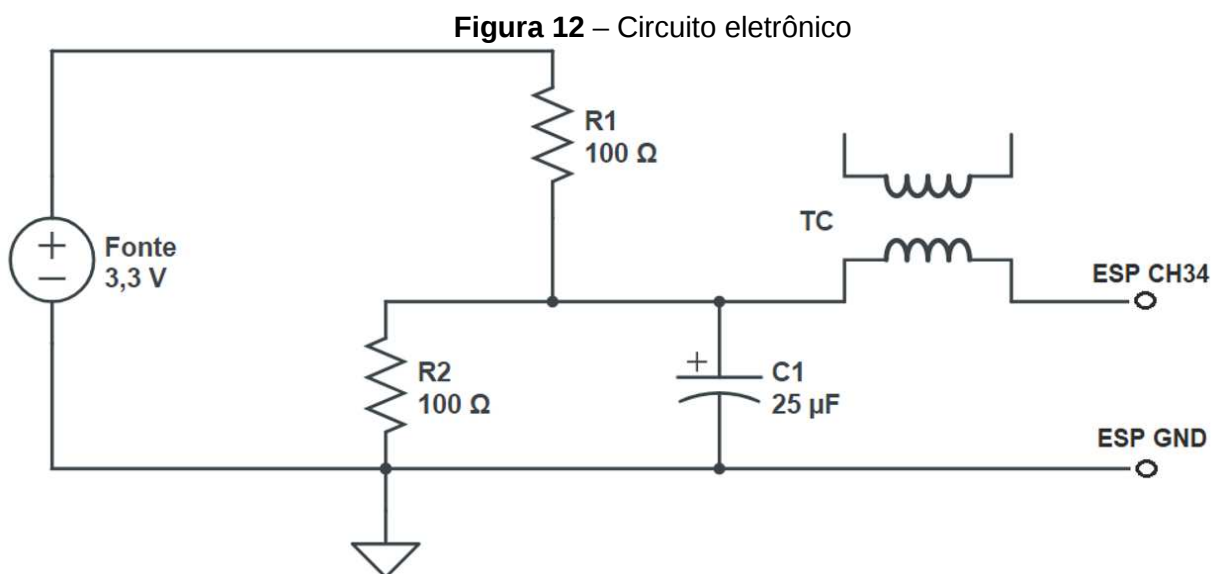
3.1.10 Montagem

Para montagem do Sistema de Aquisição de Dados, é necessária a utilização de um circuito eletrônico para adaptação de sinais. Optou-se por confeccionar uma placa de circuito impresso, em detrimento ao protoboard, pois a placa eletrônica confere maior estabilidade e confiabilidade ao Sistema de Aquisição de Dados, reduzindo ruídos elétricos e a possibilidade de mau-contato.

Como adaptador de sinais, a placa de circuito impresso é necessária pois o ESP32 não lê tensões negativas em suas entradas analógicas. Como o sensor tem saída em tensão proporcional à corrente no seu enrolamento primário, e como a corrente no primário é alternada (com um semi-ciclo positivo e outro negativo), a tensão em sua saída em parte do ciclo é negativa.

Sendo assim, é adicionado um *offset* de tensão ao sinal do sensor, por meio de um divisor de tensão, para que este sinal não assuma valores negativos durante as medições. O capacitor atua como um filtro, minimizando ruídos no sinal a ser lido pelo ESP32.

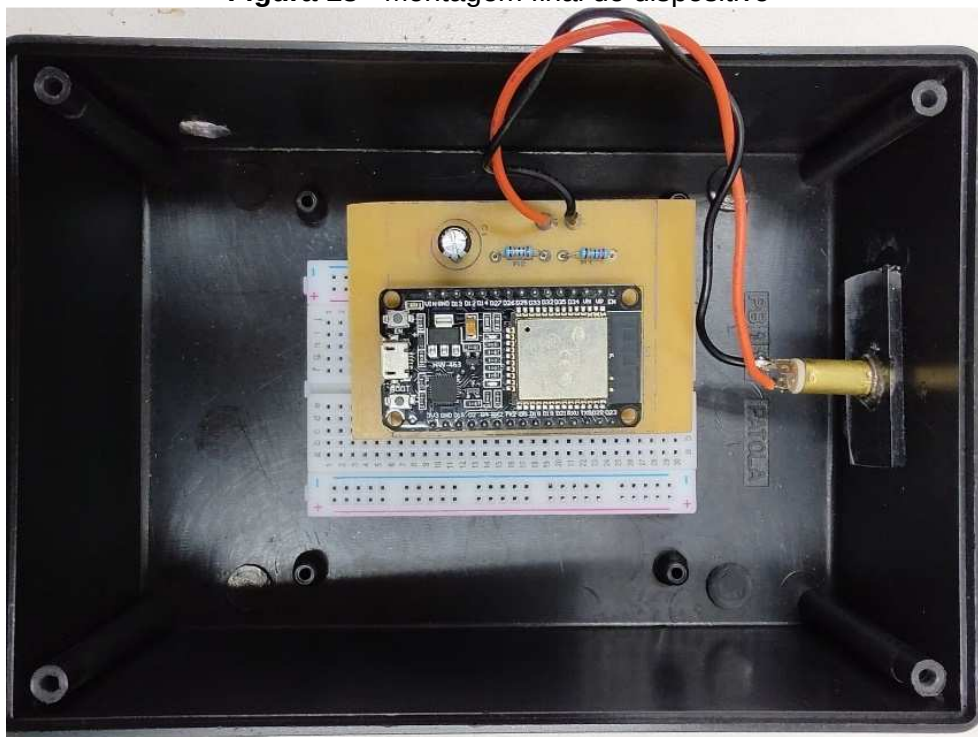
A Figura 12 mostra o circuito implantado em uma placa de circuito impresso.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em seguida, na Figura 13, pode-se verificar a montagem final do dispositivo para medição de corrente utilizando Internet das Coisas.

Figura 13 - Montagem final do dispositivo



Fonte: Arquivos do autor.

3.1.11 Aferição

A aferição é um procedimento fundamental para garantir a precisão de medidas realizadas por sensores em diversas aplicações industriais e científicas. Entre esses sensores, destacam-se os sensores de corrente elétrica, que têm ampla utilização em sistemas de monitoramento de energia elétrica, eletrônica de potência, controle de processos, dentre outras áreas.

O sensor de corrente elétrica do tipo SCT-013 é um tipo de sensor não invasivo que utiliza o efeito Hall para medir a corrente elétrica que passa por um condutor. A aferição desse sensor é essencial para garantir a precisão das medidas de corrente elétrica realizadas por ele, pois a relação entre a tensão de saída do sensor e a corrente elétrica que ele mede é não linear e depende de vários fatores, como a espessura do condutor, a geometria do sensor e as propriedades magnéticas do material utilizado.

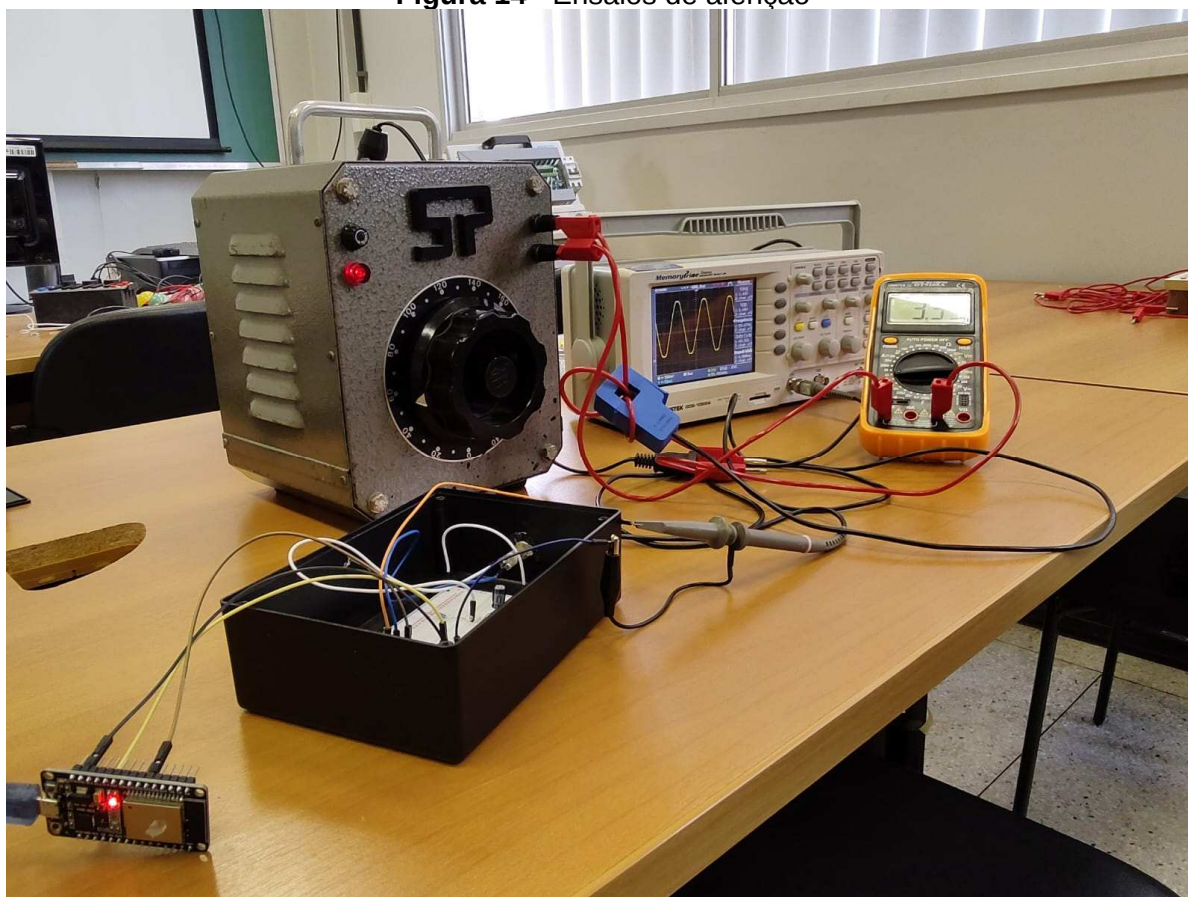
Para aferir o sensor SCT-013-020, foi necessário utilizar um variavolt capaz de gerar uma tensão conhecida e variável. Essa tensão foi ajustada de forma a provocar incrementos na corrente elétrica de 0,5A, variando em 0,5A de 0A até 20A. Além disso, foi utilizado um osciloscópio para visualizar a forma de onda da tensão gerada pelo sensor a essa corrente variável. Essa etapa é fundamental para estabelecer uma relação confiável entre as medidas obtidas pelo sensor e a quantidade física que ele se propõe a medir, que neste caso é a corrente elétrica.

Com os dados obtidos, foi possível traçar uma reta que expressa a sensibilidade do sistema de medição com as correntes conhecidas aplicadas. Utilizando a técnica de regressão linear, foi possível ajustar a reta aos dados experimentais e estimar os seus parâmetros, como o coeficiente angular e linear da reta, que são importantes para a sensibilidade do sensor e a leitura de offset, respectivamente.

O uso do osciloscópio na aferição do sensor é importante porque permite visualizar a forma de onda da tensão na saída do sensor em resposta a variação na corrente no primário do SCT. Isso possibilita verificar a presença de distorções na forma de onda, como ruídos, harmônicas e distorções de fase, que podem afetar a precisão das medidas de corrente elétrica realizadas pelo sensor. Além disso, o osciloscópio permite verificar a linearidade da relação entre as medidas obtidas pelo sensor e a quantidade física que ele pretende medir, o que é essencial para a obtenção de uma aferição precisa e confiável.

Em resumo, a obtenção da equação da reta e o uso do osciloscópio é uma etapa essencial para garantir a precisão e confiabilidade das medidas realizadas pelo sensor SCT-013-020, possibilitando o seu uso em aplicações diversas, como em sistemas de monitoramento de energia elétrica, eletrônica de potência e controle de processos. A Figura 14, mostra os ensaios sendo realizados.

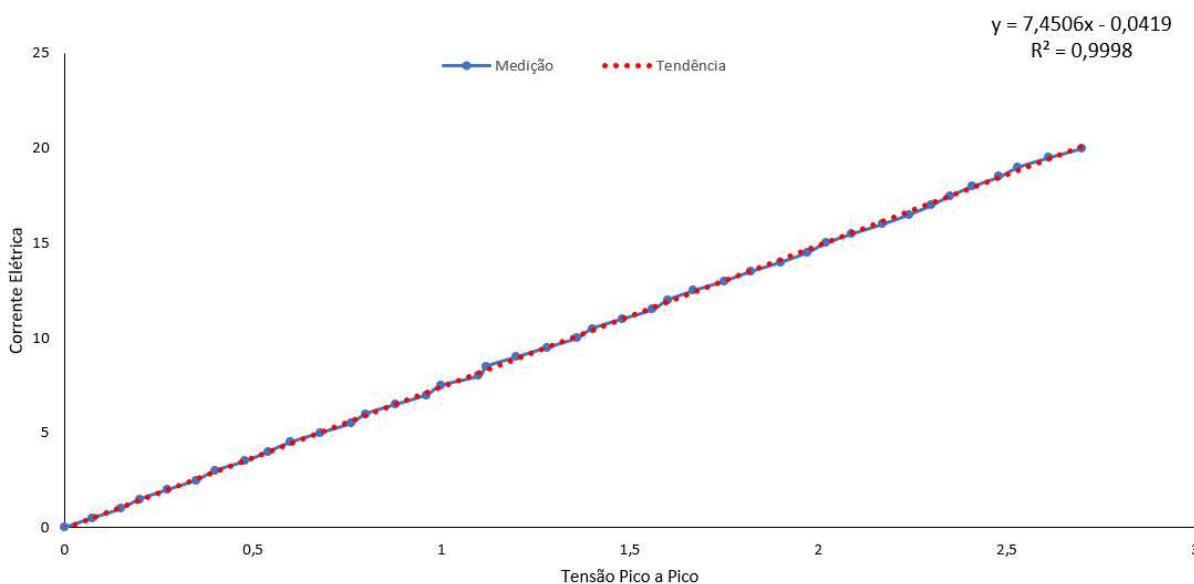
Figura 14 - Ensaios de aferição



Fonte: Arquivos do autor.

Com base nas medidas realizadas utilizando o varivolt e o osciloscópio, foi possível aferir o sensor de corrente SCT-013-020 e obter a equação da reta que relaciona a tensão de pico a pico medida (Vpp) com a corrente elétrica que passa pelo sensor. A equação obtida, bem como o gráfico são representados na Figura 15, onde o eixo y representa a corrente elétrica em Ampéres (A) e o eixo x representa a tensão de pico a pico medida em volts (V).

Figura 15 – Gráfico aferição



Fonte: Elaborado pelo autor.

O uso do osciloscópio é de extrema importância em testes de sensores como o SCT-013-020, pois ele permite a visualização da onda do sinal e sua forma senoidal. Isso é essencial para garantir que o sinal está sendo medido corretamente, sem distorções ou interferências. Além disso, o osciloscópio também permite a medição precisa da amplitude e frequência do sinal, o que é fundamental para a aferição do sensor.

Além disso, o valor do coeficiente de determinação R^2 obtido foi de 0,9998. O R^2 é uma medida de quão bem a linha da regressão (reta) se ajusta aos dados experimentais. Ele varia de 0 a 1, sendo que um valor de 1 indica um ajuste perfeito da reta aos dados e um valor próximo a 0 indica que a reta não se ajusta bem aos dados.

No caso do SCT-013-020, o valor de R^2 próximo a 1 indica que a equação da reta obtida é muito precisa na previsão da corrente elétrica com base nas medidas de tensão de pico a pico realizadas. Isso significa que é possível usar essa equação para calcular a corrente elétrica, o que é fundamental em diversas aplicações na área de eletricidade e eletrônica.

3.1.12 Programação

A programação em linguagem C++ foi utilizada na placa ESP32 para monitorar a corrente elétrica do circuito. As bibliotecas WiFi.h e PubSubClient.h foram empregadas para conectar-se à internet via WiFi e publicar dados em um servidor MQTT, respectivamente.

No início do código, constantes como a rede WiFi a ser utilizada, o endereço do servidor MQTT, o nome de usuário e a senha são definidos. A função `setup()` realiza a inicialização da placa e a conexão com a internet e o servidor MQTT.

Enquanto a placa estiver em funcionamento, a função `loop()` é executada continuamente. Nessa função, é realizada um cálculo de leitura analógica de um sensor de corrente elétrica, que é repetido 166 vezes. A média das leituras é então utilizada para calcular o valor RMS da corrente elétrica, que leva em consideração a amplitude e a frequência da corrente elétrica.

O valor RMS obtido é publicado em um tópico MQTT com a biblioteca PubSubClient.h. A função `loop()` tem um *delay* de 30 ms para evitar sobrecarga do sistema.

A programação se mostrou eficaz para o monitoramento da corrente elétrica durante a usinagem em um torno mecânico. A integração com o servidor MQTT permite que os dados de corrente elétrica sejam facilmente acessados e monitorados remotamente, evitando paradas não planejadas em função do desgaste. O código foi detalhado e disponibilizado no Apêndice A.

3.2 Ensaios de usinagem

Os ensaios de usinagem são experimentos realizados para estudar e analisar os processos de usinagem, que envolvem a remoção de material de uma peça para obter a forma desejada. Esses ensaios têm como objetivo avaliar a influência de diferentes variáveis e parâmetros de corte nas propriedades e características do processo de usinagem.

A seguir, será apresentada a descrição dos métodos empregados na condução da pesquisa, contemplando o processo de fabricação, materiais, equipamentos utilizados para usinagem e medição. O experimento foi executado nos Laboratórios de Processos de Usinagem e Laboratório de Automação da Universidade Federal de Catalão (UFCat).

3.2.1 Programação

O aço 1045 é um aço carbono de médio teor que contém cerca de 0,45% de carbono em sua composição. É um dos aços mais comuns e versáteis utilizados na indústria devido à sua resistência mecânica, facilidade de processamento e baixo custo.

Uma das principais características do aço 1045 é a sua dureza, que pode ser aumentada através de tratamentos térmicos adequados. Ele também possui boa usinabilidade e soldabilidade, tornando-o uma opção popular para várias aplicações mecânicas, tais como componentes de máquinas, eixos, engrenagens, parafusos, molas e outras peças que requerem alta resistência e durabilidade.

Além disso, o aço 1045 é amplamente utilizado em várias indústrias, como a automotiva, aeroespacial, de construção civil, agrícola e de equipamentos pesados. Devido à sua resistência, ele é frequentemente utilizado em aplicações que exigem alta resistência ao desgaste e à fadiga, bem como resistência à corrosão.

De acordo com Ashby e Jones (2010), o aço 1045 é classificado como um aço de baixa liga, sendo que a adição de outros elementos de liga, como o cromo e o molibdênio, pode melhorar suas propriedades mecânicas.

De acordo com Silva (2018), o aço 1045 pode ser endurecido por têmpera e revenido, além de poder ser submetido a outros tratamentos térmicos, como recozimento e normalização. Esses tratamentos podem melhorar a sua tenacidade, ductilidade e resistência à tração.

Face ao exposto, o aço 1045 foi escolhido para o estudo, uma vez que possui uma alta gama de aplicações industriais.

Quanto à sua dureza, de acordo com ASM International (1990), o aço 1045 tem uma dureza média de cerca de 150 HBS, medida pela escala Brinell Standard (HBS), sem nenhum tipo de tratamento térmico. Esta dureza é considerada moderada para a maioria das aplicações mecânicas, o que faz do aço 1045 um material versátil para diferentes tipos de usinagem e processos industriais.

No entanto, é importante ressaltar que a dureza do aço 1045 pode variar significativamente dependendo dos tratamentos térmicos aos quais ele é submetido. A têmpera e o revenimento, por exemplo, são tratamentos térmicos que podem aumentar significativamente a dureza do aço 1045, aumentando a sua resistência mecânica e tornando-o mais resistente à abrasão.

Além disso, a dureza do aço 1045 também pode ser afetada por fatores como a microestrutura do material, a presença de inclusões e a temperatura de trabalho. Por isso, é importante considerar esses fatores ao escolher o aço 1045 para uma aplicação específica e ao selecionar os tratamentos térmicos mais adequados para as necessidades do projeto.

A Figura 16 mostra o procedimento de fixação do material a ser usinado no torno, com o propósito de viabilizar o processo de usinagem. Em decorrência das definições de parâmetros de corte estabelecidas para a pesquisa, a redução do diâmetro original do material, que era de 2.1/2" (63,50 mm), tornou-se mandatória para a adequação do diâmetro final para 50 mm, dimensão compatível com a faixa de corte pretendida e adequada a

ferramenta de corte. A adoção dessa medida se mostrou imprescindível para assegurar a eficácia do processo de usinagem e, consequentemente, para a obtenção dos desfechos almejados.

Figura 16 - Material em processo de pré-usinagem



Fonte: Arquivos do autor.

3.2.2 Torno Mecânico

Para realização dos ensaios de usinagem, foi utilizado o torno Nardini MS 205 - Mascote que é um equipamento de usinagem mecânica amplamente utilizado na indústria metalmeccânica. Fabricado pela empresa Nardini, reconhecida pela qualidade de seus produtos, o MS 205 - Mascote é um torno universal de médio porte que possui capacidade para usinar peças com diâmetro máximo de 410 mm sobre o barramento e comprimento máximo de 1000 mm entre pontas. O equipamento conta com avanços automáticos longitudinais e transversais, caixa de engrenagens com 16 velocidades e placa de três castanhas de 400 mm de diâmetro.

O torno MS 205 - Mascote é equipado com um cabeçote fixo e um cabeçote móvel, que possibilitam a realização de operações de usinagem em diferentes diâmetros e

comprimentos de peças. Além disso, ele possui um sistema de avanço automático longitudinal e transversal, que permite maior agilidade e precisão nas operações de usinagem.

No contexto deste trabalho, a utilização do torno Nardini MS 205 - Mascote foi fundamental devido à sua precisão, estabilidade e capacidade de usinagem de peças de diferentes tamanhos e geometrias. A Figura 17 mostra uma imagem do equipamento.

Figura 17 - Torno mecânico



Fonte: Arquivos do autor.

3.2.3 Ferramenta de corte

A ferramenta de corte utilizada no processo de usinagem é um elemento chave para a obtenção de peças com alta qualidade e precisão. O modelo selecionado para o experimento foi a TNMG 16 04 08 E-NM, fabricada pela marca Dormer Pramet, multinacional no mercado de ferramentas de corte para usinagem.

Inserto de torneamento dupla face negativo, triangular com diâmetro circunscrito de 9.525mm, 4.76mm espessura, raio de ponta, 0.8mm precisão de indexação de acordo com a classe de tolerância ISO M, quebra-cavaco (SF) com arestas de corte arredondadas. Na Tabela 3 é possível verificar as principais características da ferramenta.

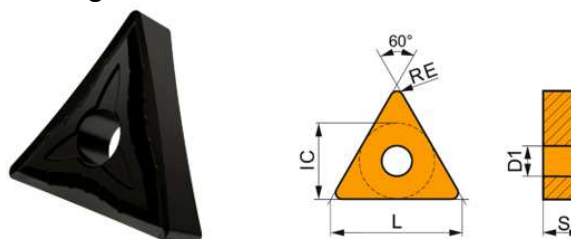
Tabela 3 - Características da ferramenta

Fabricante	Modelo	Tipo de pastilha	Raio da pastilha	Largura da pastilha	Espessura da pastilha	Ângulo de incidência	Ângulo de folga	Cobertura	Material
Dormer Pramet	TNMG 16 04 08 E-NM	Triangular	0,8 mm	16 mm	4,76 mm	60°	7°	TiN	Metal duro

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 18 é possível identificar detalhes em relação ao modelo de ferramenta escolhido.

Figura 18 - Geometria da ferramenta



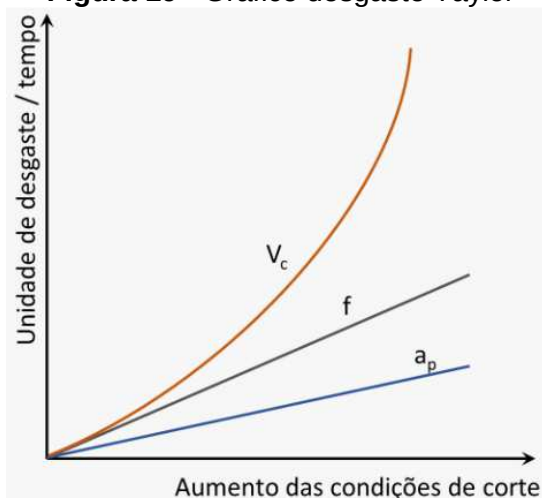
Fonte: DORMER PRAMET.

A ferramenta de corte TNMG 16 04 08 E-NM apresenta uma grande versatilidade na usinagem de materiais da classe P, M e S. A classe P compreende materiais como aços ligados, aços inoxidáveis e ferro fundido, com dureza de até 35 HRC (equivalente a aproximadamente 300 HBS). Já a classe M é composta por materiais não ferrosos como alumínio, cobre e bronze, enquanto a classe S é formada por materiais de difícil usinabilidade como titânio e ligas de níquel.

Para a usinagem de aço 1045, que faz parte da classe P, é possível utilizar a TNMG 16 04 08 E-NM dentro da faixa de parâmetros de corte recomendada pelo fabricante, que são VC (velocidade de corte em m/min) = 250 - 185, f (avanço em mm/rev) = 0,20 - 0,40 e ap (profundidade de corte em mm) = 1,0 - 3,0.

Os experimentos foram realizados considerando as condições de um desbaste de alta severidade, dentro dos limites do fabricante. No início da década de 1900, o engenheiro americano F. W. Taylor desenvolveu um modelo de vida da ferramenta que incluía fatores relevantes ao corte de metal. Taylor observou que o aumento da profundidade de corte tinha um efeito mínimo na vida da ferramenta.

O aumento da taxa de avanço tinha um pouco mais de efeito, enquanto velocidades de corte mais altas influenciavam grandemente na vida da ferramenta. A Figura 19 ilustra o desgaste da ferramenta resultante do aumento da velocidade (azul VC), avanço (cinza f) e profundidade de corte (preto ap).

Figura 19 - Gráfico desgaste Taylor

Fonte: Adaptado de Revista Ferramental (2021).

A partir das observações de Taylor, resolve-se utilizar o limite de velocidade de corte (V_c) da ferramenta selecionada para a usinagem, pois desta forma pode-se observar o comportamento da corrente elétrica da máquina dentro da faixa de limite da ferramenta de máximo desgaste. É importante ressaltar que a escolha da ferramenta de corte adequada para cada material e aplicação é essencial para garantir a qualidade e a eficiência da usinagem.

O suporte de ferramenta utilizado na usinagem foi o MTJNR 2020 K16 que é um porta-ferramentas utilizado em processos de torneamento para fixação de pastilhas intercambiáveis em tornos CNC (Comando Numérico Computadorizado) e convencionais. Fabricado em aço endurecido e temperado, possui alta resistência mecânica e rigidez, garantindo estabilidade e precisão no corte das peças usinadas.

Sua geometria é projetada para facilitar o acesso às regiões de difícil usinagem e possibilita o ajuste preciso da altura da ferramenta de corte. O suporte MTJNR 2020 K16 é compatível com pastilhas triangulares de 60° , possuindo sistema de fixação por parafuso, o que permite trocas rápidas e seguras de ferramentas durante a usinagem.

O modelo K16 se refere à altura do suporte, que é de 20 mm, e sua largura de 20 mm. Essas medidas são essenciais para garantir a correta adaptação do suporte à torre do torno e para escolha das pastilhas a serem utilizadas. Na Figura 20 é possível observar o modelo utilizado.

Figura 20 - Porta-ferramentas

Fonte: Arquivos do autor.

3.2.4 Microscópio digital

Dentro do contexto deste trabalho de pesquisa, o sistema de medição do desgaste das ferramentas é uma ferramenta fundamental para a avaliação da vida útil de corte utilizadas na usinagem de materiais. Para realizar essa medição, utilizou-se um modelo digital USB Zoom 1000x HD com câmera de 2.0 MP (Mega Pixel), que permite obter imagens ampliadas das arestas de corte das ferramentas e analisar o desgaste para determinar o momento ideal para a troca.

A precisão e objetividade do sistema de medição são essenciais para avaliar o desgaste das ferramentas. Com o uso do modelo digital USB Zoom 1000x HD, é possível obter imagens nítidas e de alta qualidade, o que facilita a identificação do desgaste em diferentes tipos de ferramentas e materiais. A Figura 21 mostra o sistema de medição montado.

Figura 21 - Sistema de medição do desgaste da ferramenta

Fonte: Arquivos do autor.

Além disso, para processar as imagens obtidas pelo modelo digital USB Zoom 1000x HD com câmera de 2.0 MP, foram utilizados *softwares* gratuitos de processamento de imagens. Esses *softwares* permitem a análise detalhada das imagens, facilitando a identificação do desgaste das ferramentas e a determinação do momento adequado para a troca. A utilização de *softwares* gratuitos também contribui para a redução de custos e aprimoramento do processo de avaliação do desgaste das ferramentas.

3.2.5 Parâmetros de corte e condições de usinagem

Foram selecionados parâmetros de usinagem para operação de desbaste, dentro da faixa recomendada pelo fabricante, devido a predominância destas operações em relação às de acabamento na usinagem de peças. Os parâmetros escolhidos foram:

- Profundidade de corte (ap) de 2 mm;
- Velocidade de corte (Vc) de 250 m/min;
- Avanço de (f) de 0,394 mm/rot;
- Diâmetro da peça de 50 mm;
- Rotação da árvore de 1600 RPM.

O tarugo de aço 1045 adquirido foi demarcado em trechos com comprimento de 30 mm durante o rebaixamento do diâmetro para 50 mm. Essa operação procura garantir o mesmo diâmetro e rotação da árvore em todos os ensaios, além de permitir a separação do tarugo em diferentes “corpos de prova” para a realização da aquisição de dados com cada uma das ferramentas. A Figura 22, representa o tarugo já pré-usinado e demarcado.

Figura 22 - Tarugo pré-usinado e demarcado



Fonte: Arquivos do autor.

3.2.6 Monitoramento dos dados

Para monitorar as variações na corrente elétrica em função do desgaste da ferramenta, o sistema de aquisição de dados descrito anteriormente foi montado e conectado. A Figura 23 mostra o sistema de aquisição de dados montado, nela é possível observar a tela do Grafana, que acompanha a variação da corrente em tempo real, gerando gráficos atualizados automaticamente.

É válido ressaltar que as informações do sistema são acessíveis a partir de qualquer local com acesso à rede de internet, desde que seja fornecido um login e senha de acesso. Ou seja, embora nos ensaios microcomputador e torno estivessem próximos, basta que o aparato de medição mostrado na Figura 13 esteja próximo ao torno, e conectado à Internet, para que o monitoramento seja possível.

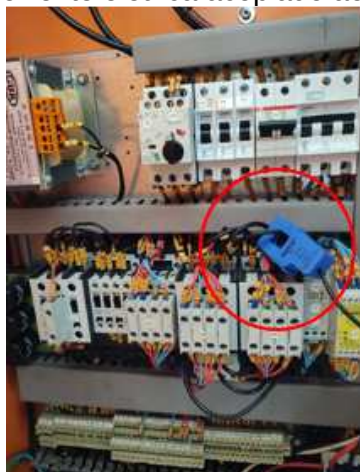
Figura 23 - Sistema de aquisição de dados montado



Fonte: Arquivos do autor.

A Figura 24 representa o sensor de corrente elétrica não invasivo acoplado ao circuito elétrico do torno mecânico.

Figura 24 - Sensor de corrente elétrica acoplado ao circuito elétrico do torno



Fonte: Arquivos do autor.

3.2.7 Seleção e medição das ferramentas

Diversas ferramentas de um mesmo tipo, já utilizadas, foram recolhidas e avaliadas individualmente, em relação ao desgaste. Cabe ressaltar que todas as ferramentas foram submetidas ao mesmo processo de usinagem, o que incluiu a utilização de parâmetros de corte, material usinado e condições de trabalho rigorosamente padronizados. Em seguida, o desgaste de cada ferramenta foi medido, sendo obtidos resultados de desgaste de flanco de 0,14 mm, 0,24 mm, 0,32 mm, 0,57 mm, além de uma ferramenta completamente íntegra, a fim de possibilitar uma comparação com a ferramenta nova.

Importante destacar que considerando a recomendação da norma ISO 3685 (1993), o fim da vida útil da ferramenta se dá quando o desgaste máximo do flanco atinge 0,60 mm. Na Figura 25, é possível visualizar as ferramentas e utilizadas nesse estudo. Por isso foram selecionadas ferramentas desgastadas até esse ponto.

Figura 25 - Ferramentas utilizadas no estudo



Fonte: Arquivos do autor.

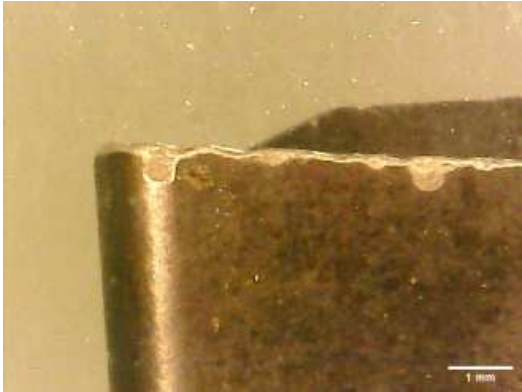
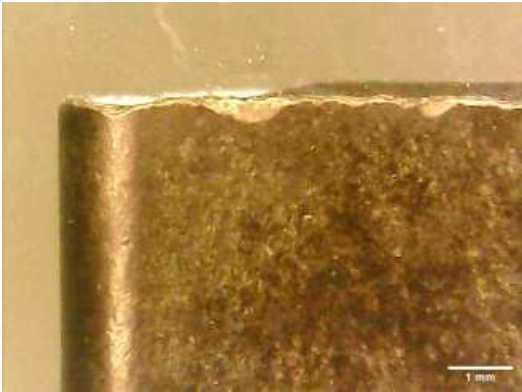
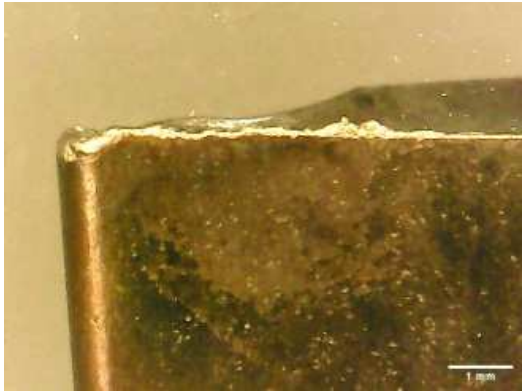
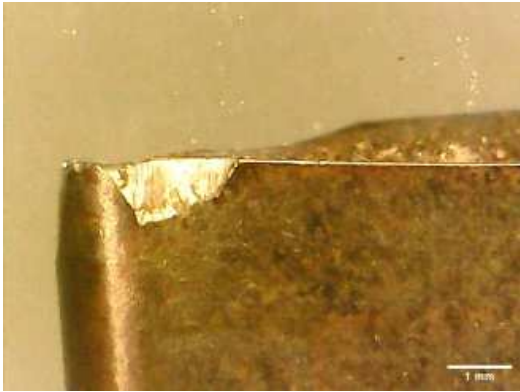
Para realizar uma análise da relação entre a corrente elétrica e o desgaste da ferramenta, é importante medir individualmente o desgaste de cada ferramenta com auxílio de microscópio. Isso se deve ao fato de que as ferramentas podem apresentar diferentes padrões de desgaste, o que pode afetar o comportamento da corrente elétrica durante o processo de usinagem.

A importância da medição individual do desgaste de ferramentas de corte foi destacada em diversos estudos. Por exemplo, em um estudo realizado por Wei et al. (2017), os autores mostraram que a medição individual do desgaste de ferramentas é fundamental para garantir a precisão da análise da relação entre o desgaste da ferramenta e a corrente elétrica.

Além disso, a utilização de microscópios para medir o desgaste das ferramentas permite uma análise mais detalhada dos mecanismos de desgaste, o que pode contribuir para o desenvolvimento de ferramentas mais resistentes e duráveis. Nesse sentido, estudos como o de Sánchez et al. (2020) têm mostrado que a utilização de técnicas de microscopia pode ajudar a entender os mecanismos de desgaste das ferramentas e, conseqüentemente, melhorar a eficiência da usinagem. A Tabela 4 mostra uma representação detalhada das

ferramentas utilizadas no estudo, juntamente com suas arestas correspondentes, que foram avaliadas sob o microscópio com o intuito de identificar e mensurar os desgastes de flanco.

Tabela 4 - Microscopia ferramentas

Imagem ampliada da ferramenta	
	
Desgaste 0,00 mm	Desgaste 0,14 mm
	
Desgaste 0,24 mm	Desgaste 0,32 mm
	
Desgaste 0,57 mm	

Fonte: Elaborado pelo autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentados os dados coletados por meio da placa de aquisição de dados desenvolvida e os métodos utilizados para analisá-los. Serão discutidos também os resultados e as possíveis implicações para o processo de torneamento e para a indústria em geral.

A partir da análise dos dados coletados, é possível avaliar o desempenho do sistema de monitoramento em tempo real proposto e verificar se ele é capaz de fornecer informações sobre o desgaste da ferramenta de corte durante o processo de torneamento. Além disso, são discutidas as possibilidades de utilização dos dados coletados para a tomada de decisões e otimização do processo de torneamento.

Por fim, são apresentadas as limitações do sistema proposto e possíveis sugestões para o aprimoramento deste.

4.1 Monitoramento da corrente elétrica

No monitoramento da corrente elétrica durante a usinagem, é possível observar um comportamento que se relaciona diretamente com o desgaste da ferramenta de corte. Conforme a ferramenta é desgastada, a corrente elétrica necessária para realizar o processo de usinagem aumenta. Isso ocorre porque o desgaste da ferramenta de corte altera a geometria da aresta de corte, resultando em uma maior resistência ao corte e, consequentemente, um aumento da corrente elétrica.

De acordo com o estudo realizado por Zhang et al. (2015), o monitoramento da corrente elétrica pode ser utilizado para detectar o desgaste da ferramenta de corte de forma eficiente e precisa. O estudo relatou que o aumento da corrente elétrica estava correlacionado com o desgaste da ferramenta de corte, sendo capaz de detectar o desgaste em estágios iniciais. Outro estudo realizado por Abdulkareem et al. (2018) também comprovou a relação entre o desgaste da ferramenta de corte e o aumento da corrente elétrica durante a usinagem. O estudo observou que a corrente elétrica aumentou conforme a ferramenta de corte se desgastava, o que foi atribuído à maior resistência ao corte causada pelo desgaste da ferramenta.

Portanto, fica claro que o monitoramento da corrente elétrica durante a usinagem pode ser utilizado para detectar o desgaste da ferramenta de corte de forma eficiente. É importante lembrar que a norma ISO 3685 é utilizada para determinar o fim da vida útil da ferramenta de corte, mas não se relaciona diretamente com a monitoração da corrente elétrica durante a usinagem. Cabe ressaltar que neste trabalho, propõe-se a utilizar os critérios estabelecidos na norma ISO 3685 como meio de correlacionar o aumento da corrente elétrica do torno com

o aumento do desgaste da ferramenta de corte. Dentre os vários critérios estipulados pela norma, optou-se pelo critério de flanco máximo, em que desgastes superiores a 0,60 mm indicam que a ferramenta de corte atingiu o fim de sua vida útil.

A Figura 26 ilustra a interface do sistema em exibição no monitor do computador, no qual se pode observar o desempenho em tempo real do equipamento ligado ao torno, medindo corrente elétrica, através da utilização do software Grafana.

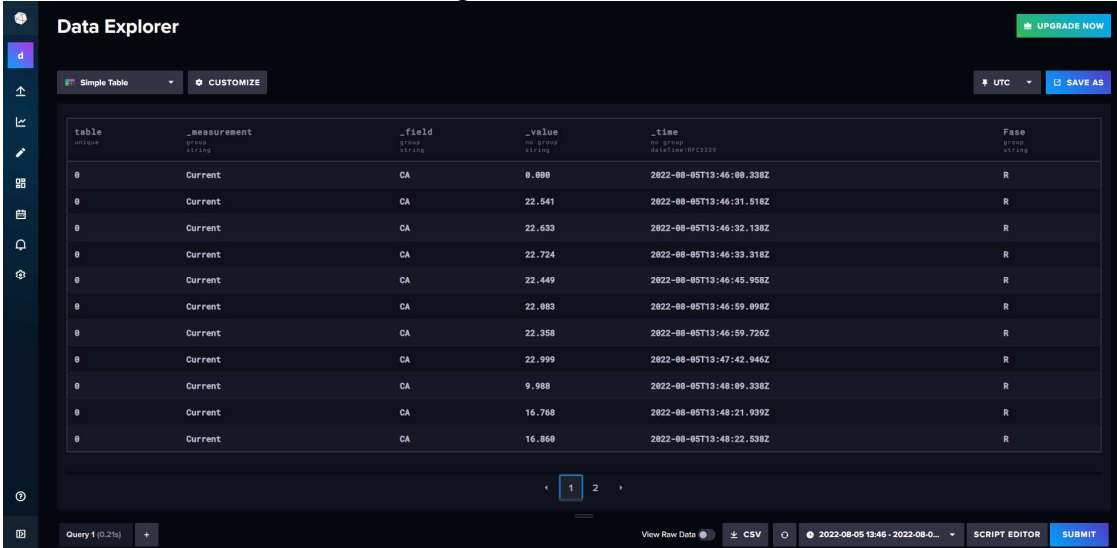
Figura 26 – Interface Grafana



Fonte: Arquivos do autor.

O InfluxDB apresenta-se como uma ferramenta altamente poderosa e versátil para visualização de informações. Além da integração com o Grafana, é possível acessar diretamente todas as informações armazenadas no banco de dados. Uma das características mais importantes do InfluxDB é a sua habilidade de exportar dados em formato CSV (*values separated by commas*), o qual representa um arquivo de valores separados por vírgulas. Tal formato de arquivo é facilmente importado para softwares populares como o Microsoft Excel, Google Sheets, LibreOffice, entre outros. Para o exposto, a Figura 27 apresenta a interface do InfluxDB, demonstrando sua capacidade em gerenciar dados.

Figura 27 - InfluxDB



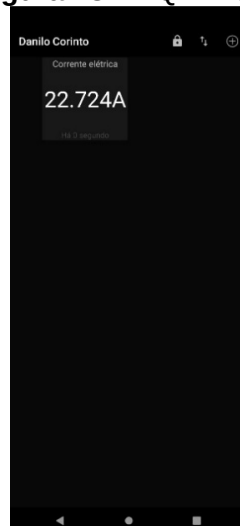
The screenshot shows the InfluxDB Data Explorer interface. At the top, there's a 'Data Explorer' header with an 'UPGRADE NOW' button. Below it, a 'Simple Table' view is selected, and a 'CUSTOMIZE' button is visible. The table displays data with columns: 'table' (group: string), '_measurement' (group: string), '_field' (group: string), '_value' (group: string), '_time' (group: string), and 'Fase' (group: string). The table contains 11 rows of data, all with '_measurement' as 'Current' and 'Fase' as 'R'. The values range from 8.890 to 22.999. At the bottom, there's a 'Query 1 (0.21s)' section with a 'View Raw Data' button, a 'CSV' export option, and a 'SCRIPT EDITOR' with a 'SUBMIT' button.

table	_measurement	_field	_value	_time	Fase
0	Current	CA	8.890	2022-08-05T13:46:00.330Z	R
0	Current	CA	22.541	2022-08-05T13:46:31.510Z	R
0	Current	CA	22.633	2022-08-05T13:46:32.130Z	R
0	Current	CA	22.724	2022-08-05T13:46:33.310Z	R
0	Current	CA	22.449	2022-08-05T13:46:45.950Z	R
0	Current	CA	22.083	2022-08-05T13:46:59.090Z	R
0	Current	CA	22.358	2022-08-05T13:46:59.720Z	R
0	Current	CA	22.999	2022-08-05T13:47:42.940Z	R
0	Current	CA	9.988	2022-08-05T13:48:09.330Z	R
0	Current	CA	16.768	2022-08-05T13:48:21.930Z	R
0	Current	CA	16.869	2022-08-05T13:48:22.530Z	R

Fonte: Elaborado pelo autor.

A presente pesquisa propõe uma solução de monitoramento de dados em tempo real para máquinas ferramenta, utilizando uma aplicação móvel desenvolvida para dispositivos Android. Essa solução permite que usuários interessados em acompanhar os parâmetros de corrente elétrica da máquina tenham acesso a informações em tempo real, desde que haja disponibilidade de conexão com a internet. A Figura 28 ilustra uma captura de tela da aplicação móvel, que permite visualizar de forma clara e objetiva os valores de corrente elétrica da máquina em tempo real. Tal solução proporciona maior eficiência no monitoramento e acompanhamento da máquina ferramenta, permitindo a detecção precoce de eventuais falhas da ferramenta de corte e outras necessidades de manutenção. Essa abordagem inovadora pode trazer importantes benefícios para o setor industrial, aumentando a produtividade e reduzindo custos operacionais.

Figura 28 - MQTTDash



Fonte: Arquivos do autor.

4.2 Relação da corrente elétrica com o desgaste

Com base nos dados coletados por meio do InfluxDB, que armazena os valores de corrente obtidos nos experimentos em cada uma das faixas demarcadas, torna-se necessário determinar os valores médios de corrente para a construção de um modelo ajustado que relacione a variável de desgaste com a resposta de corrente.

Com base nessas informações, foi gerada a Tabela 5, que apresenta os respectivos valores de desgaste (VB_{max}) e a corrente elétrica média (I) para cada faixa usinada, juntamente com o desvio padrão associado a cada valor de corrente média. A tabela permite uma análise estatística básica dos resultados obtidos, considerando tanto a variabilidade da corrente elétrica quanto o desgaste observado para cada faixa de usinagem.

Tabela 5 - Dados coletados

Ensaio	Desgaste de flanco (mm)	Média corrente elétrica medida	Desvio Padrão
01	0,00	11,3402 A	0,09786
02	0,14	11,8657 A	0,12520
03	0,24	12,2213 A	0,05372
04	0,32	12,6010 A	0,08983
05	0,57	15,4398 A	0,13175

Fonte: Elaborado pelo autor.

O desvio padrão é uma medida que expressa o grau de dispersão de um conjunto de dados. Ou seja, o desvio padrão indica o quanto um conjunto de dados é uniforme. Quanto mais próximo de 0 for o desvio padrão, mais homogêneo são os dados. Foram coletados 9 pontos por segundo.

Essas informações são fundamentais para o desenvolvimento do modelo ajustado, que permitirá estabelecer uma relação entre o desgaste e a corrente elétrica média, contribuindo para uma compreensão mais aprofundada do processo de usinagem em questão.

A relação entre a corrente elétrica e o desgaste das ferramentas de corte é amplamente discutida na literatura especializada (GUPTA E SHUKLA, 2015; LIU et al., 2019). Em geral, quanto maior a corrente elétrica, maior é o desgaste das ferramentas de corte, devido ao aumento da área de contato (peça e ferramenta) que provoca o aumento da temperatura e do desgaste abrasivo. Isso fica evidente na Tabela 4.

A análise estatística é uma ferramenta essencial para o avanço do conhecimento científico e tecnológico, pois permite uma compreensão mais precisa das relações entre variáveis. Nesse contexto, o teste de correlação de Pearson é amplamente utilizado para

avaliar a relação linear entre duas variáveis contínuas. Já o teste de Shapiro-Wilk é usado para verificar se uma amostra de dados segue uma distribuição normal.

Para validação da correlação entre o tamanho do desgaste e o aumento da corrente elétrica, é fundamental o uso de ferramentas estatísticas que possam verificar a existência ou não de relação entre as variáveis. Dentre as possibilidades, o teste de correlação de Pearson é uma escolha adequada, uma vez que é um método paramétrico utilizado para avaliar a força da relação linear entre duas variáveis contínuas.

A utilização do coeficiente de correlação de Pearson se dá em casos em que a associação entre as variáveis envolvidas é linear, ou seja, quando a variação em uma das variáveis é acompanhada de uma variação proporcional na outra. O valor resultante do coeficiente de correlação pode variar entre -1 e 1, sendo que valores próximos de -1 ou 1 indicam uma relação linear forte entre as variáveis, enquanto valores próximos de 0 indicam uma relação fraca ou inexistente.

Com o intuito de auxiliar na implementação do teste de correlação de Pearson nesta pesquisa, foi utilizado o ambiente *Google Colab*, juntamente com a linguagem de programação Python. Este procedimento permite a automatização e padronização da análise estatística, conferindo maior objetividade aos resultados obtidos.

Antes de aplicar o teste de correlação de Pearson, é importante verificar se as variáveis seguem uma distribuição normal, já que a correlação de Pearson é baseada em uma distribuição normal das variáveis, começando pela verificação do pressuposto da normalidade das variáveis. Ambas as análises foram realizadas detalhadamente e disponibilizadas no Apêndice B. A Tabela 6 apresenta os dados resumidos do teste de normalidade.

Tabela 6 - Teste de normalidade Shapiro-Wilk

Variável	Teste de Normalidade	Resultado do teste
Corrente elétrica	Shapiro-Wilk	Não rejeitamos H0
Desgaste de flanco	Shapiro-Wilk	Não rejeitamos H0

Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela mostra os resultados dos testes de normalidade para as variáveis "Corrente Elétrica Média" e "Desgaste de Flanco". Em ambos os casos, o teste de Shapiro-Wilk não rejeitou a hipótese nula, indicando que as variáveis seguem uma distribuição normal. Na Tabela 7 é possível visualizar os dados resumidos da Correlação de Pearson.

Tabela 7 - Correlação de Pearson

Variável	Coeficiente de Correlação de Pearson	Valor-p	Resultado do Teste
Corrente elétrica	0,96	0,0011	Rejeitamos H0

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com os resultados obtidos nos testes, pode-se afirmar que há uma forte correlação positiva entre o tamanho do desgaste de flanco e a corrente elétrica média, indicando que o aumento do desgaste de flanco está associado ao aumento da corrente elétrica média. Esse resultado é consistente com a literatura existente sobre o assunto (DINIZ et al., 2014; KUMAR et al., 2019), que aponta para a relação entre o desgaste de flanco e a corrente elétrica.

Além disso, os resultados do teste de Shapiro-Wilk indicam que as listas de dados do tamanho do desgaste de flanco e da corrente elétrica média seguem uma distribuição normal, o que é um pressuposto importante para aplicação do teste de correlação de Pearson. O coeficiente de correlação de Pearson obtido foi de 0.96, o que indica uma forte correlação positiva entre as variáveis. Esse valor indica que à medida que o tamanho do desgaste de flanco aumenta, há um aumento proporcional na corrente elétrica média.

O valor do *p-value* obtido foi menor do que 0,05, o que indica que a correlação entre as variáveis é estatisticamente significativa. Isso significa que a chance de essa correlação ter ocorrido ao acaso é baixa. Esses resultados reforçam a validade da análise e suportam a conclusão de que há uma forte correlação positiva entre o tamanho do desgaste de flanco e a corrente elétrica.

Portanto, é possível afirmar que a análise estatística dos dados obtidos nesse estudo permite uma melhor compreensão da relação entre o tamanho do desgaste de flanco e a corrente elétrica durante a operação de desbaste na usinagem, fornecendo informações importantes para o desenvolvimento de estratégias de otimização nos processos de manufatura.

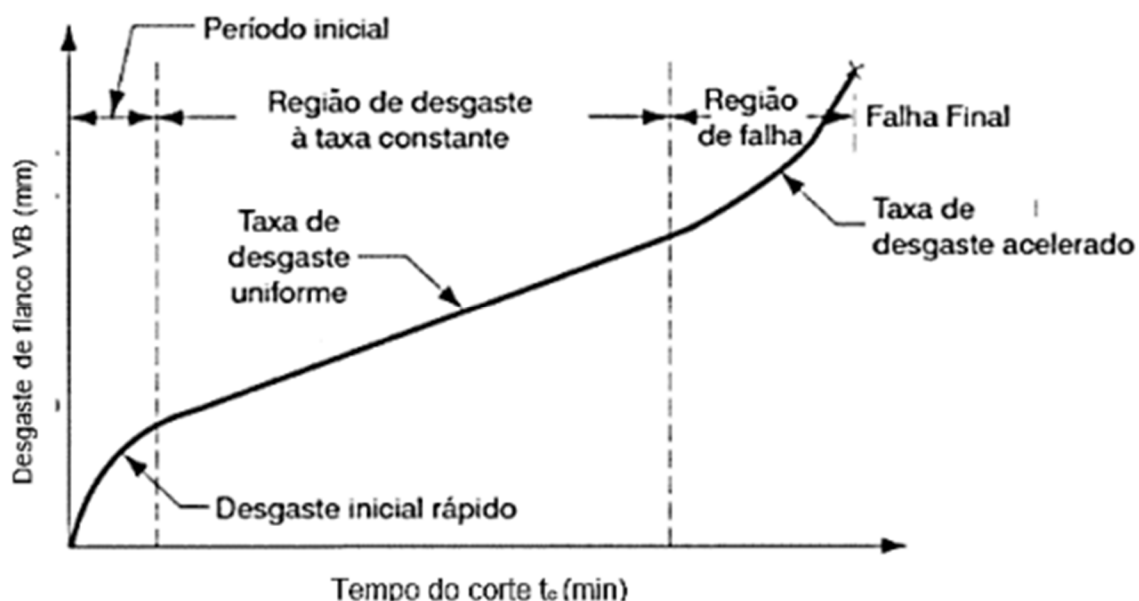
4.3 Resultados obtidos e análise da similaridade com a curva de Taylor

A análise dos resultados obtidos no estudo mostrou que há uma forte correlação positiva entre o tamanho do desgaste de flanco e a corrente elétrica média, indicando que o aumento do desgaste de flanco está associado ao aumento da corrente elétrica média. Esse resultado é consistente com a literatura existente sobre o assunto (DINIZ et al., 2014; KUMAR et al., 2019), que aponta para a relação entre o desgaste de flanco e a corrente elétrica.

Para entender melhor a relação entre o desgaste de flanco e a corrente elétrica, pode-se utilizar a curva de Taylor. A curva de Taylor é uma representação gráfica que relaciona a vida útil de uma ferramenta com o tempo de corte. Essas curvas são importantes para entender a influência das variáveis de corte nas propriedades da ferramenta e na qualidade da usinagem. A curva de Taylor é utilizada para avaliar a eficiência da usinagem, com base

na taxa de desgaste da ferramenta. Na Figura 29, é possível observar a curva da vida útil da ferramenta, proposta por Taylor, levando em consideração o desgaste x tempo para determinada velocidade de corte.

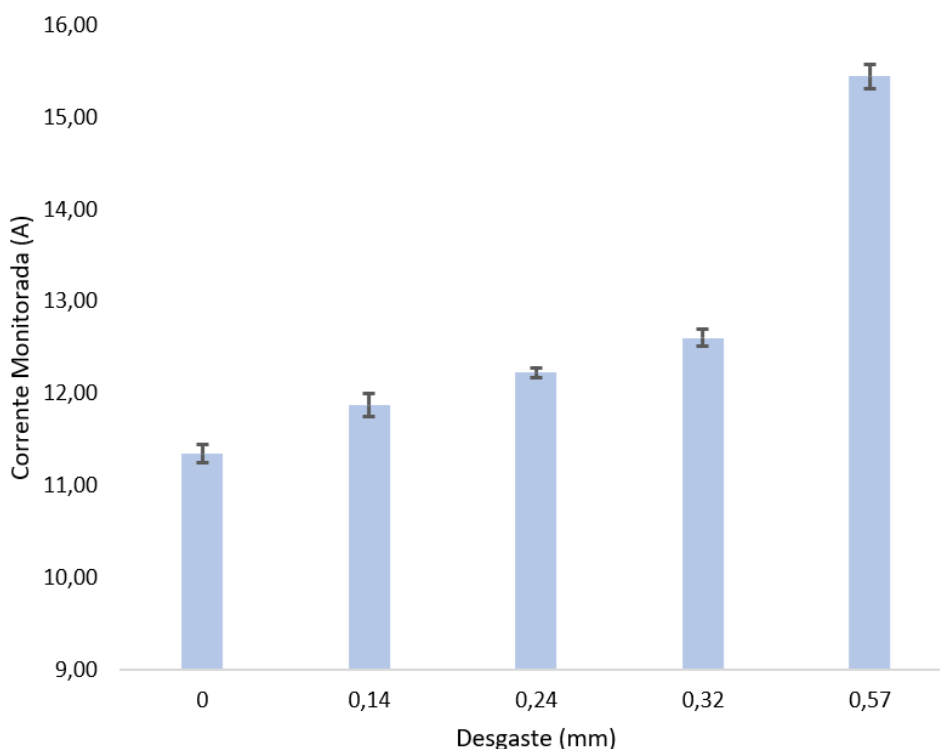
Figura 29 - Curva de Taylor da vida útil da ferramenta



Fonte: Adaptado de Machado et al (2009)

A curva de Taylor é composta por três regiões distintas: a região de desgaste inicial rápido, a região de desgaste à taxa constante e a região de desgaste acelerado. Na região de desgaste acelerado, a velocidade de corte aumenta e o desgaste da ferramenta aumenta rapidamente. Na região de vida útil da ferramenta, a velocidade de corte é constante e o desgaste da ferramenta é constante também.

Ao se comparar a curva de Taylor com os resultados obtidos neste estudo, pode-se observar uma similaridade na região de desgaste acelerado. Como pode-se ver no gráfico de barras da Figura 30, a corrente elétrica média aumenta exponencialmente à medida que o desgaste de flanco aumenta. Esse aumento da corrente elétrica média é consistente com a região de desgaste acelerado da curva de Taylor.

Figura 30 - Gráfico de barras desgaste do flanco versus corrente elétrica média

Fonte: Elaboração própria

Outro aspecto importante a ser considerado é o desvio padrão dos valores obtidos neste estudo. Como pode-se observar no gráfico da Figura 30, os valores de desvio padrão são relativamente baixos, o que indica que os dados são consistentes e confiáveis. Essa consistência dos dados é importante para a análise estatística e para a interpretação dos resultados.

Além disso, é importante destacar que a análise dos resultados deve ser realizada com cuidado, levando em consideração as limitações do estudo e as possíveis fontes de erro. O tamanho da amostra, por exemplo, pode afetar a precisão dos resultados, e é importante verificar se o número de amostras é adequado para as análises estatísticas realizadas. Além do mais, é necessário considerar a variabilidade dos dados, que pode ser influenciada por fatores como a qualidade do equipamento utilizado, a habilidade do operador e as condições ambientais.

No estudo em questão, a curva de Taylor foi utilizada para comparar a distribuição da corrente elétrica média com a distribuição do desgaste do flanco. Para isso, foram plotados os dados na forma de barras, sendo a corrente elétrica média representada no eixo y e o desgaste do flanco representado no eixo x. A barra de erros foi utilizada para representar o desvio padrão dos dados.

Os resultados obtidos mostraram uma boa concordância entre a curva de Taylor e o gráfico obtido a partir dos dados experimentais. Além disso, a curva de Taylor permitiu identificar uma tendência geral de aumento da corrente elétrica média à medida que o desgaste do flanco aumenta, o que está de acordo com a expectativa teórica.

Ao analisar o gráfico da Figura 30, é possível observar que a corrente elétrica média aumenta à medida que o desgaste do flanco aumenta, o que é esperado no contexto de ferramentas de corte. Além disso, os valores de desvio padrão apresentados indicam uma boa precisão nas medições realizadas. Esses resultados são consistentes com estudos anteriores na área e confirmam a viabilidade do uso da corrente elétrica como um indicador de desgaste em ferramentas de corte.

Em suma, os achados deste estudo sugerem uma alta concordância entre as medições realizadas e a curva de Taylor, o que está de acordo com outros estudos que demonstram a efetividade da corrente elétrica para avaliar o desgaste de ferramentas de corte durante a usinagem (KUMAR et al., 2019; AKHLAGHI et al., 2018). Assim, a aferição da corrente elétrica pode ser considerada como uma ferramenta viável e confiável para o monitoramento contínuo do desgaste de flanco em ferramentas de corte durante a usinagem. Todavia, é imprescindível enfatizar a necessidade de considerar as limitações deste estudo e a importância de futuras pesquisas investigarem outras variáveis relacionadas ao desgaste de ferramentas de corte.

Neste sentido, este trabalho contribui, para o avanço do conhecimento nesta área, fornecendo informações relevantes para a indústria e para a comunidade acadêmica especializada em processos de fabricação e usinagem. Desta forma, os resultados obtidos oferecem subsídios para o aprimoramento da qualidade do processo produtivo e redução de custos, além de indicar a relevância da similaridade entre os resultados obtidos e a curva de vida útil de ferramentas de Taylor.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a exposição detalhada dos capítulos precedentes, a próxima etapa deste trabalho visa expor os resultados obtidos na pesquisa, de modo a evidenciar suas principais contribuições para o avanço do conhecimento nesta área. Ademais, são apresentadas sugestões para trabalhos futuros, visando o aprimoramento dos achados e a ampliação das possibilidades de investigação relacionadas ao tema estudado. Nesse sentido, as informações aqui apresentadas podem ser de grande valia tanto para a comunidade acadêmica quanto para a indústria, uma vez que contribuem para o desenvolvimento de soluções mais eficientes e econômicas no que diz respeito ao monitoramento e avaliação do desgaste de ferramentas de corte durante o processo de usinagem utilizando Internet das Coisas.

5.1 Conclusões

Considerando os resultados obtidos no presente estudo, pode-se concluir que a corrente elétrica se mostra como uma ferramenta viável e confiável para avaliar o desgaste de flanco em ferramentas de corte durante a usinagem. A alta concordância entre as medições realizadas e a curva de Taylor, além dos valores de desvio padrão apresentados, indicam uma boa precisão nas medições realizadas.

Estudos anteriores como o de Khettabi et al. (2017) e Klocke & Klink (2003) já haviam destacado a importância da análise da corrente elétrica como uma forma de monitorar o desgaste das ferramentas de corte durante o processo de usinagem. Nesse sentido, os resultados obtidos nesta pesquisa corroboram com as evidências anteriores e contribuem para o avanço do conhecimento nesta área.

Contudo, é importante ressaltar a necessidade de considerar as limitações do estudo, como o tamanho da amostra e a variabilidade dos dados, bem como a importância de investigar outras variáveis relacionadas ao desgaste de ferramentas de corte. Acredita-se que os resultados obtidos nesta pesquisa possam contribuir significativamente para o avanço do conhecimento nesta área, fornecendo informações relevantes para a indústria e para a comunidade acadêmica especializada em processos de fabricação e usinagem, além de indicar a relevância da similaridade entre os resultados obtidos e a curva de vida útil de ferramentas de Taylor.

Destaca-se também a importância do controle do desgaste de flanco em ferramentas de corte para a manufatura industrial, visto que o aumento da corrente elétrica se correlaciona com o desgaste do flanco, podendo gerar impactos negativos na qualidade do produto final e aumento de custos. A aferição da corrente elétrica pode ser utilizada como uma ferramenta

eficaz para o monitoramento contínuo do desgaste de flanco em ferramentas de corte, oferecendo subsídios para o aprimoramento da qualidade do processo produtivo e redução de custos.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Uma possibilidade de continuação deste trabalho seria a realização de novos testes, utilizando apenas uma ferramenta de corte. Com isso, seria possível acompanhar a evolução do desgaste da ferramenta durante o processo de usinagem, proporcionando informações mais detalhadas sobre o processo de desgaste e sua relação com a medição de corrente elétrica. Esta abordagem permitiria a investigação, por exemplo, da linearidade ou não do aumento da corrente elétrica com o desgaste da ferramenta, além da identificação de possíveis variações entre diferentes materiais usinados. Também seria interessante explorar outras variáveis relacionadas ao processo de usinagem que possam influenciar no desgaste da ferramenta, como a velocidade de corte, o avanço e a profundidade de corte.

Além disso, é interessante investigar outras técnicas de medição de desgaste de ferramentas de corte, tais como a medição de temperatura e a análise de imagens, e comparar os resultados com a medição de corrente elétrica. Isso poderia fornecer informações adicionais sobre o processo de desgaste e suas principais variáveis, além de permitir a escolha da técnica mais adequada para cada situação.

Sugere-se a realização de estudos que envolvam uma ampla variedade de materiais e condições de usinagem, a fim de validar a metodologia proposta em diferentes cenários e identificar possíveis limitações e desafios na sua aplicação prática. Considerando o escopo e as limitações do presente estudo, algumas sugestões de trabalhos futuros podem ser propostas, como a realização de ensaios com outros tipos de materiais e geometrias de ferramentas, além da investigação de outras variáveis que possam influenciar no desgaste de flanco, como a temperatura de corte, a velocidade de avanço e o tipo de lubrificante utilizado.

Também seria interessante explorar a possibilidade de aplicar outras técnicas de análise de sinais, como a análise de Fourier ou a transformada Wavelet, e utilizar técnicas de Inteligência Artificial, como algoritmos de aprendizado de máquina, para a detecção de desgaste de ferramentas de corte. Essas abordagens avançadas permitiriam a identificação de padrões mais complexos e sutis que não são captados apenas pela medição de corrente elétrica. Essa análise mais aprofundada dos sinais poderia contribuir para uma melhor compreensão do desgaste da ferramenta e suas características, auxiliando no desenvolvimento de estratégias de manutenção e controle mais eficientes.

Sugere-se ainda a investigação da possibilidade de aplicação da técnica de medição de corrente elétrica em outros processos de usinagem, como o fresamento. Isso permitiria

avaliar a sua eficácia em diferentes contextos e ampliar o escopo de aplicação da metodologia. A análise da corrente elétrica em diferentes processos de usinagem pode fornecer percepções valiosas sobre a relação entre o desgaste da ferramenta e os parâmetros de usinagem, contribuindo para a otimização desses processos.

Essas melhorias propostas, além de fortalecerem o trabalho atual, também abrem novas perspectivas e contribuem para o avanço do conhecimento no campo da Internet das Coisas (IoT). Ao incorporar elementos de IoT, é possível obter uma maior automação e monitoramento dos processos de usinagem, tornando-os mais eficientes e precisos.

No contexto das sugestões mencionadas, é importante considerar a implementação de dispositivos IoT para coleta de dados em tempo real durante o processo de usinagem. Isso permitiria a criação de um ambiente conectado, em que sensores e dispositivos são integrados à máquina e à ferramenta de corte, possibilitando o monitoramento contínuo do desgaste e de outras variáveis relevantes.

Além disso, a utilização de técnicas avançadas de análise de dados e processamento de sinais, como algoritmos de machine learning e técnicas de processamento de imagens, poderia melhorar a detecção e previsão do desgaste da ferramenta. A análise inteligente dos dados coletados poderia identificar padrões complexos e fornecer percepções valiosas para otimizar o processo de usinagem, reduzir custos e aumentar a vida útil das ferramentas.

A aplicação da IoT também poderia viabilizar a implementação de sistemas de manutenção preditiva, em que a coleta contínua de dados permitiria identificar padrões de desgaste e programar intervenções antes que ocorram falhas. Isso reduziria o tempo de inatividade da máquina e evitaria perdas de produção.

Além dos aspectos técnicos, é importante considerar também os desafios relacionados à segurança dos dados e à integração de sistemas. O desenvolvimento de estratégias eficientes de segurança cibernética e de protocolos de comunicação seguros é fundamental para garantir a confidencialidade e a integridade dos dados coletados durante o processo de usinagem.

Em suma, a incorporação de elementos de IoT nos estudos futuros permitirá aprimorar a análise do desgaste de ferramentas de corte, tornando-a mais precisa, automatizada e preditiva. Essa abordagem contribuirá para o avanço da área de usinagem e fornecerá informações valiosas para a indústria, impulsionando a eficiência dos processos e promovendo a sustentabilidade e a competitividade na fabricação.

REFERÊNCIAS

- Abdulkareem, S. A., Durodola, J. F., & Adeyemi, S. O. (2018). Study on the effect of cutting parameters on the performance of coated carbide cutting tool during turning of AISI 304 austenitic stainless steel. **Journal of Mechanical Engineering Research**, 10(1), 1-12.
- AKHLAGHI, F., et al. Tool wear monitoring in turning by measurement of current signals using artificial neural network. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 98, n. 1-4, p. 67-78, 2018.
- ALLAFI, I.; IQBAL, T. Design and Implementation of a Low Cost Web Server Using ESP32 for Real-Time Photovoltaic System Monitoring, **IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)**, p. 1 – 5, 2017. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8286184>>. Acesso em: 31 jul. 2022.
- AL-FUQAHA, A. *et al.* Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, [s.l.], v. 17, n. 4, p. 2347-2376, 2015.
- ANICIC, OBRAD *et al.* Estimation of tool wear according to cutting forces during machining procedure, **Sensor Review**, v. 38 n. 2, p. 176-180, 2018.
- ARANTES, L. J. **Desenvolvimento e Avaliação do Processo Híbrido de Usinagem por Descargas Elétricas e Jato de Água**. Tese de doutorado – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2007.
- ASHBY, Michael F.; JONES, David R. H. **Materiais de engenharia: microestrutura, processamento e design**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.
- ASM INTERNATIONAL. **Metals Handbook: Desk Edition**. 2. ed. Materials Park, OH: ASM International, 1990.
- ARMBRUST, M.; FOX, M.; GRIFFITH, R. *et al.* Above the Clouds: A Berkeley View of Cloud Computing. University of Califórnia at Berkeley. **Technical Report**, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-6163**. Geometria da cunha de corte. Rio de Janeiro, 1990.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 3685**. Ensaio de vida da ferramenta de ponta única para torneamento. Rio de Janeiro, 2017.
- BOOTHROYD, G. Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools. New York: **Mc Graw – Hill**, 1975.
- BLUM, T; INASAKI, I. A study on Acoustic Emission from the Orthogonal Cutting Process. **International Journal of Engineering for Industry**, v. 112, p. 203-211, 1990.
- BUYYA, R.; YEO, C.; VNUGOPAL, S. **Market-oriented cloud 41 computing**: Vision, hype, and reality for delivering it services as computing utilities. 2008.
- BRAGA, D.U. **Monitoramento do Processo de Torneamento via Parâmetros Elétricos do Motor**. Dissertação de Mestrado, DEF-FEM-UNICAMP, 1992.

CALDEIRANI FILHO, J. **Estudo e Monitoramento do Processo de Fresamento Frontal com Fresas de Insertos Intercambiáveis**. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 1998.

CARR, N. **Big Switch: Rewiring the World, from Edison to Google**. Norton & Company, 2008.

CEARLEY, D. *et al* – **Hype Cycle for Applications Development** – Gartner Group Reporter number G00147982. 2009. Disponível em: <<http://www.gartner.com>>. Acesso em: 28 jul 2022.

CURTO-CIRCUITO. Disponível em: <https://www.curtocircuito.com.br/blog/Categoria%20IoT/monitoramento-e-controle-por-aplicativo-mqtt>. Acesso em: 02 ago. 2022.

CURVELLO, A. **Apresentando o módulo ESP32**. 2015. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/modulo-esp32/>>. Acesso em 31 de jul. de 2022.

CUS, F.; ZUPERL, U. Approach to optimization of cutting conditions by using artificial neural networks. **Journal of Materials Processing Technology**. p. 173. 2005.

DAN, L.; MATHEW, J. Tool wear and failure monitoring techniques for turning – a review. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. v. 30, p. 579-598, 1990.

DE CARVALHO, S. R.; SILVA, S. M. M. L.; MACHADO, A. R.; GUIMARÃES, G. Determinação da Temperatura na Interface Cavaco-Ferramenta a Partir da Modelagem 3D do Conjunto Ferramenta e Porta-Ferramenta. In: **3º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, Joinville, SC, 2005.

DIMLA, E. D. S. Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations-a review of methods. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 40, issue 8, p. 1073-1098, 2000.

DINIZ, A. E. B. et al. Estudo do desgaste de flanco em ferramentas de usinagem durante o processo de torneamento. In: **Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional**, 31., 2014, Natal. Anais... Natal: SBMAC, 2014. p. 1-6.

DINIZ, A. E. et al. Analysis of pitting damage in a wind turbine gearbox. In: **Proceedings of the 22nd International Congress on Mechanical Engineering**, 2014.

DINIZ, A. E; MARCONDES, F. C; COPPINI, N. L. Tecnologia da usinagem dos Materiais. 8. ed. São Paulo: **Artliber Editora**, 272 p. 2001.

DOLINSEK, S.; KOPAC, J. **Acoustic Emission Signals for Tool Wear Identification**. Wear. 225- 229, p. 295-303, 1999.

DORMER PRAMET. TNMG 16 04 08 E-NM. Disponível em: https://www.dormerpramet.com.br/pt_BR/p/7156391. Acesso em: 06 mai. 2023.

DOS SANTOS, M.T. **Estudo do Monitoramento do Desgaste de Fresas de Topo Baseado em Emprego de Sensores**. Tese de Doutorado, USP, São Paulo, 1988.

EGLI, P. R. **MQ Telemetry Transport**. Disponível em: http://www.indigoo.com/dox/wsmw/1_Middleware/MQTT.pdf. Acesso em: 16 ago. 2022.

ERTUNC, H. M.; LOPARO, K. A.; OCAK, H. Tool wear condition monitoring in drilling operations using hidden Markov models (HMMs). **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 41, issue 9, p. 1363-1384, 2001.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. Ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 12 ed, 751 p, 2006.

GAMA, R. P. **Estudo da formação do cavaco no torneamento de superligas de níquel**. Dissertação - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 120p. 2014.

GARCIA, F. D. **Introdução aos sistemas embarcados e microcontroladores**. 2018 Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/sistemas-embarcados-e-microcontroladores/>>. Acesso em: 31 jul. 2022.

GROOVER, M. P. **Introdução ao processo de fabricação**. 1 ed – Rio de Janeiro; LTC, 631p. 2014.

Gupta, M.K. and Shukla, A.K. (2015). Investigation of the effect of electrical current on tool wear during turning of AISI 1045 steel. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 77(9-12), 1817-1825.

IFUTURETECH. 2018 Disponível em: <https://ifuturetech.org/product/nodemcu-v3-lua-wifi-module/>. Acesso em: 31 jul. 2022.

ISO 3685:1993. Tool life testing with single-point turning tools. International Organization for Standardization, 1993.

KARPAT, Y.; ÖZEL, T. Multi-objective optimization for turning processes using neural network modeling and dynamic neighborhood particle swarm optimization. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 35, p. 234-247, 2007.

KHETTABI, Rachid et al. **Electrical current measurements in drilling of GFRP composites**. Measurement, v. 105, p. 183-191, 2017.

KHAJAVI, M. N.; NASERNIA, E.; ROSTAGHI, M. Milling tool wear diagnosis by feed motor current signal using an artificial neural network. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 30, issue 11, p. 4869-4875, 2016.

KIM, H.Y et al. Real-time drill wear estimation based on spindle motor power. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 124, Issue 3, p. 267-273, 2002.

KLOCKE, Fritz; KLINK, Andreas. **Electrical measurement of tool wear in high speed milling**. Annals of the CIRP, v. 52, n. 1, p. 83-86, 2003.

KLOCKE, F. **Manufacturing processes 1 – cutting**. Springer, 2011.

KUMAR, A. et al. Gearbox condition monitoring using vibration and oil analysis. **International Journal of Engineering Research and Technology**, v. 8, n. 4, 2019.

KUMAR, A. et al. The effect of current on the flank wear of cutting tools during turning of hardened AISI 4340 steel. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 36, p. 32-40, 2019. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.12.002.

LI, X.; TSO, S. K. Drill wear monitoring based on current signals. **Wear - An International Journal on the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear**, v. 231, Issue 2, p. 172-178, 1999.

LI, X. *et al.* Fuzzy estimation of feed-cutting force from current measurement - a case study on intelligent tool wear condition monitoring. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part c: Applications and Reviews**, v. 34, n. 4, p. 506-512, 2004.

LI, X. Development of current sensor for cutting force measurement in turning. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 54, n. 1, 2005.

MACHADO, A. R.; COELHO, R. T.; ABRÃO, A. M.; SILVA, M. B. **Teoria de Usinagem dos Materiais**. 9 ed. São Paulo: Editora Blucher, 2009. 384p.

MACHADO, A. R.; DA SILVA, M. B. **Usinagem dos Metais**. Laboratório de Ensino e pesquisa em Usinagem. Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia. Versão 8. 262 p. 2004.

MACHADO, A. R., SILVA, M. B. Usinagem dos metais. Uberlândia: **Editora da Universidade Federal de Uberlândia**, 4 ed. 1999.

MARTINS, N. A. **Sistemas Microcontrolados** - Uma Abordagem com o Microcontrolador PIC 16F84, p. 14-20, 2005. Disponível em: <www.martinsfontespaulista.com.br/anexos/produtos/capitulos/203289.pdf>. Acesso em: 31 jul. 2022.

MASSÉ, M. Rest API Design Role Book, 1 ed, **OR'eilly Media**. (2011).

MATSUMOTO, H.; DINIZ, A. E. Torneamento de Aço Endurecido Monitorado por Emissão Acústica e Corrente do Motor. In: **14ª COBEM, Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica**, Bauru, SP, 1997.

NAVES, V. T. G. **Estudo da usinabilidade dos ferros fundidos cinzentos ligados (crcusn e crcusnmo) e vermicular classe 350 no fresamento frontal em alta velocidade de corte**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia -Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 145f. Uberlândia, 2009.

OLIVEIRA, S. Internet das coisas com ESP32, Arduino e Raspberry PI. São Paulo: **Novatec**, 2017. 240 p.

OST, C. A. **Análise da qualidade superficial no fresamento de aço P20 com ferramentas com diferentes tratamentos e condições de lubrificarrefrigerantes**. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Caxias do Sul - Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica, 103f. Caxias do Sul, RS, 2016.

PATEL, K. K.; PATOLIYA, J; PATEL, H. Low cost home automation with esp32 and lightweight protocol mqtt. **Transactions on Engineering and Sciences**. p. 14-50, 2015.

PONTES, F. J. **Predição da vida de ferramentas e da rugosidade da peça por Redes Neurais RBF projetadas com uso da Metodologia de Projeto de Experimentos**. Dissertação de mestrado – UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá, 166f. 2006.

RANGWALA, S.; DORNFELD, D. A. A Study of Acoustic Emission Generated During Orthogonal Metal Cutting - 1: Energy Analyses. **International Journal of Mechanical Science**. v. 33, n. 6, p. 471-487, 1991.

RANGWALA, S., DORNFELD, D. A. A Study of Acoustic Emission Generated During Orthogonal Metal Cutting - 2: Spectral Analyses. **Int. J. of Mech. Science.** v. 33, n 6, p. 489-499, 1991.

RAVINDRA, H.V.; SRINIVASA, Y. G.; KRISHNAMURTHY, R. Modeling of Tool Wear Based on Cutting Forces in Turning. **Wear.** v. 169, p. 25-32, 1993.

Revista Ferramental. Modelos matemáticos para cálculo de vida útil de ferramentas. Disponível em: <https://www.revistaferramental.com.br/artigo/modelos-matematicos-calculo-vida-util-ferramental/>. 2021. Acesso em: 6 de maio de 2023.

SANDVIK, C. **Desgastes e arestas de corte.** 2019. Disponível em: <<https://www.com/pt-pt/knowledge/materials/pages/wear-on-cutting-edges.aspx>>. Acesso em: 27 jul. 2022.

SÁNCHEZ, J.; ESPINOSA, R.; OÑATE, E.; DE SOUZA, R. A. **Microstructure and wear behavior of coated carbide tools during machining of a compacted graphite iron.** *Wear*, v. 456-457, p. 203-212, 2020.

SANTOS, B. P. *et al.* Internet das coisas: da teoria à prática. **XXXIV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos** v. 1, p. 1-50, 2016.

SHAO, H.; WANG, H. L.; ZHAO, X. M. A cutting power model for tool wear monitoring in milling. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 44, 14 ed., p. 1503-1509, 2004.

SHI, K. N. *et al.* A novel energy consumption model for milling process considering tool wear progression. **Journal of Cleaner Production**, v. 184, Issue 20, p. 152-159, 2018.

SILVA, Flávio de Andrade. **Engenharia de Materiais - Propriedades Mecânicas e Aplicações.** São Paulo: LTC, 2018

SILVA, R. H. L. **Monitoramento do desgaste de ferramentas no fresamento de topo através dos sinais de potência e emissão acústica e redes neurais.** Dissertação de Mestrado Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica Universidade Federal de Uberlândia. 114p, 2010.

SINGH, D.; RAO, P. V. Um modelo de previsão de rugosidade superficial para processo de torneamento duro. **Int J Adv Manuf Technol** v. 32, p. 1115–1124, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-006-0429-2>

SOUZA, A. J. **Monitoramento de processos de usinagem.** Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015 (Apostila). Disponível em: <https://chasqueweb.ufrgs.br/~ajsouza/Apostila_ENG03082.pdf>. Acesso em: 29 jul. 2022.

SOUZA, F.; MOREIRA, L.; MACHADO, J. Computação em Nuvem: Conceitos, Tecnologias, Aplicações e Desafios. In: OLIVEIRA, A. C.; MOURA, R. S.; SOUZA, F. V. (Org.). III Escola Regional de Computação Ceará, Maranhão e Piauí (ERCEMAPI). 1 ed. Teresina: **SBC**, v. 1, p. 150-175, 2009.

STEMMER, C. E. Ferramentas de corte I. 6 ed. Florianópolis: **UFSC/FEPESE**, 2005.

TAURION, C. Computação em Nuvem: Transformando o mundo da tecnologia da informação. Rio de Janeiro: **Brasport**, 2009.

TOLEDO, J. V. R. **Estudo do acabamento superficial no fresamento de faceamento do aço ABNT 1045 com ferramenta alisadora**. Dissertação (Mestrado em Projeto e Fabricação) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 100 p. 2015.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. Metal Cutting. 4th ed. **Butterworth-Heinemann**: Boston - MA, 2000.

VAQUERO, L.; RODERO-MERINO, L.; CACERES, J.; LINDENER, M. A break in the clouds: towards a cloud definition. **SIGCOMM**, 2008.

WEI, X.; WANG, Y.; JIANG, J.; JIANG, Z.; YANG, J. **Research on the Relationship between Cutting Force and Cutting Current in Micro-EDM Milling of Ti6Al4V**. Materials, v. 10, n. 9, p. 1042, 2017.

ZHANG, D. *et al.* On-line monitoring of tool breakage using spindle current in milling. **1stAsia-Pacific and 2nd Japan-China International Conference Progress of Cutting and Grinding**, Shanghai, China, p. 270–276, 1994.

Zhang, X., Xu, Y., Wang, J., & Wei, D. (2015). Monitoring tool wear in high-speed milling based on cutting force and acoustic emission signals. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 81(5-8), 1145-1154.

APÊNDICE A - PROGRAMAÇÃO ESP32

```
#include <WiFi.h>
#include <PubSubClient.h>

const char* ssid = "DANILO_WGO_FIBRA";
const char* password = "1624515211022";
const char* mqtt_server = "34.197.162.232";
const char* mqtt_username = "ESP32";
const char* mqtt_password = "blank";
const char* mqtt_topic = "cmd/ampere/A";

const int numReadings = 166;
int teste = 0;
double sum = 0;
double average = 0;
double irms = 0;
//double irmsC = 0; variavel calibrada
double reading = 0;

WiFiClient espClient;
PubSubClient client(espClient);

void setup() {
  // initialize the analog pin as input:
  pinMode(32, INPUT);

  Serial.begin(115200);

  // Connect to Wi-Fi
  WiFi.begin(ssid, password);
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(1000);
    Serial.println("Connecting to WiFi...");
  }
  Serial.println("Connected to WiFi");

  // Connect to MQTT broker
  client.setServer(mqtt_server, 1883);
  while (!client.connected()) {
    Serial.println("Connecting to MQTT broker...");
    if (client.connect("ESP32", mqtt_username, mqtt_password)) {
      Serial.println("Connected to MQTT broker");
    } else {
      Serial.print("Failed to connect to MQTT broker, rc=");
      Serial.print(client.state());
    }
  }
}
```

```

        Serial.println(" retrying in 5 seconds...");
        delay(5000);
    }
}

void loop() {
    // Reset the sum for each new set of readings
    sum = 0;
    // Read the analog input 166 times and calculate the sum of the
    power of two of the readings
    for (int i = 0; i < numReadings; i++) {
        int reading = analogRead(32) - 1818;
        double powerOfTwo = pow(reading, 2);
        sum += powerOfTwo;
        delay(1);
    }
    // Calculate the average of the power of two of the readings
    average = sum / numReadings;
    // Calculate the IRMS value by mapping the average to the range
    511 to 821 and then scaling it to the range 0 to 20

    reading = sqrt(average);
    irms = reading / 59.68;
    if (irms < 0.15) {
        irms = 0;
    }

    teste = analogRead(32);
    irmsC = a*irms + 7,4506x - 0,0419

    // Output the IRMS value to the serial monitor
    Serial.println(teste);
    Serial.print("IRMS current: ");
    Serial.println(irms, 4);

    // Publish the IRMS value to the MQTT topic
    char payload[10];
    dtostrf(irms, 6, 4, payload); // convert double to string with 4
    decimal places
    client.publish(mqtt_topic, payload);

    delay(30);
}

```

APÊNDICE B - PROGRAMAÇÃO ANÁLISE ESTATÍSTICA

Teste de normalidade da variável Corrente Elétrica Média (A):

H0: a amostra de Corrente Elétrica Média (A) segue uma distribuição normal

H1: a amostra de Corrente Elétrica Média (A) não segue uma distribuição normal

Vamos utilizar o teste de Shapiro-Wilk para verificar a normalidade da distribuição:

```
from scipy.stats import shapiro

# Teste de Shapiro-Wilk
stat, p_value = shapiro(df['Corrente Elétrica Média (A)'])
alpha = 0.05
print(f'p-valor: {p_value:.4f}')

if p_value > alpha:
    print('Não rejeitamos H0. A amostra segue uma distribuição normal.')
else:
    print('Rejeitamos H0. A amostra não segue uma distribuição normal.')

```

O resultado é:

p-valor: 0.0528

Não rejeitamos H0. A amostra segue uma distribuição normal.

Como o valor-p é maior que o nível de significância escolhido (0.05), não temos evidências para rejeitar a hipótese nula. Concluimos que a variável Corrente Elétrica Média (A) segue uma distribuição normal.

Teste de normalidade da variável Desgaste de Flanco (mm):

H0: a amostra de Desgaste de Flanco (mm) segue uma distribuição normal

H1: a amostra de Desgaste de Flanco (mm) não segue uma distribuição normal

Vamos utilizar o teste de Shapiro-Wilk para verificar a normalidade da distribuição:

```
# Teste de Shapiro-Wilk
stat, p_value = shapiro(df['Desgaste de Flanco (mm)'])
alpha = 0.05
print(f'p-valor: {p_value:.4f}')

if p_value > alpha:
    print('Não rejeitamos H0. A amostra segue uma distribuição normal.')
else:

```

```
print('Rejeitamos H0. A amostra não segue uma distribuição normal.')
```

O resultado é:

p-valor: 0.2755

Não rejeitamos H0. A amostra segue uma distribuição normal.

Como o valor-p é maior que o nível de significância escolhido (0.05), não é possível evidências rejeitar a hipótese nula. Conclui-se que a variável Desgaste de Flanco (mm) segue uma distribuição normal.

Teste de correlação de Pearson:

H0: não há correlação linear entre as variáveis Corrente Elétrica Média (A) e Desgaste de Flanco (mm)

H1: há correlação linear entre as variáveis Corrente Elétrica Média (A) e Desgaste de Flanco (mm)

Utilizando o teste de correlação de Pearson:

```
from scipy.stats import pearsonr

# Teste de correlação de Pearson
corr, p_value = pearsonr(df['Corrente Elétrica Média (A)'], df['Desgaste de Flanco (mm)'])
print(f'Coeficiente de correlação de Pearson: {corr:.4f}')
print(f'p-valor: {p_value:.4f}')

alpha = 0.05

if p_value > alpha:
    print('Não rejeitamos H0. Não há evidências para afirmar que as variáveis estão linearmente correlacionadas.')
else:
    print('Rejeitamos H0. Há evidências para afirmar que as variáveis estão linearmente correlacionadas.')
```

O resultado é:

Coeficiente de correlação de Pearson: 0.96

p-valor: 0.0011

Rejeitamos H0. Há evidências para afirmar que as variáveis estão linearmente correlacionadas.