

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE SÃO PAULO – IFSP
PEDRO FERNANDO POVEDA

DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA DE CORTE INSTANTÂNEA EM
TORNO CNC POR MEIO DO MONITORAMENTO DA DEMANDA DE
POTÊNCIA ELÉTRICA

São Paulo
2018

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE SÃO PAULO – IFSP
PEDRO FERNANDO POVEDA**

**DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA DE CORTE INSTANTÂNEA EM TORNO CNC
POR MEIO DO MONITORAMENTO DA DEMANDA DE POTÊNCIA ELÉTRICA**

Dissertação apresentada ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - IFSP, como parte dos requisitos para conclusão do curso de Mestrado Profissional em Automação e Controle de Processos.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Pires

São Paulo
2018

Catálogo na fonte
Biblioteca Francisco Montojos - IFSP Campus São Paulo
Dados fornecidos pelo(a) autor(a)

P739

Poveda, Pedro Fernando

Determinação da potência de corte instantânea em torno cnc por meio do monitoramento da demanda de potência elétrica / Pedro Fernando Poveda. São Paulo: [s.n.], 2018.

88 f. il.

Orientador: Ricardo Pires

Dissertação (Mestrado Profissional em Automação e Controle de Processos) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, IFSP, 2018.

1. Potência de Corte. 2. Desgaste de Ferramentas. 3. Parâmetros de Usinagem. 4. Usinagem Em Torno Cnc. 5. Aquisição E Tratamento de Sinais. I. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo II. Título.

CDD



INSTITUTO FEDERAL
SÃO PAULO
Campus São Paulo

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SÃO PAULO
CAMPUS SÃO PAULO
DIRETORIA GERAL DO CAMPUS SÃO PAULO
Coordenadoria de Registros Escolares de Pós-Graduação

ATA DE EXAME DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Nome do Programa: **Mestrado Profissional em Automação e Controle de Processos**

Nome do(a) Aluno(a): Pedro Fernando Poveda

Nome do(a) Orientador(a): Prof. Dr. Ricardo Pires

Nome do(a) Coorientador(a):

Título do Trabalho: "Determinação da potência de corte instantânea em torno CNC por meio do monitoramento da demanda de potência elétrica"

Abaixo o resultado de cada participante da Banca Examinadora

Nome completo dos Participantes Titulares da Banca	Sigla da Instituição	Aprovado / Não Aprovado
Prof. Dr. Ricardo Pires– Orientador	IFSP – SPO	<i>aprovado</i>
Prof. Dr. Cesar da Costa - Membro Interno	IFSP – SPO	<i>Aprova do</i>
Prof. Dr. Amauri Hassui – Membro Externo	UNICAMP	<i>APROVADO</i>
Nome completo dos Participantes Suplentes da Banca	Sigla da Instituição	Aprovado / Não Aprovado
Prof. Dr. Paulo Sergio Dainez - Membro Interno	IFSP – SPO	
Prof. Dr. Daniel Iwao Suyama – Membro Externo	UNICAMP	

Considerando-o: APROVADO
 NÃO APROVADO

Assinaturas

São Paulo, 16 de maio de 2018

Ricardo Pires

Presidente da Banca

Amury

Membro Externo

Cesar da Costa

Membro Interno

Observações:

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu falecido pai Pedro Poveda, exemplo, amigo, conselheiro e incentivador em todos os momentos que compartilhamos juntos. À minha mãe Luiza, pelo amor e dedicação incondicional. À minha esposa Eliane, sempre companheira nos bons e maus momentos desta jornada. Aos meus filhos Pedro Henrique e Luiz Gustavo, que me ensinam muito e aos quais me esforço para ser exemplo de retidão e esforço.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Dr. Ricardo Pires, incentivador e exemplo de professor e pesquisador dedicado, atencioso, paciente e minucioso nas correções deste trabalho, um ser humano de bondade, generosidade e humildade imensas.

Agradeço aos professores Dr. Givanildo Alves dos Santos e Dr. Amauri Hassui pelas valiosas considerações que foram de grande valia no aprimoramento da qualidade deste trabalho.

Agradeço aos professores que conheci neste programa de mestrado, Dr. Alexandre Simião Caporali e Dr. Cesar da Costa, que muito me ensinaram e acabaram por se tornar amigos e parceiros em outros projetos.

Agradeço também a todos os amigos e colegas professores do Departamento de Mecânica do Instituto Federal de São Paulo, campus São Paulo, nos quais me inspiro como professor e pesquisador.

“Quanto mais aprendo, mais me dou conta da minha ignorância”

Albert Einstein

RESUMO

Quando se elaboram programas para usinagem em máquinas com CNC, uma das grandes dificuldades é a escolha dos parâmetros de usinagem mais adequados a cada situação de forma a otimizar a relação entre volume produzido e ferramentas de usinagem consumidas. Frequentemente, somente após várias peças produzidas se chega a resultados próximos dos ideais. Neste trabalho, buscou-se o desenvolvimento de um sistema de baixo custo, não invasivo, para determinação e indicação da potência de corte instantânea (em tempo real) mediante o monitoramento da potência elétrica demandada em um torno CNC, de forma a se observar a progressiva perda de eficiência nos processos de usinagem em razão do desgaste das ferramentas e agilizar a definição dos parâmetros mais adequados ao processo em curso. Foi desenvolvido um dispositivo para aquisição e tratamento dos sinais de correntes e tensões elétricas, para informação em tempo real da potência elétrica demandada pela máquina, relacionando-a com a potência de corte teórica na operação de usinagem em curso. O sistema mostrou-se eficiente na comprovação de haver uma relação entre o nível de potência elétrica e a potência de corte respectiva no dado instante. Também foi possível aferir o aumento da Potência de Corte, determinada a partir do monitoramento da variação de demanda de potência elétrica pela máquina, conforme a ferramenta se desgasta no processo de usinagem em curso. Apesar de os resultados não permitirem concluir que o aparato e metodologia desenvolvidos apresentam o nível ideal de eficiência e praticidade para serem considerados “prontos e acabados”, pode-se considerar que significativo avanço foi conquistado neste sentido. Como todo projeto de inovação, precisa ser aprofundado e aperfeiçoado, para que possa se tornar cada vez mais prático, eficiente e competitivo.

Palavras-chave: Potência de corte, Desgaste de Ferramentas, Parâmetros de usinagem, Usinagem em Torno CNC, Aquisição e tratamento de sinais.

ABSTRACT

When machining programs are developed in CNC machines, one of the great difficulties is choosing the most appropriate machining parameters for each situation in order to optimize the ratio between the volume produced and the machining tools consumed. Often, only after several pieces are produced results close to ideals. In this work, the development of a low-cost, non-invasive system was used to determine and indicate the instantaneous (real time) cutting power by monitoring the electric power demanded in a CNC lathe, in order to observe the Progressive loss of efficiency in machining processes due to tool wear. A device was developed to capture and treat current and voltage signals for real-time information on the electrical power demanded by the machine, relating it to the theoretical power of the current machining operation. The system proved to be efficient in proving that there is a relation between the electric power level and the respective cutting power at a given instant. It was also possible to gauge the increase in Cutting Power, determined from the monitoring of the variation of electric power demand by the machine, as the tool wears out in the current machining process. Although the results do not allow to conclude that the apparatus and methodology developed have the ideal level of efficiency and practicality to be considered "ready and finished", it can be considered that significant progress has been made in this regard. Like any innovation project, it needs to be deepened and improved, so that it can become more and more practical, efficient and competitive. In the last part of the work, the aspects to be developed to make possible an efficient application of the methodology and the developed system are presented.

Keywords: CNC machine tool, CNC lathe, Machining parameters, Cutting tools,

SUMÁRIO

RESUMO.....	8
ABSTRACT	9
SUMÁRIO.....	10
LISTA DE FIGURAS	12
LISTA DE TABELAS	14
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	15
1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Objetivo geral.....	20
1.2 Objetivos específicos	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	25
3.1 Fluxo de Energia em Sistemas.....	25
3.2 Potência Elétrica em um Sistema Trifásico	26
3.3 Cálculo da Potência de Corte Teórica.....	28
3.3.1 Área da seção de usinagem (A)	28
3.3.2 Força de Corte Teórica (F_c).....	29
3.3.3 Velocidade de Corte (v_c).....	29
3.3.4 Potência de Corte Teórica (P_c).....	30
4 METODOLOGIA	31
4.1 Introdução	31
4.2 Máquina, ferramentas e materiais utilizados	32
4.3 Ensaios (operações) de Usinagem	36
4.3.1 Primeira etapa de ensaios.....	36
4.3.2 Segunda etapa de ensaios.....	38
4.3.3 Terceira etapa de ensaios	39
4.4 Captura e tratamento dos Sinais	39
5 RESULTADOS	46
5.1 Resultados da primeira etapa de ensaios	46
5.1.1 Análise dos Resultados	47
5.1.2 Conclusões da primeira etapa dos ensaios	49
5.2 Segunda etapa de ensaios.....	49

5.2.1 Paridade dos valores das correntes medidas.....	50
5.2.2 Resultados da segunda etapa dos ensaios.....	51
5.2.3 Análise dos resultados da segunda etapa.....	53
5.2.4 Conclusões da segunda etapa dos ensaios.....	55
5.3 Terceira etapa dos ensaios	55
5.3.1 Resultados da terceira etapa dos ensaios.....	55
5.3.2 Conclusões da terceira etapa de ensaios.....	57
6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
ANEXOS	62
APÊNDICES.....	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Insertos de Metal Duro	17
Figura 2: Insertos (pastilhas) de Metal Duro Montadas em Suportes.....	17
Figura 3: Parâmetros de corte na usinagem por torneamento	18
Figura 4: Parâmetros de Usinagem recomendados.....	18
Figura 5: Potências elétrica e mecânica em função da profundidade	23
Figura 6: Fluxo de energia em um sistema	25
Figura 7: Método dos dois wattímetros aplicado à carga conectada em Δ ou Y	26
Figura 8: Verificação se as potências parciais devem ser somadas ou subtraídas...	26
Figura 9: Foto da placa de um dos servomotores da máquina.....	27
Figura 10 - Seção de usinagem no torneamento	28
Figura 11: Ferramenta avança em Vazio e em Usinagem	31
Figura 12: Torno marca Romi modelo Centur 30D com CNC Siemens	33
Figura 13: Torno marca Ergomat modelo TND-200 com CNC Fanuc.....	33
Figura 14: Corpos de prova dos materiais para medição da dureza	35
Figura 15: Ensaio de usinagem	36
Figura 16: Pino em aço inoxidável AISI 304.....	39
Figura 17: Módulos controladores	40
Figura 18: Sensores de corrente	40
Figura 19: Placa Arduino Uno	41
Figura 20: Dispositivo de Aquisição, condicionamento e tratamento dos sinais.....	41
Figura 21: Primeiro gráfico e equação para calibração da tensão	43
Figura 22: Segundo gráfico e equação para calibração da tensão	43
Figura 23: Curva (senóide) característica da corrente alternada	43
Figura 24: Termite e seu ambiente de configuração e recepção de sinais	45
Figura 25: Gráfico comparativo das potências elétricas medidas com as potências de corte teóricas.....	48

Figura 26: Gráfico detalhando os picos de corrente (A) ao longo do tempo decorrido nos ensaios (ms)	50
Figura 27: Detalhe do pico de corrente 4 mostrando o intervalo de usinagem	51
Figura 28 Gráfico e equação da Potência Elétrica em função da velocidade angular do eixo árvore.....	53
Figura 29: Gráfico e equação da diferença de potência em função da potência de corte teórica.....	54
Figura 30: Primeira peça produzida no ensaio	56
Figura 31: Última peça produzida no ensaio	56
Figura 32: Evolução da Potência de Corte em relação às peças produzidas	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resultados usinagem do 1º Bloco.....	21
Tabela 2: Resultados usinagem do 2º Bloco.....	21
Tabela 3: Quadro com os parâmetros característicos dos materiais.....	35
Tabela 4: Parâmetros de Usinagem nos ensaios da primeira etapa.....	37
Tabela 5: Potências Teóricas de Corte em watts.....	37
Tabela 6: Parâmetros de Usinagem nos ensaios da segunda etapa.....	38
Tabela 7: Potências Teóricas de Corte em watts.....	38
Tabela 8: Valores capturados (lidos) e medidos das Tensões.....	43
Tabela 9: Calibração dos Sensores de Corrente.....	44
Tabela 10: Resumo dos Resultados dos Ensaios de Usinagem da 1ª etapa.....	47
Tabela 11: Quadro comparativo entre as Potências de corte obtidas e teóricas.....	48
Tabela 12: Média dos resultados da 2ª etapa.....	52
Tabela 13: Valores da potência elétrica medida em função da velocidade angular do eixo árvore.....	53
Tabela 14: Valores da diferença de potência elétrica medida em função da potência de corte.....	54
Tabela 15: Resultados obtidos com a peça em produção.....	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<i>AISI</i>	<i>American Iron and Steel Institute</i>
CNC	<i>Computer Numeric Control</i> (Comando Numérico Computadorizado)
PC	<i>Personal Computer</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>

1 INTRODUÇÃO

Na segunda metade do século passado, surgiram as primeiras máquinas para usinagem dotadas de Comandos Numéricos Computadorizados (CNC)¹, que executam as operações de acordo com um programa previamente elaborado, dispensando a habilidade do operador para a produção.

Diversos autores, como Groover (2011), apontam as vantagens que esses equipamentos proporcionam em relação às máquinas convencionais (de operação manual):

- Alta produtividade;
- Possibilidade de fabricação de peças com geometrias mais complexas;
- Grande precisão (tolerâncias dimensionais mais estreitas);
- Melhor acabamento superficial (baixa rugosidade);
- Reprodutividade (todas as peças rigorosamente dentro das especificações) sem necessidade de inspeções constantes;
- Possibilidade de se produzir grande diversidade de peças sem a necessidade de ajustes demorados no equipamento;
- Independência da habilidade dos operadores para se alcançar as especificações desejadas.

Inicialmente, devido aos elevados custos destes equipamentos, poucas indústrias tinham condições financeiras de adquiri-los. Com o ganho de escala ao longo do tempo, redução do custo de componentes eletrônicos e de informática somados às grandes vantagens já mencionadas, o uso se popularizou. Hoje, é inimaginável a indústria, principalmente os setores mecânico e metalúrgico, sem o uso de máquinas-ferramenta CNC.

Por outro lado, devido às altas velocidades de usinagem proporcionadas por essas máquinas, os fabricantes de ferramentas tiveram que desenvolver novos produtos, de forma a potencializar a plena utilização dos recursos produtivos disponíveis. As antigas ferramentas convencionais de aço rápido² não atendiam as exigências demandadas pelos novos equipamentos que surgiam e deram lugar às de

¹ Em inglês a sigla CNC é a mesma, abreviação de *Computer Numeric Control*.

² O termo aço rápido vem do inglês "*high-speed steel*", são ferramentas em aços liga (empregando-se diversos elementos de liga como tungstênio, cromo, vanádio, molibidênio, etc.).

metal duro³ apresentadas em diversos formatos normalizados na forma de pastilhas (também denominadas insertos), conforme a Figura 1.

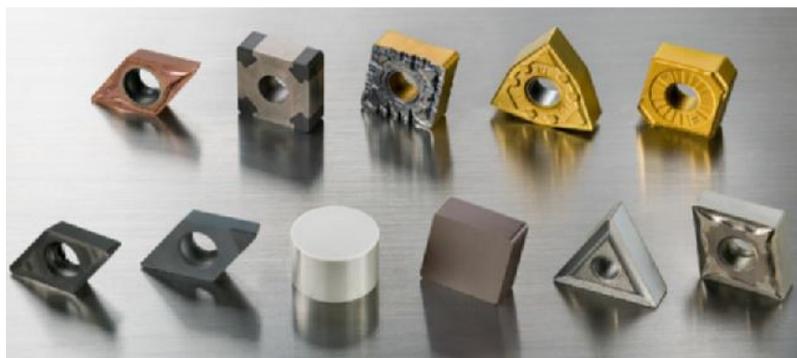


Figura 1 – Insertos de Metal Duro (SANDVIK, 2015)

Para a efetiva utilização em processos de usinagem, essas pastilhas são montadas em suportes adequados, conforme mostrado na Figura 2. A esse conjunto, pastilha mais suporte, denomina-se ferramenta.



Figura 2 – Insertos (pastilhas) de metal duro montadas em suportes (SANDVIK, 2015)

Atualmente, encontram-se no mercado, diversos fabricantes de pastilhas de metal duro para usinagem, que disponibilizam inúmeros modelos de ferramentas, de forma a atender as diferentes condições, decorrentes de variáveis como:

- Diferentes modelos de máquinas CNC;
- Diferentes materiais a serem usinados;
- Técnicas de usinagem distintas para a conformação das peças;
- Tolerâncias e acabamentos superficiais especificados;
- Disponibilidade, tipo de fluido e método de refrigeração durante o processo de usinagem;
- Limitações de custo, produtividade, estoque, logística etc.

³ Metal Duro é um termo genérico dado a materiais compósitos para ferramentas formados por carbonetos.

Quando se elabora um programa para usinagem, devem-se determinar os principais parâmetros de corte (remoção de material da peça em conformação)⁴, conforme detalhado na Figura 3, em que:

- v_c = velocidade de corte em m/min (metros por minuto);
- a_p = profundidade de usinagem em mm (milímetros);
- f_n = avanço em mm/rot (milímetros por rotação).

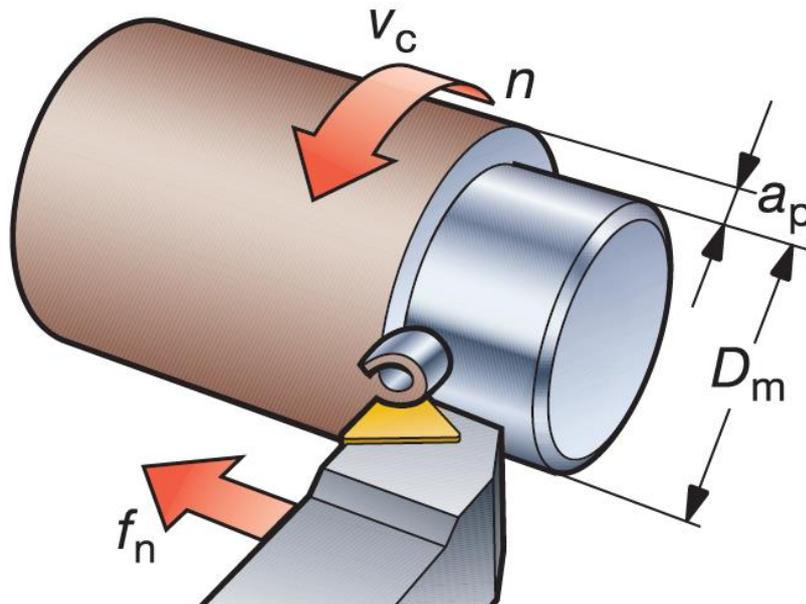


Figura 3 – Parâmetros de corte na usinagem por torneamento (SANDVICK, 2015)

Para cada uma das diferentes opções de ferramentas disponíveis, os fabricantes indicam faixas (intervalos de valores) para os parâmetros de corte, baseados em testes experimentais de usinagem que realizam no desenvolvimento de seus produtos, conforme exemplificado na Figura 4.



Figura 4 – Parâmetros de Usinagem recomendados (SANDVICK, 2015)

⁴ Na literatura técnica, "Usinagem" também é tratado como "Conformação com levantamento de aparas" ou "processos com remoção de materiais".

No exemplo, o fabricante indica um valor de referência para cada variável e, entre parênteses, uma faixa bastante ampla com valores máximos e mínimos recomendados. Para cada condição de usinagem é necessário que se estabeleçam os parâmetros mais adequados.

Efetivamente, quando se desenvolve um programa de usinagem em máquinas CNC, os parâmetros são ajustados experimentalmente de acordo com os resultados obtidos, depois da produção de uma grande quantidade de peças, adaptados para cada caso e ao longo do processo, de forma a se obter a melhor relação entre variáveis inversamente proporcionais, como a vida útil da ferramenta e produtividade.⁵

Um indicador confiável do estado da ferramenta (pastilha) é a potência de corte: uma ferramenta nova apresenta uma maior eficiência de corte, demandando uma menor potência mecânica para remoção do material, conforme a ferramenta vai se desgastando sua eficiência de corte diminui, podendo demandar uma maior potência de corte.

Seria de extrema utilidade na indústria, um meio de se obter a potência útil de usinagem instantaneamente ao longo do processo de produção. Esse recurso permitiria uma maior percepção da progressão do desgaste da ferramenta de corte e abreviar a obtenção dos parâmetros mais adequados (velocidade de corte, profundidade de usinagem e avanço da ferramenta de corte) de forma a customizar ao máximo os processos. Seria também um método comparativo eficiente da relação custo x benefício para as diversas opções de modelos e marcas de ferramentas disponíveis.

A maioria das pesquisas efetuadas para determinação da potência de corte durante os processos de usinagem envolvem a utilização de células de carga (transdutores, extensômetros etc.), ou seja, são métodos invasivos que comprometem a normalidade da produção. Durante o processo de pesquisa bibliográfica, não foram encontradas soluções similares a essa proposta de pesquisa.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de baixo custo, para determinação e indicação da potência de corte instantânea (em tempo real) mediante o monitoramento da potência elétrica demandada pela máquina.

⁵ Maior vida útil da ferramenta significa produzir o maior número possível de peças com a mesma ferramenta e maior produtividade significa produzir o maior número possível de peças no menor intervalo de tempo possível.

1.1 Objetivo geral

Desenvolver um sistema e metodologia (*software e hardware*) eficientes e de baixo custo, não invasivo (sem comprometer os processos de produção), para a determinação da potência útil de corte instantânea em torno CNC, possibilitando a indicação em tempo real da evolução do desgaste da ferramenta com o processo em curso.

1.2 Objetivos específicos

Ao longo do desenvolvimento do projeto, espera-se comprovar experimentalmente:

- A relação direta entre a potência de corte na usinagem e a potência elétrica demandada pela máquina;
- A validade do método de cálculo da potência de corte por meio da equação de Kienzle;⁶
- Comprovação da relação das diferentes situações de usinagem com a potência de corte, em especial da força específica de corte (K_c) teórica dos materiais e sua proporcionalidade com a dureza real medida;⁷
- Resposta e confiabilidade do sistema de captura e tratamento de sinais (tensões e correntes elétricas) comprovada pela reprodução dos resultados ao longo dos ensaios;

⁶ A equação de Kienzle será tratada com detalhes no tópico 3.3 Cálculo da Potência de Corte teórica.

⁷ A força específica de corte (K_c) será definida e tratada em detalhes, bem como sua relação com a dureza do material, nos tópicos: 3.3 Cálculo da Potência de Corte teórica e 4 Metodologia.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Durante pesquisas realizadas em bases de trabalhos acadêmicos (Scopus, CAPES e Google Acadêmico), não foram encontrados trabalhos na linha de pesquisa proposta neste trabalho. Utilizando-se as palavras chave em português em pesquisa no Google Acadêmico houve retorno de 459 trabalhos em língua portuguesa, com as keywords foram relacionados aproximadamente 21.200 trabalhos em língua inglesa.

Diversos trabalhos são conceituais e teóricos, como o de Souza (2004) que produziu um estudo abordando a aplicação de sensores (temperatura, vibração, acústico) para monitoramento das condições de usinagem para se obter um prognóstico da vida da ferramenta de corte no torneamento. Dimla (2000) produziu um trabalho teórico, revisando metodologias e sensores para o monitoramento do desgaste de ferramentas nos processos de usinagem.

Outros trabalhos analisam o desgaste de ferramentas na usinagem de diferentes materiais, como Bonifácio e Diniz (1994), Marksberry e Jawahir (2008), Altin *et al* (2007), Attanasio *et al* (2006) e Kurnar *et al* (2006).

Diversos projetos de pesquisa envolvem estudos voltados para a economia de consumo de energia elétrica das máquinas durante os processos de usinagem. Ou seja, são estudos voltados para se obter uma maior eficiência energética, nesta linha de pesquisa estão relacionados os trabalhos de Shaohua *et al* (2012), Ma *et al* (2014), Sarwar *et al* (2009), Li e Kara (2011) e Behrendt *et al* (2012).

Newman *et al* (2012) direcionou seu trabalho em obter um processo mais eficiente por meio do estudo da vida útil e produtividade das ferramentas, de forma a se obter uma maior eficiência energética da máquina (menor consumo de energia). Nos ensaios, foram usinados 4 canais de 230 mm de comprimento em dois blocos de alumínio, com profundidade final de 12 mm e largura (igual ao diâmetro das ferramentas) de 16 mm em alumínio, em fresadora CNC (modelo Dugard Eagle 850 VMC). Cada canal foi usinado com parâmetros diferentes de profundidade de usinagem em cada passada, chamada naquele trabalho de “h”, avanço (f) e número de passadas (n), o conjunto de parâmetros foi dividido em duas situações (uma para cada bloco e conjunto de canais) classificadas pelos autores como usinagem leve (Tabela 1) e pesada (Tabela 2) de acordo com a taxa de remoção de material, para cada caso registrou-se a potência demandada (P) e foi calculada a energia consumida por volume removido de material (E), obtendo-se os resultados relacionados na

Tabela 1:

Tabela 1: Consumo de energia na usinagem do 1º Bloco

1º Bloco - Usinagem leve					
(fuso a 10000 rpm e taxa de remoção de material de 0,48 cm ³ /s)					
Canal	h (mm)	f (mm/min)	n	P (kW)	E (kJ/cm ³)
1º	1	1800	12	3,28	6,83
2º	2	900	6	3,37	7,02
3º	3	600	4	3,42	7,12
4º	4	450	3	3,48	7,25

Fonte: Newman *et al* (adaptado pelo autor)

Tabela 2: Consumo de energia na usinagem do 2º Bloco

2º Bloco - Usinagem pesada					
(fuso a 6000 rpm e taxa de remoção de material de 2 cm ³ /s)					
Canal	h (mm)	f (mm/min)	n	P (kW)	E (kJ/cm ³)
1º	3	2500	4	3,57	1,78
2º	4	1875	3	3,85	1,92
3º	6	1250	2	3,94	1,97
4º	12	625	1	4,09	2,04

Fonte: Newman *et al* (adaptado pelo autor)

Os autores concluíram que o planejamento adequado dos parâmetros a serem utilizados na usinagem de metais pode resultar em economia significativa de energia elétrica, especialmente quando se aumenta a taxa de remoção de material. A principal relação do trabalho de Newman com esta pesquisa é a captura dos sinais de potência elétrica pela máquina e sua relação com a usinagem. Entretanto, o objetivo deste trabalho é a determinação da potência de corte instantânea, enquanto no trabalho analisado o foco é a racionalização do consumo de energia elétrica. Para isso, o autor propõe o estabelecimento de um modelo matemático que identifique, para cada ferramenta, a taxa de remoção de material ideal.

Avram *et al* (2011) desenvolveu linha de pesquisa semelhante, com a racionalização dos processos ou técnicas alternativas em fresadoras.

Bhushan (2013) demonstrou que com otimização dos parâmetros de corte se obtém, além da minimização do consumo de energia elétrica e prolongamento da vida das ferramentas, ganhos ambientais significativos.

Faleh A. *et al* (2005), determinou o desgaste máximo de brocas de aço-rápido na furação de aço carbono e compósitos (Kevlar, fibra-de-vidro e plásticos reforçados) por meio do monitoramento do consumo diferencial de energia elétrica, variando três parâmetros: diâmetro da broca, velocidade e avanço.

Mannama *et al* (1989) analisou a dinâmica da potência medida e sinais de

corrente dos motores de fuso e alimentação de um torno CNC e um centro de usinagem para estabelecer a resposta de potência e variações de corrente devido ao desgaste da ferramenta, quebra da ferramenta e vibrações.

Entre os trabalhos realizados no Brasil, há o de Lançoni (2008), que fez um estudo comparativo entre a força de corte na retificação medida com um dinamômetro piezelétrico, montado na mesa da máquina, e as correntes e tensões elétricas medidas tanto na entrada como na saída do inversor de frequência que controla a velocidade do motor que aciona o rebole. Os sinais das correntes e tensões elétricas foram adquiridos por meio de sensores de efeito Hall e esses sinais, juntamente com os sinais do dinamômetro, foram direcionados a um dispositivo de aquisição de dados (da National Instruments) para conversão de analógico para digital. Esse dispositivo permitiu a aquisição de 4000 amostras por segundo de cada sinal (uma amostra a cada 0,25 ms) que foram tratados com o software LabVIEW⁸ (também da National Instruments). Finalmente, os dados coletados foram processados e analisados no software Matlab.

O autor concluiu que os resultados obtidos mostraram que os sinais de potência elétrica do motor que aciona o rebole “foram proporcionais aos sinais de força de corte e que é possível substituir o dinamômetro na retificação por sensores de corrente e tensão, com resultados confiáveis”. Entre outras comparações, o gráfico da Figura 5 comprova essa afirmação.

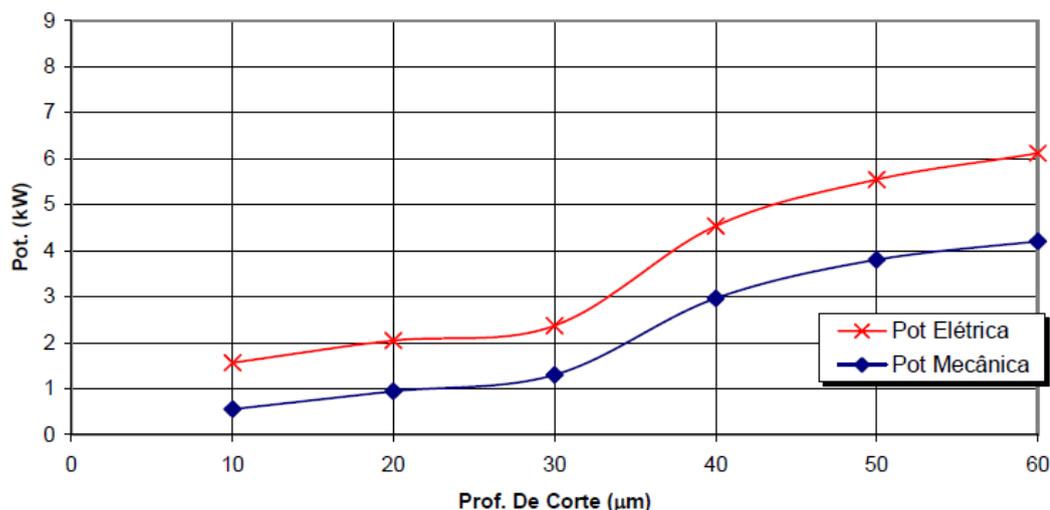


Figura 5 – Potências elétrica e mecânica em função da profundidade (LANÇONI, 2008)

⁸ National Instruments™ LabVIEW: segundo a National Instruments, LabVIEW é um software de engenharia criado para aplicações que requerem teste, medição e controle, com rápido acesso ao hardware e a informações obtidas a partir dos dados (disponível em www.ni.com/NI)

A pesquisa de Lançoni, assim como neste trabalho, comprova a relação e proporcionalidade da potência elétrica da máquina com a força de corte no processo de usinagem. Entretanto, diferentemente da metodologia aqui desenvolvida, Lançoni não estabelece uma equação de conversão da potência elétrica medida em potência ou força de corte na usinagem.

Devido as grandezas envolvidas na retificação, em que a força radial é muito grande em relação à tangencial é um processo desfavorável para a comparação e determinação de uma proporcionalidade entre a potência elétrica e a força de corte.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os principais fundamentos teóricos que embasaram este trabalho foram:

- Fluxo de Energia em Sistemas;
- Potência Elétrica em um Sistema Trifásico;
- Cálculo da Potência de Corte Teórica.

3.1 Fluxo de Energia em Sistemas

De acordo com Boylestad (2014) p. 93, a quantidade de energia na saída de um sistema é sempre menor do que a que entrou, devido às perdas e/ou energia armazenada pelo próprio sistema, conforme esquematizado na Figura 6. A melhor situação que se pode esperar é que os valores absolutos de W_{out} e W_{in} sejam relativamente próximos um do outro.

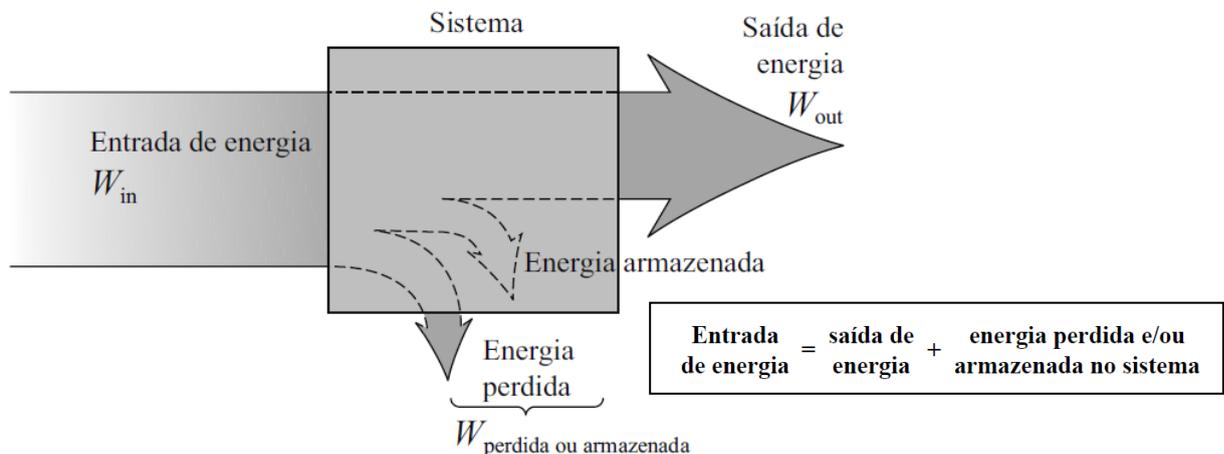


Figura 6 – Fluxo de energia em um sistema (BOYLESTAD, 2014)

Neste trabalho, relacionando com o torno a CNC, sistema é o conjunto compreendido entre a entrada da alimentação dos módulos de controle da máquina, passando pelos cabos, servo-motores, elementos de transmissão mecânica, etc. até a ponta da ferramenta (pastilha de metal duro) que remove o material da peça em usinagem.

3.2 Potência Elétrica em um Sistema Trifásico

De acordo com Boylestad R. L. (2014) p.850-851, a potência fornecida a um circuito trifásico de três fios conectado em Y ou Δ , equilibrado ou não, pode ser medida com apenas dois wattímetros se eles forem conectados adequadamente ao circuito e as leituras forem interpretadas de maneira correta, conforme mostrado na Figura 7.

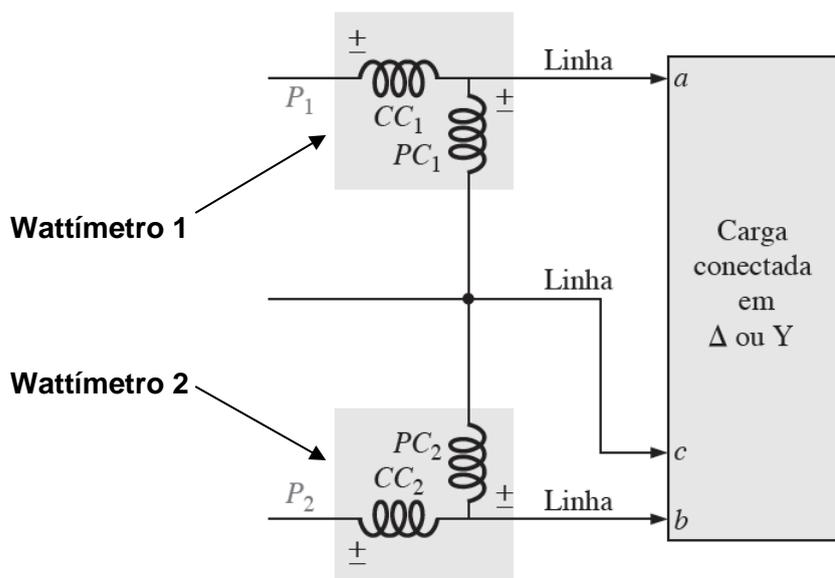


Figura 7 – Método dos dois wattímetros aplicado à carga conectada em Δ ou Y (BOYLESTAD, 2014)

Neste estudo, cada wattímetro foi substituído por 1 sensor de corrente e um sensor de tensão. De acordo com Boylestad (2014) p.851 (Figura 8), a potência total é obtida pela soma (fator de potência > 0,5) ou subtração (fator de potência < 0,5) das potências parciais.

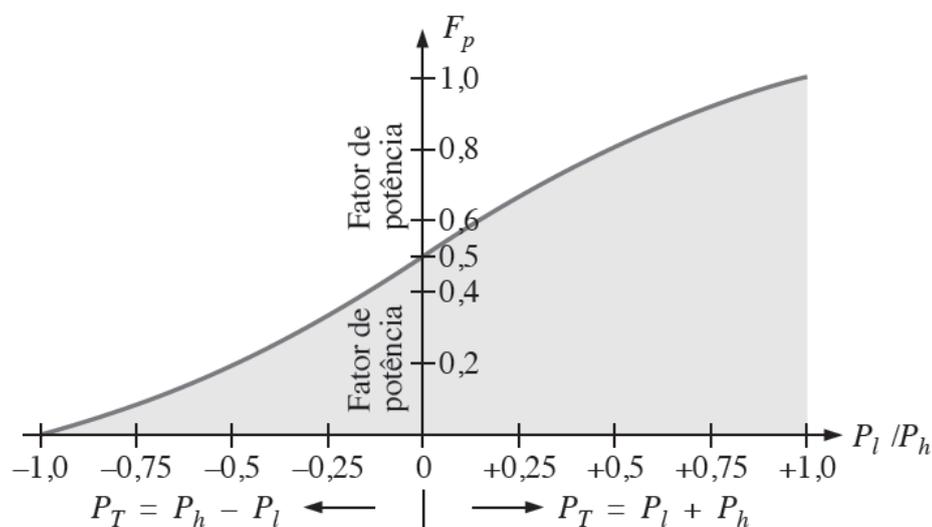


Figura 8 – Verificação se as potências parciais devem ser somadas ou subtraídas (BOYLESTAD, 2014) em que P_T é a potência total, P_l é o módulo da potência parcial menor e P_h é o módulo da potência parcial maior

A curva mostrada na Figura 8 é um gráfico do fator de potência da carga em função da razão P_l / P_h , em que P_l e P_h são os módulos da menor (*lower*) e da maior (*higher*) leitura dos wattímetros, respectivamente. Para um fator de potência (adiantado ou atrasado) maior que 0,5 a razão é positiva. Isso indica que as leituras dos dois wattímetros são positivas e a potência total é a soma das leituras dos dois wattímetros; ou seja, $P_T = P_l + P_h$. Quando o fator de potência é menor do que 0,5 (adiantado ou atrasado), a razão é negativa. Isso quer dizer que uma das leituras é negativa e que a potência total é a diferença entre as duas leituras, conforme a Equação 1:

$$P_T = P_h - P_l \quad (1)$$

Neste trabalho, a potência elétrica medida alimenta os três servomotores responsáveis pelo movimento do eixo árvore, eixo de deslocamento longitudinal e eixo de deslocamento transversal da ferramenta. Os servomotores se caracterizam por apresentarem um fator de potência sempre superior a 0,5 (50 %) conforme a Figura 9, que mostra a placa do servomotor Siemens da máquina, que indica os fatores de potência ($\cos \phi$) se situam entre 0,79 e 0,80, de acordo com a alimentação. Desta forma, a potência total é a soma das duas potências medidas.

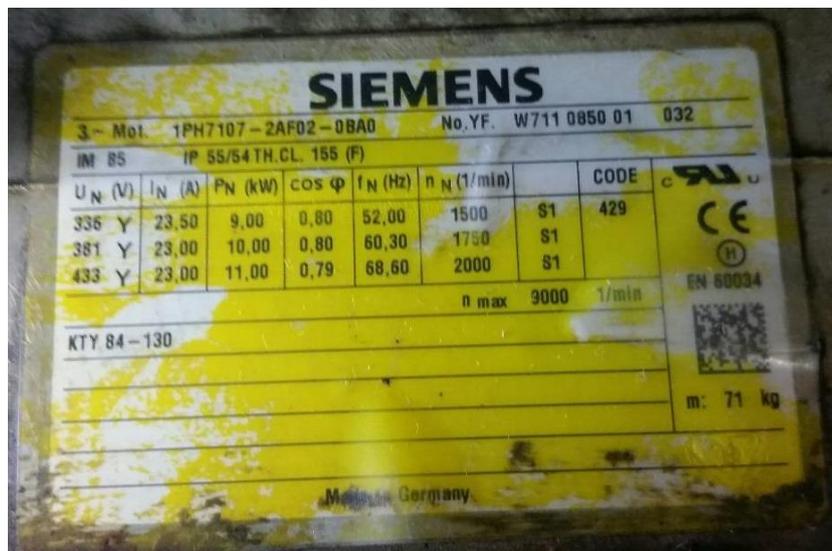


Figura 9 – Foto da placa de um dos servomotores da máquina (Autor)

3.3 Cálculo da Potência de Corte Teórica

Neste tópico, é abordada a metodologia para cálculo da Potência de Corte Teórica. Neste trabalho, este parâmetro será relacionado com a variação da demanda de Potência Elétrica pela máquina.

3.3.1 Área da seção de usinagem (A)

Numa operação de torneamento, a área da seção de corte está representada na Figura 10.

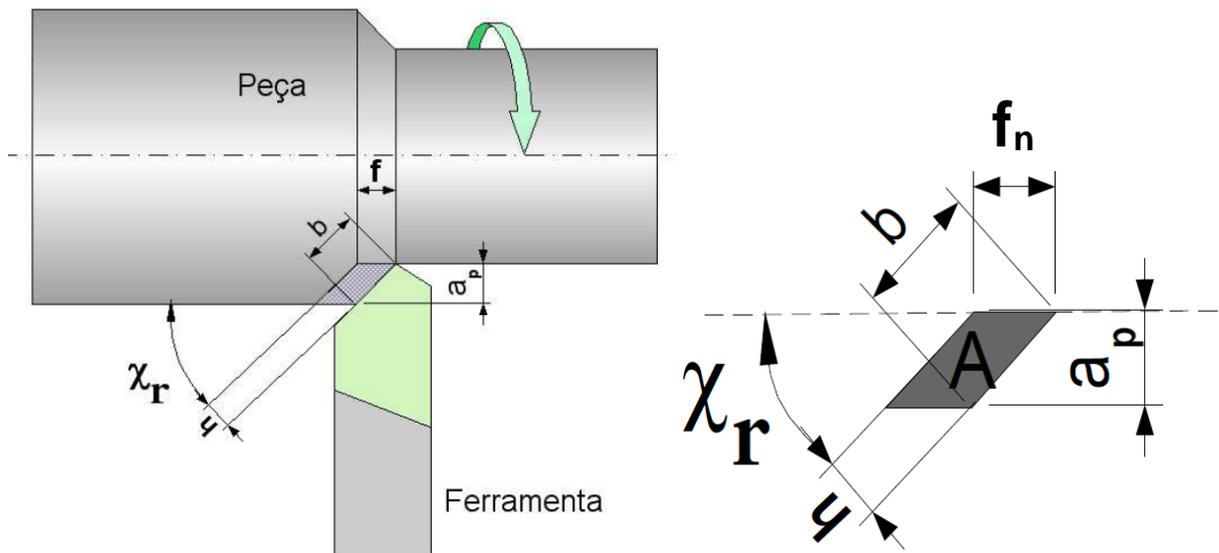


Figura 10 – Seção de usinagem no torneamento (INGA)

A área da seção de usinagem (A), pode ser calculada pela Equação 2.

$$A = f_n \cdot a_p \quad (2)$$

Em que:

A = área da seção de usinagem em mm²;

f_n = avanço da ferramenta em mm/rot;

a_p = profundidade de usinagem em mm.

3.3.2 Força de Corte Teórica (F_c)

Segundo Fracaro (2013), a metodologia mais utilizada para a determinação da Força de Corte Teórica é a equação de Kienzle, expressa na Equação 3.

$$F_c = k_c \cdot A \quad (3)$$

Em que:

F_c = Força teórica de corte em N;

k_c = Força específica de corte em N/mm²;

A = área da seção de usinagem em mm².

A força específica de corte (k_c), também denominada por alguns autores como pressão específica de corte, é um coeficiente determinado experimentalmente, para os diferentes materiais. Segundo Machado (2009), essa equação tem fornecido valores mais próximos dos experimentados para a maioria dos materiais metálicos usinados.

Quando acompanhada de um índice, indica o avanço e profundidade de usinagem utilizados. Por exemplo, $k_{c1.1}$ é a força específica de corte para um avanço de 1 mm/rot e profundidade de usinagem de 1 mm.

3.3.3 Velocidade de Corte (v_c)

Por definição, velocidade de corte é a velocidade tangencial com que a ferramenta (pastilha) percorre o material durante o processo de usinagem, no caso das operações de torneamento, o diâmetro resultante da operação. Assim, neste caso, a velocidade de corte pode ser calculada pela Equação 4.

$$v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad (4)$$

Em que:

v_c = velocidade de corte em m/min;

d = diâmetro torneado em mm;

n = velocidade angular do eixo árvore (peça/material) em rotações por minuto (rpm).

3.3.4 Potência de Corte Teórica (P_c)

De acordo com Fracaro (2013), a Potência de Corte teórica é determinada pelo produto da velocidade de corte (v_c) pela força de corte teórica (F_c). Assim, tem-se a Equação 5:

$$P_c = \frac{v_c \cdot F_c}{60} \quad (5)$$

Em que:

P_c = potência de corte em W;

v_c = velocidade de corte em m/min;

F_c = Força teórica de corte em N.

Usualmente, como no manual da Sandvik (2015), a equação para cálculo da Potência de Corte Teórica também pode ser apresentada conforme a Equação 6.

$$P_c = \frac{v_c \cdot a_p \cdot f_n \cdot k_c}{60 \cdot 1000} \quad (6)$$

Em que:

P_c = potência de corte em W;

v_c = velocidade de corte em m/min;

a_p = profundidade de usinagem em mm;

f_n = avanço da ferramenta em mm/rot;

k_c = Força específica de corte em N/mm²;

4 METODOLOGIA

4.1 Introdução

Considerando duas situações no processo de usinagem, em tornos, conforme ilustrado na Figura 11, tem-se:



Figura 11 – Ferramenta avança em vazio (a direita) e em usinagem (a esquerda) (Autor)

- Em vazio, a ferramenta avança em direção à peça enquanto o eixo árvore gira juntamente com a peça. Neste caso, a potência de corte é nula ($P_c = 0$), pois a ferramenta não está em contato com a peça girante e, conseqüentemente, não está removendo material. Por outro lado, a potência demandada pela máquina (P_{e0}), é a necessária para o movimento de avanço da ferramenta, rotação da peça, e demais sistemas (refrigeração, circulação de óleo, ventilação, etc.);
- Em usinagem, a ferramenta continua avançando, mas neste caso, removendo material. Nesta situação, há uma potência de corte (P_c), teoricamente determinável por meio da Equação 5. A potência elétrica efetiva (P_{ef}) demandada neste instante corresponderá à soma da potência elétrica em vazio (P_{e0}) com o produto da potência de corte (P_c) por um fator de rendimento do sistema (η), que será uma constante (maior que um), representando as perdas correspondentes ao rendimento do sistema, conforme o conceito de Boylestad (2014).

Desta forma, traduzindo esse postulado para uma expressão matemática para a determinação da Potência Elétrica Efetiva, tem-se a Equação 7.

$$P_{ef} = P_{e0} + P_c \cdot \eta \quad (7)$$

Em que:

P_{ef} = potência elétrica efetiva demandada pela máquina durante a usinagem;

P_{e0} = potência elétrica demandada pela máquina durante avanço em vazio;

P_c = potência de corte teórica calculada por meio da equação 5;

η = fator de rendimento do sistema.

Relacionando a Equação 7 ao demonstrado por Boylestad (2014) e exemplificado na Figura 6 (pag. 25) e Equação 1 deste trabalho, P_{ef} é a energia que entra no sistema e P_c é a energia que sai do sistema, e η é o fator referente à perda de energia que ocorre no processo.

Posteriormente, após uma análise aprofundada dos resultados obtidos com a realização de ensaios com diversos materiais, em diferentes condições de usinagem, concluiu-se que a Equação 8 se mostrou mais adequada para a representação das relações envolvidas no processo.

$$P_{ef} = P_e(n) + P_c + \Delta P(P_c) \quad (8)$$

Em que:

P_{ef} = potência elétrica efetiva demandada pela máquina durante a usinagem;

$P_e(n)$ = potência elétrica demandada pela máquina durante avanço em vazio em função da velocidade angular do eixo árvore;

P_c = potência de corte teórica calculada por meio da equação 5;

$\Delta P(P_c)$ = diferença de potência em função da Potência de corte teórica.

4.2 Máquina, ferramentas e materiais utilizados

Os estudos foram planejados, desenvolvidos e implementados em três etapas em situações e objetivos distintos:

- Primeira etapa: desenvolvimento da metodologia e sistema de aquisição e tratamento de sinais;
- Segunda etapa: aplicação do sistema desenvolvido, visando a determinação da equação de conversão para relacionar a diferença de demanda de potência pela máquina com a potência de corte efetiva;

- Terceira etapa: comprovação da eficiência da metodologia e sistema desenvolvidos em situação real de usinagem de peças em produção.

A primeira etapa foi implementada em um torno da marca ROMI modelo Centur 30D com Comando Numérico Computadorizado Siemens 802D (Figura 12).



Figura 12 – Torno marca Romi modelo Centur 30D com CNC Siemens 802D (Autor)

A máquina foi utilizada porque pertence a uma empresa que propiciou livre acesso ao equipamento.

Posteriormente, numa segunda etapa, visando validar o sistema e metodologia em outro equipamento, os ensaios foram estendidos e implementados em um torno da marca ERGOMAT modelo TND 200 equipado com Comando Numérico Computadorizado Fanuc (Figura 13), pertencente ao Departamento de Mecânica do IFSP – Campus São Paulo.



Figura 13 – Torno Ergomat modelo TND-200 com CNC Fanuc (Autor)

Para usinagem foram utilizadas pastilhas Sandvik DNMG 110408 GC2015⁹ (Anexo 1) montadas em suporte Sandvick PDJNR 2525M 11 (Anexo 2). Os motivos desta escolha se deveram a:

- Disponibilidade;
- Sua grande utilização na indústria;
- Conjunto versátil, podendo ser aplicado em operações de desbaste ou acabamento;
- Conjunto utilizado na usinagem da peça em situação real de produção, que validou metodologia e sistema desenvolvidos.

Os materiais utilizados nos ensaios de usinagem da primeira etapa foram escolhidos levando-se em conta, principalmente, sua grande aplicação em construção mecânica de máquinas e dispositivos, além da disponibilidade em barras de mesmo diâmetro, de forma a se padronizar os programas elaborados com os mesmos parâmetros de usinagem, possibilitando uma análise comparativa de resultados obtidos nas mesmas condições. Assim, os experimentos da primeira etapa foram feitos com os seguintes materiais:

- Alumínio liga ABNT 6351T6 em barras redondas de diâmetro 1.1/4" (31,75 mm);
- Aço carbono SAE 1020 em barras redondas de diâmetro 1.1/4" (31,75 mm);

Na segunda etapa, após uma compreensão e aprimoramento da metodologia e resultados, foram utilizados nos ensaios os materiais:

- Alumínio liga ABNT 6351T6 em barras redondas de diâmetro 1.1/2" (38,1 mm);
- Aço inoxidável liga AISI 304 em barras redondas de diâmetro 1.1/4" (31,75 mm);
- Aço Ferramenta SAE P20 em barras redondas de diâmetro 1.1/4" (31,75 mm);
- Bronze alumínio UNS C63000 em barras redondas de diâmetro 1" (25,4 mm).

Esses materiais foram utilizados somente na segunda etapa, em razão de uma menor disponibilidade e custo mais elevado. O bronze alumínio UNS C63000, material utilizado, por exemplo, em trens de pouso de aeronaves (por isso também conhecido como bronze aeronáutico) foi gentilmente cedido para essas pesquisas pela Termomecânica¹⁰.

⁹ De acordo com Sandvik (2009) p. A-73, as pastilhas classe GC2015, possuem "revestimento de 5,5 µm, com várias camadas de TiN, Al₂O₃ e Ti (C,N).

¹⁰ Termomecânica Ltda.: empresa do setor de transformação de materiais não ferrosos (cobre e suas ligas) localizada em São Bernardo do Campo/SP.

Como são materiais de grande utilização na indústria, suas características, como a Força Específica de Corte (K_c), são bem conhecidas. Neste trabalho consideraram-se os parâmetros conforme tabelas reproduzidas no Anexo 3, uma breve análise revela uma proporção entre esse parâmetro e a dureza dos diversos materiais.

Visando uma comparação entre os dados teóricos obtidos para os materiais a serem submetidos aos ensaios e sua real condição, foram medidas as durezas, em equipamento apropriado, em diferentes pontos dos materiais, para verificação de possíveis diferenças entre a parte externa e a interna dos materiais, conforme a Figura 14.



Figura 14 – Corpos de prova dos materiais para medição da dureza (Autor)

O quadro comparativo da Tabela 3 mostra os resultados teóricos e experimentais obtidos. Como a dureza medida foi muito próxima a teórica, deduz-se que as forças específicas de corte tabeladas são válidas.

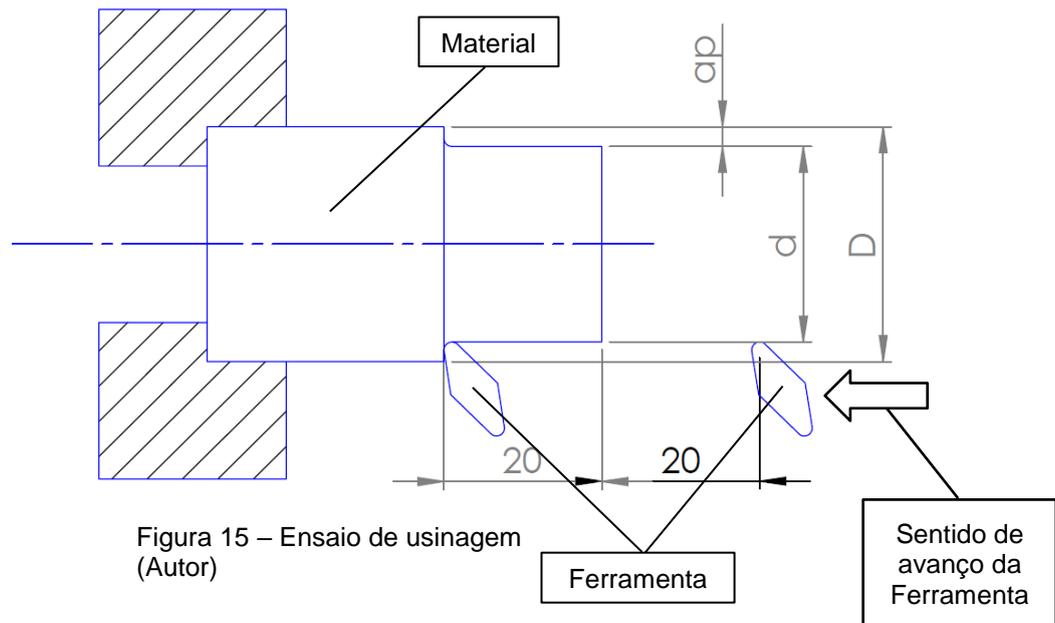
Tabela 3 – Quadro com os parâmetros característicos dos materiais

Material	K_c (N/mm²)	Dureza teórica (HB)	Dureza medida (HB)
Alumínio ABNT 6351T6	800	100	100
Aço SAE 1010/20	2000	125	130
Aço inoxidável AISI 304	2300	180	185
Aço Ferramenta SAE P20	2500	200	220
Bronze alumínio UNS C63000	1700	100	100

Fontes: Sandivik e Autor

4.3 Ensaio (operações) de Usinagem

Na primeira e segunda etapa de usinagem, os ensaios foram realizados com percursos longitudinais sucessivos de 40 mm (passadas), sendo 20 mm em vazio e 20 mm em usinagem, conforme desenho esquemático da Figura 15.



Deve-se considerar que os resultados obtidos no primeira passada não são totalmente confiáveis, em razão das seguintes situações:

- A operação de usinagem, a partir do diâmetro inicial da barra, em bruto, apresenta uma variável adicional que é imprecisão dimensional, acarretando uma variação da profundidade de usinagem;
- A fixação do material na placa do torno poderá apresentar uma excentricidade tornando a profundidade de usinagem inconstante;
- Durante o processo de laminação da barra, devido aos esforços de compressão, a parte mais externa do material poderá apresentar características diversas da parte interna.

4.3.1 Primeira etapa de ensaios

Para permitir uma melhor comparação dos resultados (diferença da demanda de potência elétrica pela máquina), os ensaios foram planejados com o menor número

de variáveis possíveis. Assim, o programa de usinagem para a primeira etapa, detalhado no Apêndice A, foi desenvolvido com a fixação dos seguintes parâmetros:

- Velocidade de corte (v_c) = 150 m/min;
- Profundidade de usinagem (a_p) = 2,5 mm (a partir da segunda passada);
- Avanço de corte (f_n) = 0,4 mm/rot;
- Velocidade máxima do eixo árvore (placa) = 3000 rpm.

Mesmo com a utilização de diferentes materiais, os parâmetros de usinagem foram fixados de forma a possibilitar a comparação dos resultados obtidos para os valores de potências de corte.

As condições de usinagem (torneamento) em cada passada estão detalhadas na Tabela 4. Pode-se observar que, até a terceira passada, a máquina mantém a velocidade de corte constante, por meio do aumento da velocidade de rotação da placa conforme o diâmetro de usinagem vai diminuindo, da quarta a sexta passada, atinge-se a velocidade máxima do fuso (3000 rpm) e esta é mantida constante, acarretando uma variação da velocidade de corte, conforme com a Equação 4.

Tabela 4 – Parâmetros de Usinagem nos ensaios da primeira etapa (Autor)

Operação	Diâmetro antes D (mm)	Diâmetro depois d (mm)	Profund. de usinagem a_p(mm)	Velocid. de corte v_c (m/min)	Velocid. Placa (rpm)
1ª passada	31,8	30	0,9	150	1292
2ª passada	30	25	2,5	150	1910
3ª passada	25	20	2,5	150	2390
4ª passada	20	15	2,5	141	3000
5ª passada	15	10	2,5	94	3000
6ª passada	10	5	2,5	47	3000

Aplicando-se a Equação de Kienzle (Equação 5), foi possível determinar a Potência Teórica de corte em cada passada para os diferentes materiais. Os resultados são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Potências Teóricas de Corte em watts (Autor)

Operação	Alumínio ABNT 6351 T6	Aço SAE 1010/20	Aço Inox AISI 304
1ª passada (torneamento)	720	1800	2070
2ª passada (torneamento)	2000	5000	5750
3ª passada (torneamento)	2000	5000	5750
4ª passada (torneamento)	1880	4700	5410
5ª passada (torneamento)	1250	3130	3610
6ª passada (torneamento)	630	1570	1800

4.3.2 Segunda etapa de ensaios

Na segunda etapa de ensaios, visando se obter um número de amostragem de dados maior (o dobro) em cada ensaio, a velocidade de avanço foi reduzida para 0,1 mm/rot, que também é um valor mais comum para esse parâmetro em operações de usinagem. Também foi alterado o programa, de forma a inserir uma passada adicional, por se utilizar barras de alumínio de diâmetro maior (1.1/2" ao invés de 1.1/4"). Em razão da maior velocidade de rotação disponível no eixo árvore do torno Ergomat, a velocidade máxima foi programada para 5000 rpm. Assim, foi possível a manutenção da velocidade de corte programada até a sexta passada do total de sete. As condições estão detalhadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros de Usinagem nos ensaios da segunda etapa (Autor)

Operação	Diâmetro antes D (mm)	Diâmetro depois d (mm)	Profund. de usinagem a_p(mm)	Velocid. de corte v_c (m/min)	Velocid. Placa (rpm)
1ª passada	38,1	35	1,5	150	1363
2ª passada	35	30	2,5	150	1590
3ª passada	30	25	2,5	150	1910
4ª passada	25	20	2,5	150	2390
5ª passada	20	15	2,5	150	3180
6ª passada	15	10	2,5	150	4770
7ª passada	10	5	2,5	78	5000

Usando o mesmo procedimento da etapa anterior, foram calculadas as potências teóricas para cada material/condição de usinagem, conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Potências Teóricas de Corte em watts (Autor)

Operação	Alumínio ABNT 6351 T6	Aço SAE P20	Aço Inox AISI 304	Bronze UNS C63000
1ª passada (torneamento)	310	-	-	-
2ª passada (torneamento)	500	560	520	-
3ª passada (torneamento)	500	1560	1440	-
4ª passada (torneamento)	500	1560	1440	1060
5ª passada (torneamento)	500	1560	1440	1060
6ª passada (torneamento)	500	1560	1440	1060
7ª passada (torneamento)	263	820	760	820

Obs.- Valores arredondados na casa das dezenas

4.3.3 Terceira etapa de ensaios

Na etapa final, foram testados e validados a metodologia e sistema em condições reais de produção na máquina. Para isso, foi produzido um lote de peças em aço inoxidável AISI 304, conforme detalhado na Figura 16, partindo de uma pastilha nova e utilizada no processo de usinagem até seu desgaste, determinado por análise visual do acabamento superficial das peças e arestas de corte da ferramenta.

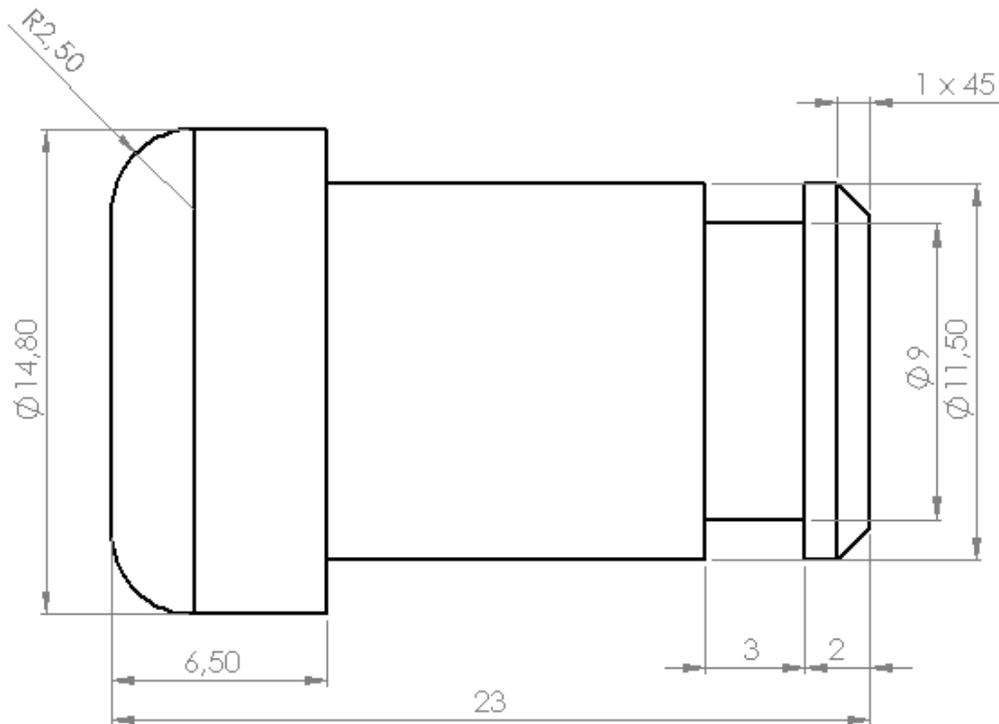


Figura 16 – Pino em aço inoxidável AISI 304 (Autor)

4.4 Captura e tratamento dos sinais

Visando eliminar erros causados pela variação da demanda de potência por outros sistemas da máquina (bombeamento de refrigerante de corte, bombeamento de óleo lubrificante, iluminação, sistema de ventilação, etc.) a captura dos sinais foi efetuada na entrada da alimentação trifásica dos módulos controladores dos servomotores (Figura 17).

Os sinais de corrente elétrica foram adquiridos por meio de dois sensores de corrente modelo SCT-013-000 (ficha técnica apresentada no Anexo 4 e esquema de ligações no Anexo 5), conforme mostrado na Figura 18.

Os sinais de tensão entre as fases foram adquiridos por meio de três cabos com terminais tipo “jacaré” do lado conectado aos terminais de ligação da alimentação dos módulos, e conectores tipo “pino banana” nas outras extremidades. Uma medição preliminar (com uso de alicate amperímetro) entre as fases de alimentação dos módulos indicou tensões da ordem de 280 V.



Figura 17 – Módulos controladores (Autor)

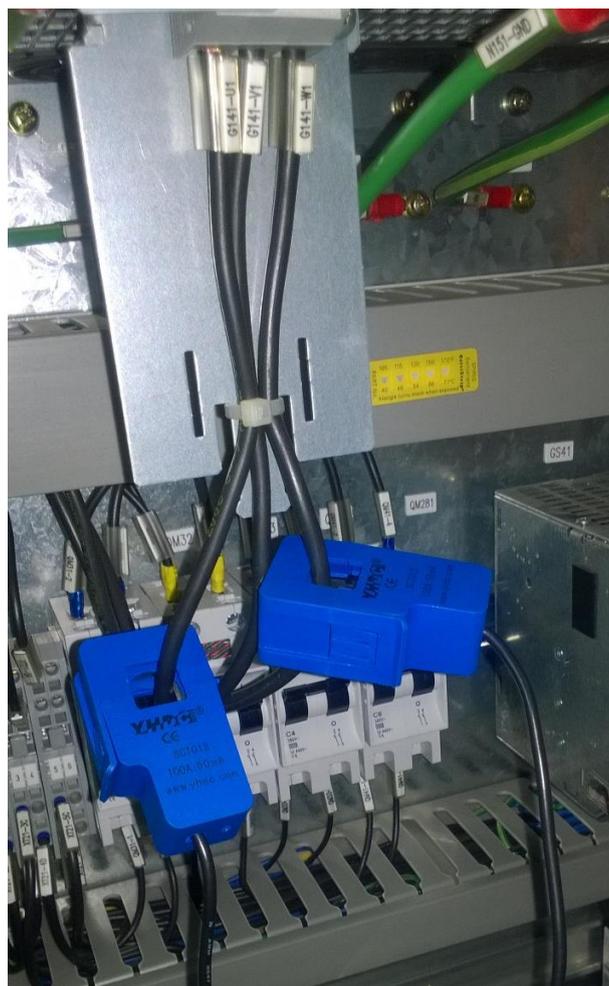


Figura 18 – Sensores de corrente (Autor)

Para aquisição, processamento e registro dos sinais de tensões e correntes, foi utilizada uma plataforma baseada em placa Arduino Uno com processador ATmega328 com memória flash de 32 KB e resolução de 10 bits (EVANS *et al*, 2013), conforme ilustrado na Figura 19. Essa escolha se deu em razão da disponibilidade, simplicidade e software compilador (IDE) aberto.



Figura 19 – Placa Arduino Uno (<https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno> em 15/11/2016)

Como as entradas analógicas da placa Arduino não suportam tensões acima de 5 VCC, foi necessário agregar um circuito adequado, projetado e construído para condicionar os sinais de forma a reduzir e retificar as tensões e tratar os valores das correntes capturadas dos sensores, conforme detalhado no esquema apresentado no Apêndice B. O conjunto (circuito desenvolvido e a placa Arduino Uno) está ilustrado na Figura 20.

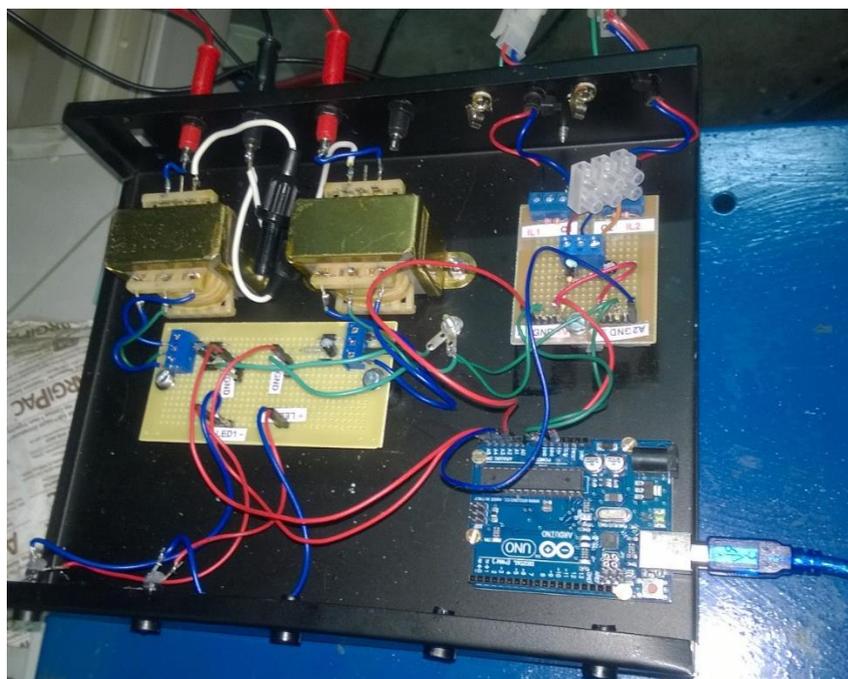


Figura 20 – Dispositivo de aquisição, condicionamento e tratamento dos sinais (Autor).

A placa Arduino possui uma saída serial (canto inferior direito da figura), que possibilita o envio dos dados obtidos para um microcomputador (via entrada USB) de forma que se possa observar, registrar e, eventualmente, efetuar algum tratamento adicional.

Para calibração dos sinais de tensões e correntes, foram desenvolvidos dois programas para capturar os valores básicos de tensões e correntes recebidos nas entradas analógicas do Arduino, compará-los com valores conhecidos (medidos) e ajustá-los por meio de operações (equações) para se obter valores finais em unidades do Sistema Internacional (volts, ampères e watts).

Para calibração das tensões, utilizou-se um transformador com 6 “tapes” de saída (tensões diferentes). Para calibração das correntes, utilizaram-se diferentes equipamentos que foram submetidos a diferentes correntes medidas com alicate amperímetro.

O código desenvolvido para calibração das tensões pode ser consultado no Apêndice C. Os valores capturados (valores básicos lidos nas entradas analógicas do Arduino) foram comparados com os valores medidos para as respectivas tensões.

Os valores médios obtidos na calibração das tensões estão resumidos na Tabela 8. Resultados mais completos estão expressos no Apêndice E. A partir dos valores básicos capturados e lidos, foi feita a confrontação com os valores correspondentes medidos com um multímetro, obtendo-se, com auxílio do Microsoft Excel, duas equações de calibração para os valores das tensões, com dois trechos lineares com diferentes inclinações, a primeira equação mostrada no gráfico da Figura 21 (em fundo azul), para valores lidos menores ou iguais a 345 e a segunda equação mostrada no gráfico da Figura 22 (em fundo verde), para valores lidos maiores que 345.

Essas equações foram utilizadas no programa desenvolvido, conforme mostrado no Apêndice F, para conversão dos valores lidos dos sinais de tensão para volts.

Tabela 8 – Valores capturados (lidos) e medidos das Tensões (Autor)

Tensões			
Valor lido	Medido (V)	Equação A (V)	Equação B (V)
93,0	55,0	55,26	-695,98
114,0	65,6	65,06	-624,40
135,0	74,9	74,86	-552,81
170,0	91,6	91,19	-433,50
200,0	105,0	105,19	-331,24
213,0	111,0	111,26	-286,93
210,0	110,1	109,86	-297,15
238,0	122,9	122,93	-201,71
241,0	124,0	124,33	-191,48
258,0	132,0	132,26	-133,53
280,0	141,0	142,53	-58,54
297,0	151,0	150,46	-0,59
339,0	171,0	170,06	142,58
350,0	184,0	175,20	180,08
359,0	205,0	179,40	210,76
363,0	219,0	181,26	224,39
364,0	228,0	181,73	227,80
367,0	245,0	183,13	238,03

Figura 21 – Primeiro gráfico e equação para calibração da Tensão (Autor)

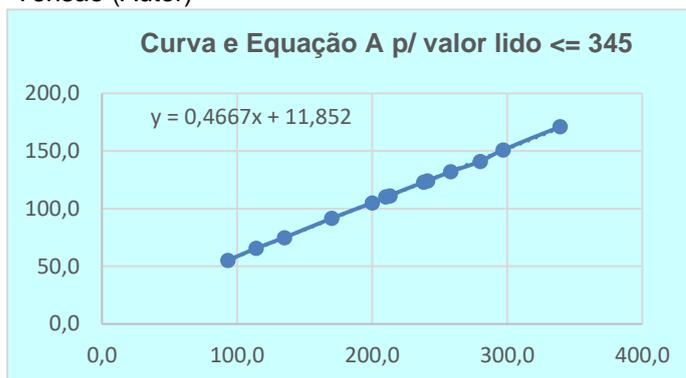
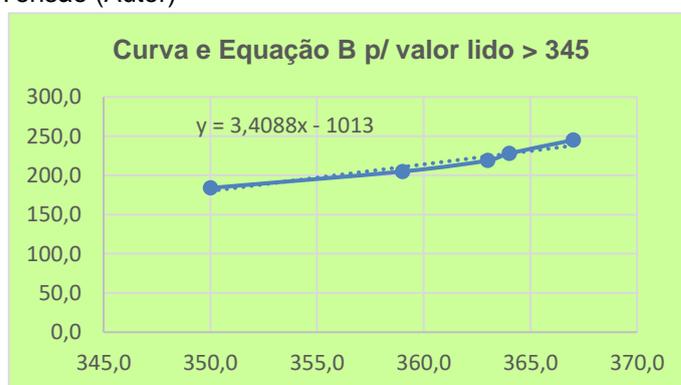


Figura 22 – Segundo gráfico e equação para calibração da Tensão (Autor)



Para calibração da corrente elétrica, sendo esta alternada, foi necessário considerar que o valor lido em um dado instante não necessariamente seria correspondente ao valor da corrente eficaz naquele ponto da leitura. A curva de uma corrente alternada ao longo do tempo corresponde a uma senóide, conforme ilustrado na Figura 23.

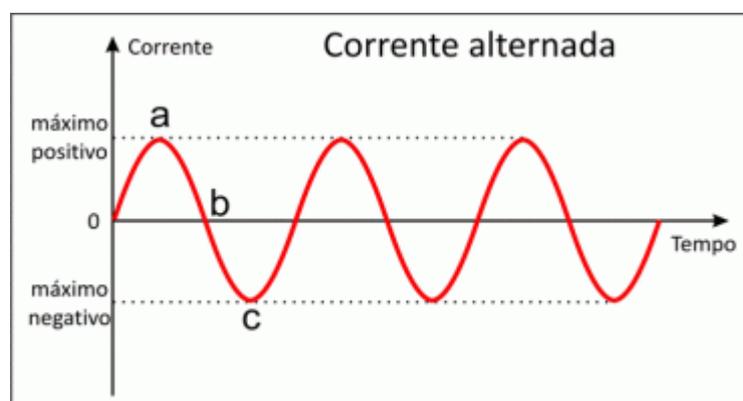


Figura 23 – Curva (senóide) característica da corrente alternada.

Fonte: <http://eletricaesuasduvidas.blogspot.com.br> – acessado em junho/2017

Ao capturar diretamente os valores de uma corrente elétrica alternada por meio de um sensor de corrente, haverá uma incerteza com relação de qual fase instantânea foi adquirida a amostra, no caso da rede elétrica (frequência de 60 Hz) haverá 60 ciclos de onda a cada segundo. Desta forma, o valor lido estará entre o máximo positivo (ponto a) e o máximo negativo (ponto c) no gráfico da Figura 23.

Existe uma biblioteca desenvolvida para o Arduino que calcula, após uma sequência de ciclos (ajustável) e um valor de calibração (também ajustável), o valor da corrente eficaz ou rms (*root-mean-square*). A biblioteca “Emonlib.h” está disponibilizada no site da *Open Energy Monitor* (<https://openenergymonitor.org>).

Desta forma, foi desenvolvido um código para determinação do valor de calibração mais apropriado para ajuste em função das correntes medidas com um alicate amperímetro, conforme Apêndice D. Os valores obtidos estão detalhados na Tabela 9.

Tabela 9 – Calibração dos Sensores de Corrente (Autor)

Corrente Medida (A)	Valores lidos (A)		Valor calibração	
	Sensor 1	Sensor 2	Entrada 1	Entrada 2
0,0	0,0	0,0	42	42
7,1	7,17	7,37	41	42
7,1	7,33	7,34	41	41
8,7	8,40	8,40	41	41
8,7	8,69	8,70	42	42

Com base nos dados obtidos, foi determinado o valor de calibração igual a 42, que é um número inteiro a ser inserido no código do Arduino para uso da biblioteca “Emonlib.h” que possibilita a conversão e obtenção dos valores de correntes elétricas rms, a partir dos valores lidos. A posição de inserção deste valor de calibração, bem como os demais parâmetros variáveis são comentados no programa detalhado no Apêndice D.

Determinados os parâmetros de calibração, foi elaborado um código único para aquisição e tratamento dos sinais de tensões e correntes elétricas e cálculo das potências, detalhado no Apêndice F. Após os primeiros ensaios de usinagem, observou-se que esse código possibilitava uma taxa de captura da ordem de uma leitura a cada 200 ms, o que não se mostrou adequado pois, de acordo com os ensaios detalhados no Tópico 4.3, o tempo máximo em usinagem em cada passada é da ordem de 1500 ms, o que permitiria a captura de menos de 8 leituras por passada.

Como, durante os ensaios iniciais, observou-se que as tensões elétricas se mantinham praticamente constantes, em torno de 288 V, foi desenvolvido um código mais simples, conforme detalhado no Apêndice G, para captura somente dos valores das correntes elétricas, com os cálculos das potências sendo feitos posteriormente, em planilha Microsoft Excel. Essa solução possibilitou um aumento da taxa de captura para uma leitura a cada 100 ms.

Um ganho adicional foi conseguido com o uso da ferramenta de software “Termite 3.2”, que substitui o monitor serial do Arduino. O ambiente de configuração e recepção do aplicativo está ilustrado na Figura 24. Com essa ferramenta, obteve-se uma taxa de amostragem da ordem de uma leitura a cada 60 ms, o que se mostrou adequado para essa primeira fase de ensaios.

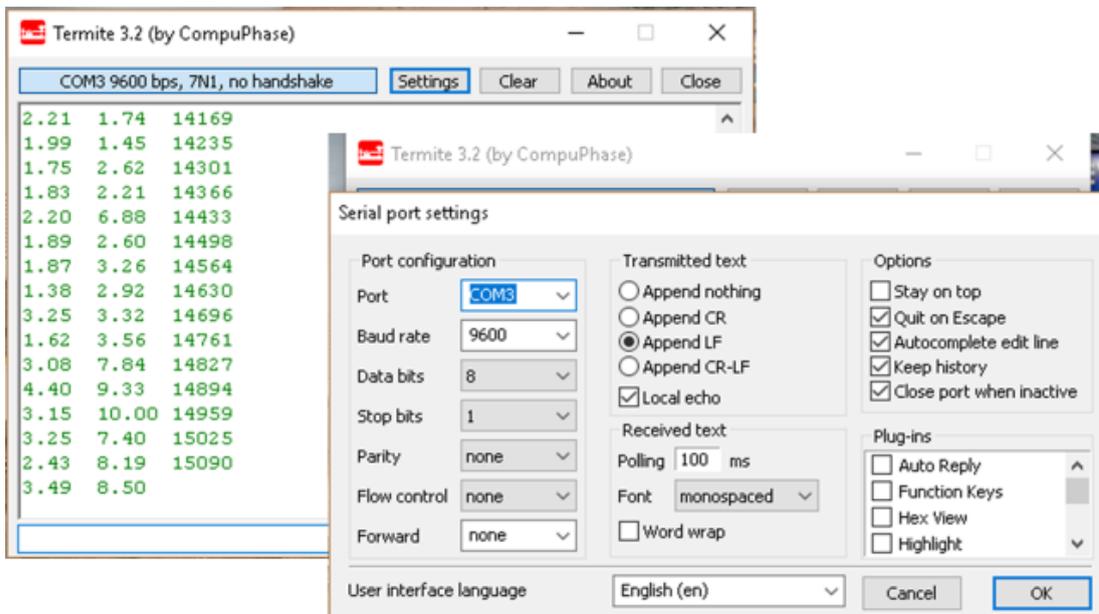


Figura 24 – Termite e seu ambiente de configuração e recepção de sinais (Autor)

5 RESULTADOS

A apresentação dos resultados a seguir foi distribuída de acordo com as respectivas etapas dos ensaios.

5.1 Resultados da primeira etapa dos ensaios

Na primeira etapa, foram realizados 26 ensaios com a ferramenta composta de pastilhas Sandvick DNMG 110408 CG2015 (Anexo 1) montadas em suporte Sandvik PDJNR 2525M 11 (Anexo 2). Os ensaios foram divididos da seguinte forma:

- 5 ensaios com avanço em vazio para se determinar a potência demandada com potência de corte igual a zero (sem usinagem);
- 4 ensaios com pastilha nova usinando alumínio ABNT 6351T6;
- 5 ensaios com pastilha gasta usinando alumínio ABNT 6351T6;
- 6 ensaios com pastilha nova usinando aço SAE 1010/20;
- 6 ensaios com pastilha gasta usinando aço SAE 1020/20.

As médias dos resultados obtidos, em cada condição de usinagem, estão detalhados na Tabela 10, os valores máximos em cada ensaio estão detalhados no Apêndice H e resultados mais completos podem ser consultados no Apêndice I.

Na tabela apresentada, nos casos dos ensaios com pastilhas gastas, o valor da Potência de Corte Teórica é seguido de um sinal “+” pois, neste caso, espera-se um valor maior, devido à perda de eficiência da pastilha, pelo pressuposto já mencionado anteriormente.

A Potência Elétrica Medida (Pe) foi obtida, para cada situação, com a captura dos sinais de corrente e tensão na entrada dos módulos de alimentação dos servomotores da máquina. A Potência de Corte Teórica foi a calculada conforme já apresentado na Tabela 5 (pág, 37).

Tabela 10 – Resumo dos Resultados dos Ensaios de Usinagem da 1ª etapa (Autor)

Condição do Ensaio	Comparação das Médias das Potências Elétricas Máximas medidas nos avanços com as Potências de Corte teóricas (watts)											
	1º Passada (1292 rpm)		2º Passada (1910 rpm)		3º Passada (2390 rpm)		4º Passada (3000 rpm)		5º Passada (3000 rpm)		6º Passada (3000 rpm)	
	Pe	Pc	Pe	Pc	Pe	Pc	Pe	Pc	Pe	Pc	Pe	Pc
Avanço em Vazio	2301	0	2752	0	3498	0	4052	0	3710	0	3647	0
Alumínio pastilha nova	2499	720	4193	2000	5657	2000	6288	1880	5221	1250	4657	630
Alumínio pastilha gasta	2802	720+	4464	2000+	4801	2000+	5072	1880+	5233	1250+	5069	630+
Aço pastilha nova	3405	1800	8138	5000	8710	5000	8825	4700	7938	3130	6456	1570
Aço pastilha gasta	4750	1800+	8663	5000+	9629	5000+	9541	4700+	8859	3130+	6639	1570+
Pe = Potência Elétrica Medida / Pc = Potência de Corte Teórica												

5.1.1 Análise dos Resultados

Tomando as diferenças das potências elétricas medidas em usinagem com as potências elétricas medidas com os respectivos avanços em vazio, obtém-se uma estimativa da potência de corte efetiva (sem considerar as eventuais perdas de rendimento, na transmissão do sistema). A Tabela 11 e o Gráfico da Figura 25 (página 48) apresentam a comparação entre as potências de corte obtidas e as calculadas teoricamente.

Apesar de alguns resultados apresentarem desvios significativos em relação à Potência de Usinagem Teórica, constata-se que, na maior parte dos casos (resultados com fundo verde), a variação de demanda de potência elétrica medida (determinada pela metodologia desenvolvida) foi sensível às diferentes condições de usinagem acompanhando, de forma geral, o comportamento esperado teoricamente, sem se esperar uma grande precisão em relação ao calculado teoricamente. Somente sete resultados (fundo vermelho), de um total de 24, revelaram valores menores em relação aos resultados esperados, destes, três são relacionados a primeira passada, com desvios já previstos conforme abordado no tópico 4.3 deste trabalho. Resultados com

valores acima dos esperados podem ser atribuídos às perdas de rendimento entre a potência elétrica tomada na alimentação dos módulos controladores dos servomotores e a potência efetiva de usinagem, conforme já previsto na Equação 7, e não consideradas nesta fase pois sua estimativa demandaria um número maior de ensaios de usinagem.

Tabela 11 – Quadro comparativo entre as Potências de corte obtidas e as teóricas (Autor)

Condição do Ensaio	Comparativo das diferenças de Potências Elétricas medidas (ΔP_e) com as respectivas Potências de Corte teóricas (P_c) (em watts)											
	1º Passada (1292 rpm)		2º Passada (1910 rpm)		3º Passada (2390 rpm)		4º Passada (3000 rpm)		5º Passada (3000 rpm)		6º Passada (3000 rpm)	
	ΔP_e obtida	P_c teórica	ΔP_e obtida	P_c teórica	ΔP_e obtida	P_c teórica	ΔP_e obtida	P_c teórica	ΔP_e obtida	P_c teórica	ΔP_e obtida	P_c teórica
Alumínio pastilha nova	198	720	1441	2000	2159	2000	2236	1880	1511	1250	1010	630
Alumínio pastilha gasta	501	720+	1712	2000+	1303	2000+	1020	1880+	1523	1250+	1422	630+
Aço pastilha nova	1104	1800	5386	5000	5212	5000	4773	4700	4228	3130	2809	1570
Aço pastilha gasta	2449	1800+	5911	5000+	6131	5000+	5489	4700+	5149	3130+	2992	1570+

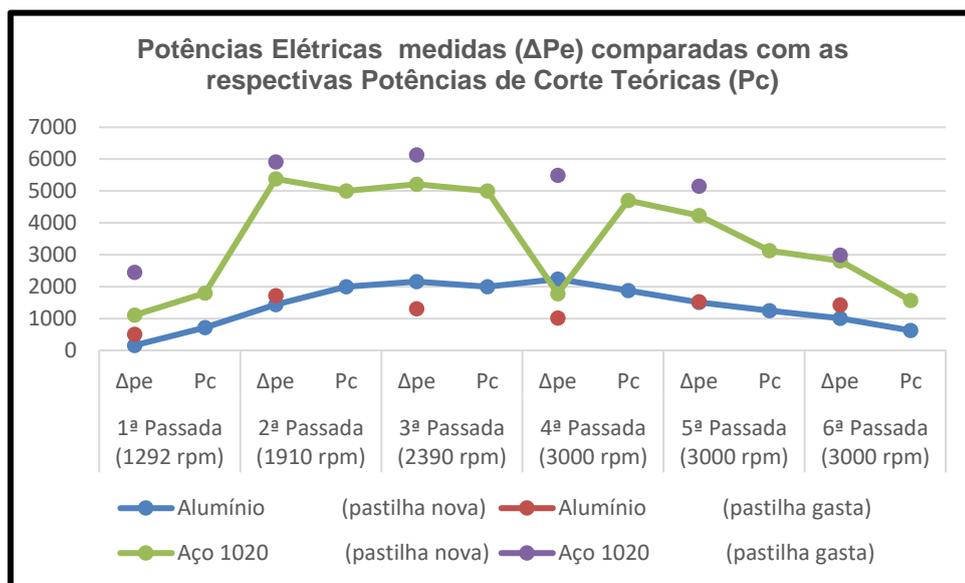


Figura 25 – Gráfico comparativo das Potências Elétricas medidas com as Potências de Corte teóricas

5.1.2 Conclusões da primeira etapa dos ensaios

A metodologia e sistema desenvolvido se mostrou eficaz, no sentido de comprovar uma correspondência entre a Variação da Demanda de Potência Elétrica pela máquina e a Potência de Corte Efetiva no processo de usinagem em torno CNC. A variação de demanda de potência elétrica pela máquina aumentou na usinagem de alumínio (material de boa usinabilidade) em relação ao estado de avanços em vazios constatando-se novo aumento quando em usinagem de aço (material de usinagem mais severa em relação ao alumínio). Os resultados obtidos validaram a metodologia de cálculo da Potência de Corte Teórica por meio da Equação de Kienzle e a Pressão Específica de Corte (K_s) atribuída aos materiais utilizados.

A análise dos resultados da primeira etapa de ensaios foi útil também para direcionar a pesquisa no sentido dos seguintes procedimentos para a segunda etapa dos ensaios:

- Utilização de mais materiais com características de usinabilidade diferentes;
- Proceder um maior número de ensaios;
- Verificar se há alguma defasagem da corrente elétrica medida entre os valores capturados na linha 1 e linha 2 da alimentação trifásica dos módulos controladores dos servomotores, a ser considerada para cálculo da potência elétrica;
- Com o maior número de resultados obtidos, estabelecer a equação que determina a relação entre a potência elétrica medida e a potência de corte instantânea no processo de usinagem em curso.

5.2 Segunda etapa dos ensaios

Nesta etapa, após o aperfeiçoamento da metodologia e do sistema, se buscou obter a equação de conversão da demanda de potência elétrica pela máquina em potência de corte instantânea.

5.2.1 Paridade dos valores das correntes medidas

Uma questão surgida após a primeira etapa dos ensaios foi com relação a uma possível defasagem entre as correntes medidas nas duas linhas de alimentação, que poderia comprometer os valores obtidos, caso essa defasagem não fosse determinada e considerada no processamento para obtenção das Potências Elétricas, haja vista que essas potências representam as somas das potências parciais das linhas 1 e 2, obtidas por meio das respectivas correntes elétricas medidas pelo sistema.

Desta forma, com os primeiros resultados obtidos nos ensaios de usinagem da segunda etapa, isso foi verificado. Conforme mostrado no gráfico da Figura 26, as faixas de picos de correntes elétricas numeradas de 1 a 10, não há defasagem entre as correntes elétricas da linha 1 (série 1 em azul) e linha 2 (série 2 em vermelho), ou seja, constata-se uma sobreposição dos gráficos das duas correntes medidas.

Portanto, as potências elétricas determinadas a partir do monitoramento das correntes elétricas medidas representam efetivamente uma resposta para atender as demandas de potência pela máquina no instante de captura dos sinais.

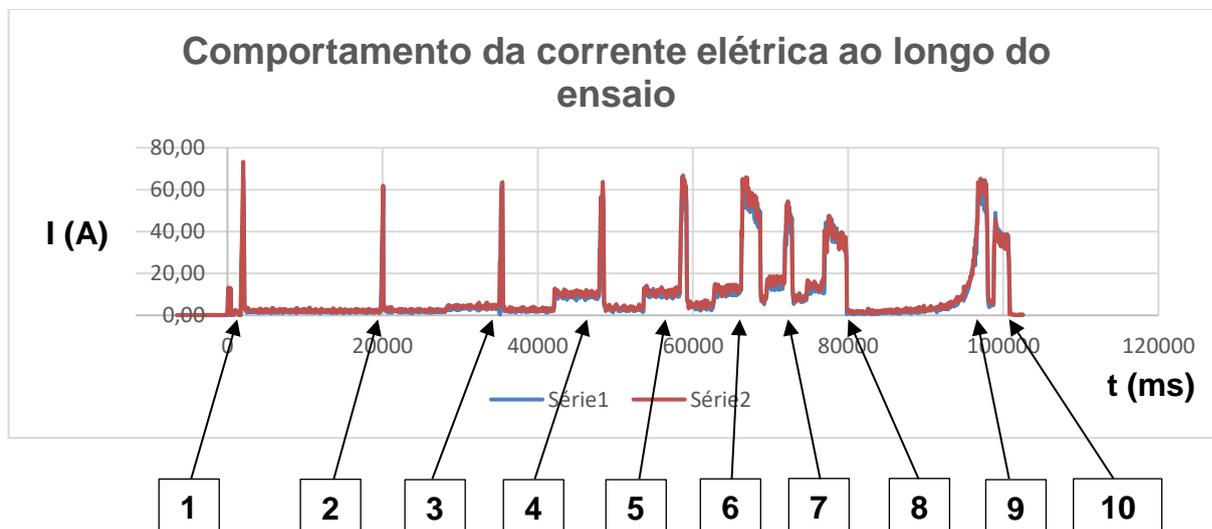


Figura 26 – Gráfico detalhando os picos de corrente (A) ao longo do tempo decorrido no ensaio (ms) (Autor)

Detalhes ampliados dos trechos com os picos, numerados na Figura 26 de 1 a 10, demonstrando o alinhamento das correntes medidas, estão disponibilizados no Apêndice J.

Analisando o gráfico detalhadamente em seus trechos e comparando com o observado durante os ensaios de usinagem, percebeu-se que a maior demanda de

potência elétrica pela máquina não ocorre durante o processo de remoção de material (usinagem), e sim, no deslocamento rápido da ferramenta para reposicionamento para nova passada ou troca de ferramenta. Esse fenômeno é mostrado na Figura 27.

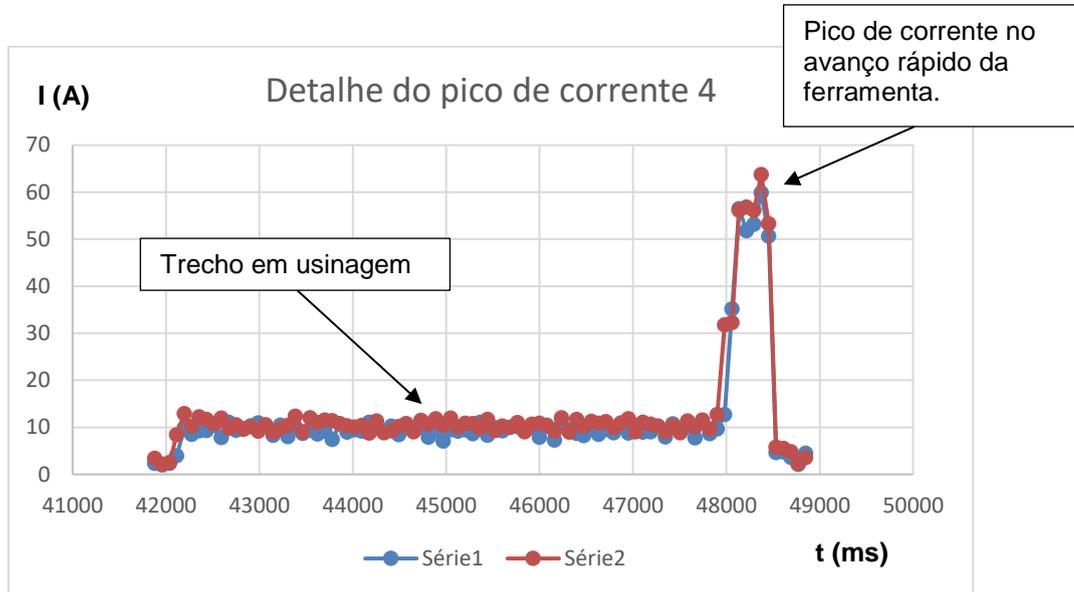


Figura 27 – Detalhe do pico de corrente 4 mostrando o intervalo em usinagem

5.2.2 Resultados da segunda etapa dos ensaios

Na segunda etapa, foram realizados 29 ensaios com a ferramenta composta de pastilhas Sandvik DNMG 110408 CG2015 (Anexo 1) montadas em suporte Sandvik PDJNR 2525M 11 (Anexo 2). Em todos os ensaios, foram utilizadas pastilhas novas e foram divididos da seguinte forma:

- 7 ensaios com Alumínio ABNT 6351T6 com sete passadas em usinagem em cada ensaio, totalizando 49 conjuntos de dados;
- 11 ensaios com Bronze UNS C63000 com três passadas em vazio e quatro passadas em usinagem em cada ensaio, totalizando 77 conjuntos de dados;
- 6 ensaios com aço SAE P20 com uma passada em vazio e seis passadas em usinagem em cada ensaio, totalizando 42 conjuntos de dados;
- 5 ensaios com aço AISI 304 com uma passada em vazio e seis passadas em usinagem em cada ensaio totalizando, 35 conjuntos de dados.

Média das Potências Elétricas Máximas medidas nas passadas (Pe) e as Potências de Corte teóricas (Pc) - valores em Watts - 2ª Etapa de Ensaios																												
Condição do Ensaio	1ª Passada 35mm/1363rpm				2ª Passada 30mm/1590rpm				3ª Passada 25mm/1909rpm				4ª Passada 20mm/2386rpm				5ª Passada 15mm/3182rpm				6ª Passada 10mm/4773rpm				7ª Passada 5mm/5000rpm			
	Pe	ΔP_e	Pc	$\Delta P_{\Delta P_e - P_c}$	Pe	ΔP_e	Pc	$\Delta P_{\Delta P_e - P_c}$	Pe	ΔP_e	Pc	$\Delta P_{\Delta P_e - P_c}$	Pe	ΔP_e	Pc	$\Delta P_{\Delta P_e - P_c}$	Pe	ΔP_e	Pc	$\Delta P_{\Delta P_e - P_c}$	Pe	ΔP_e	Pc	$\Delta P_{\Delta P_e - P_c}$	Pe	ΔP_e	Pc	$\Delta P_{\Delta P_e - P_c}$
Vazio	1308	0	0	0	1420	0	0	0	1582	0	0	0	2011	0	0	0	2824	0	0	0	4113	0	0	0	4383	0	0	0
Alumínio 6351 T6	2357	1040	310	730	3370	1950	500	1450	3681	2099	500	1599	4292	2281	500	1781	4998	2174	500	1674	6386	2273	500	1773	5846	1463	263	1200
Bronze Alum Super	\	\	\	\	\	\	\	\	\	\	\	\	5147	3136	1063	2073	6173	3349	1063	2286	7505	3392	1063	2329	6389	2006	560	1446
Aço ferramenta P20	\	\	\	\	2149	729	563	166	5682	4100	1563	2537	6025	4014	1563	2451	6794	3970	1563	2407	8193	4080	1563	2517	6820	2437	823	1614
Aço Inoxidável 304	\	\	\	\	2105	685	518	167	5112	3530	1438	2092	5500	3489	1438	2051	6245	3421	1438	1983	7664	3551	1438	2113	6627	2244	757	1487

Tabela 12 – Média dos resultados da 2ª etapa (Autor)

Nos ensaios realizados, para cada passada em usinagem, há um trecho em que a ferramenta avança em vazio que fornece valores de corrente e tensão, também nessa condição.

Desta forma, foram obtidos 323 conjuntos de dados, distribuídos da seguinte forma:

- 213 conjuntos de dados com avanço em vazio;
- 44 conjuntos de dados em usinagem com Bronze UNS C63000;
- 36 conjuntos de dados em usinagem com aço SAE P20;
- 30 conjuntos de dados em usinagem com aço AISI 304.

Na Tabela 12, são apresentados os resultados de forma resumida e comparados em cada passada, em que:

- P_e é a média dos máximos das potências elétricas medidas em cada passada e condições (avanço vazio ou em usinagem) para cada material;
- ΔP_e é a diferença entre a P_e em usinagem e a P_e em vazio na mesma passada;
- P_c é a potência de corte teórica correspondente;
- ΔP como já informado na tabela é a diferença entre ΔP_e e P_c .

Resultados completos dos ensaios podem ser consultados no Apêndice K.

Analisando os dados obtidos, observa-se que a Potência Elétrica medida (P_e) depende da potência elétrica do avanço em vazio, da potência de corte (no caso, potência de corte teórica) e também de um fator relacionado a diferença entre a Potência elétrica total (que é a própria P_e) e a potência de corte (P_c). Por outro lado, a potência elétrica em vazio é função da velocidade de rotação do eixo árvore.

Desta forma, se conclui que a Equação 7 (apresentada no tópico 4.1) não expressa a dinâmica da relação entre as variáveis envolvidas no fluxo de energia do sistema. A Equação 8 traduz melhor o que foi analisado no parágrafo anterior:

$$P_{ef} = P_e(n) + P_c + \Delta P(P_c) \quad (8)$$

Em que:

P_{ef} = potência elétrica efetiva demandada pela máquina durante a usinagem;

$P_e(n)$ = potência elétrica demandada pela máquina durante avanço em vazio em função da velocidade angular do eixo árvore;

P_c = potência de corte teórica calculada por meio da equação 5;

$\Delta P(P_c)$ = diferença de potência em função da Potência de corte teórica.

A metodologia mais simples para se chegar à relação entre as variáveis acima é determinar as equações parciais separadamente. Isso é possível selecionando e arranjando adequadamente os dados da tabela.

5.2.3 Análise dos resultados da segunda etapa

Da Tabela 12, podem-se isolar os valores da velocidade angular do eixo árvore (n) em rpm e os respectivos valores da potência elétrica medida com o avanço em vazio, conforme a Tabela 13.

n (rpm)	Pe (W)
1363	1308
1590	1420
1909	1582
2386	2011
3182	2824
4773	4113
5000	4383

Tabela 13 – valores da potência elétrica medida em função da velocidade angular do eixo árvore (Autor)

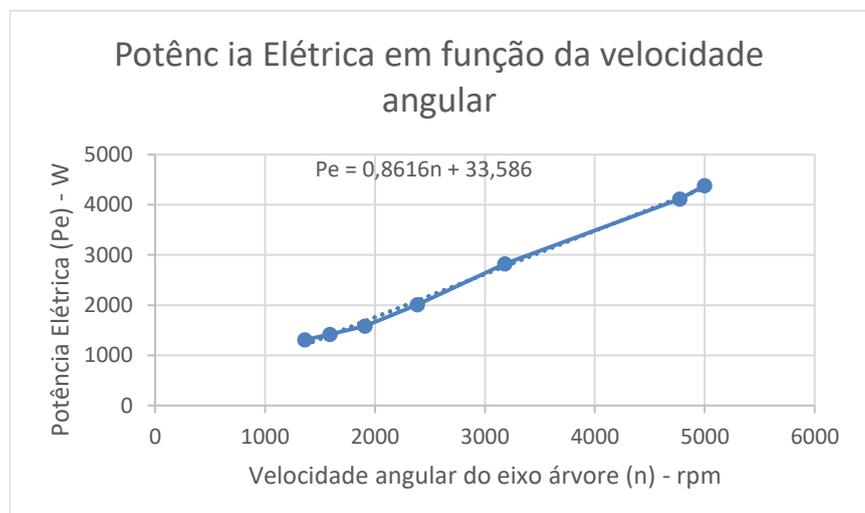


Figura 28 – Gráfico e equação da Potência Elétrica em função da velocidade angular do eixo árvore (Autor).

Com o software Excel, pode-se determinar que a curva, que mais se ajusta aos valores medidos, possui tendência linear com coeficiente de correlação de 0,998, conforme a Figura 28, e é representada pela Equação 9:

$$P_e(n) = 0,8616 \cdot n + 33,586 \quad (9)$$

Em que: $P_e(n)$ = Potência elétrica com avanço em vazio em função da velocidade do eixo árvore em watts;
 n = Velocidade angular do eixo árvore em rpm.

Utilizando a mesma metodologia para os valores da potência de corte teórica calculada e a diferença de potência medida, se obtém a Tabela 14, o gráfico que relaciona as duas variáveis, com coeficiente de correlação de 0,909, apresentado na Figura 29 e a Equação 10 correspondente:

$$\Delta P(P_c) = 0,873 \cdot P_c + 1010,4 \quad (10)$$

Em que: $\Delta P(P_c)$ = Diferença da Potência elétrica medida em função da potência de corte teórica em watts;
 P_c = Potência de Corte teórica em watts.

P_c (W)	ΔP (W)
263	1200
500	1655
560	1446
757	1487
823	1614
1063	2229
1438	2060
1563	2478

Tabela 14 – Valores da diferença de potência elétrica medida em função da potência de corte (Autor).

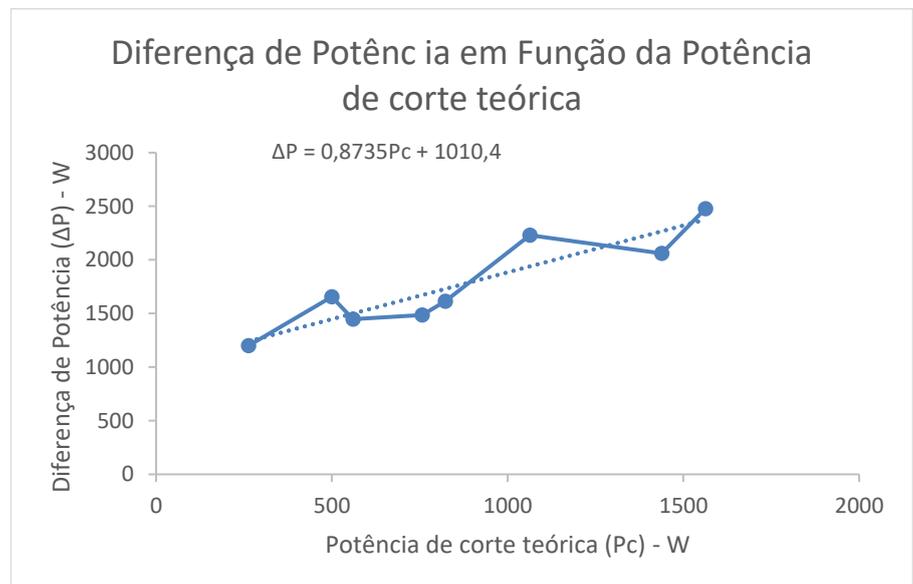


Figura 29 – Gráfico e equação da diferença de potência em função da potência de corte teórica (Autor)

Substituindo $P_e(n)$ e $\Delta P(P_c)$ na Equação 8 pelos valores encontrados nas Equações 9 e 10 se obtém:

$$P_{ef} = 0,8616 \cdot n + 33,586 + P_c + 0,873 \cdot P_c + 1010,4$$

Fazendo as operações e isolando P_c se obtém a Equação 11:

$$P_c = \frac{P_{ef} - 0,86 \cdot n - 1044}{1,87} \quad (11)$$

Em que: $P_c :=$ Potência de Corte Instantânea em watts;
 $P_{ef} =$ Potência Elétrica medida em watts;
 $n =$ velocidade angular do eixo árvore em rpm.

A equação 11 permite a determinação da Potência de Corte Instantânea a partir da Potência Elétrica obtida por meio do monitoramento das correntes elétricas e tensões elétricas na alimentação dos módulos controladores dos servomotores da máquina.

5.2.4 Conclusões da segunda etapa dos ensaios

Na segunda etapa de ensaios foi obtida a equação de conversão da Potência Elétrica medida em Potência de Corte efetiva durante o processo de usinagem. Entretanto, observou-se a necessidade de se monitorar a velocidade de rotação do eixo árvore que exerce influência significativa na potência total demandada pela máquina.

5.3 Terceira etapa dos ensaios

Na terceira etapa de ensaios, visando testar e validar a metodologia, sistema e equação de conversão de energia elétrica medida em Potência de Corte (Equação 11), foi simulada a usinagem de uma peça em produção, o pino em aço inoxidável AISI 304 detalhado na Figura 16 (página 39).

5.3.1 Resultados da terceira etapa dos ensaios

Na produção, foi utilizada uma pastilha nova com uma única aresta de corte e utilizada até sua completa deterioração. Desta forma, foram produzidas 36 peças, sendo que, na usinagem da última peça, a pastilha estava totalmente deteriorada e, por esse motivo, não houve a remoção de material programada.

A Figura 30 mostra a primeira peça produzida dentro das especificações, a Figura 31 mostra a última peça produzida, em que se pode constatar que não houve a remoção total do material durante o processo de usinagem e o acabamento superficial comprova o elevado desgaste da pastilha.



Figura 30 – Primeira peça produzida no ensaio (Autor)



Figura 31 – Última peça produzida no ensaio (Autor)

Os resultados estão detalhados na Tabela 15. Observa-se que houve um progressivo aumento da Potência de Corte com o decorrer do processo de produção, com exceção da última peça na qual, efetivamente, não houve corte adequado de material.

Tabela 15 – Resultados obtidos com a peça em produção (Autor)

Resultados obtidos para as potências com a peça em produção				
Pino (sequência)	Primeira passada (W) (d=12,5mm/n=3820rpm)		Segunda passada (W) (d=10,5mm/n=4550rpm)	
	P elétrica medida	Pc mecânica equivalente	P elétrica medida	Pc mecânica equivalente
1	5105	415	5137	96
2	5061	391	5191	125
3	4993	355	5204	132
11	5114	420	5241	152
12	5358	550	5297	182
21	5086	405	5307	187
22	5269	503	5371	221
31	5813	794	5414	244
32	5947	865	5517	299
34	6178	989	5584	335
36	5816	795	5283	174

O gráfico da Figura 32 permite visualizar com maior clareza o aumento da Potência de Corte com a evolução do desgaste da ferramenta em uso. Na construção do gráfico, foram desconsiderados os resultados obtidos na usinagem da última peça, por não ter sido efetuada a remoção total de material, invalidando os resultados obtidos nessa usinagem.

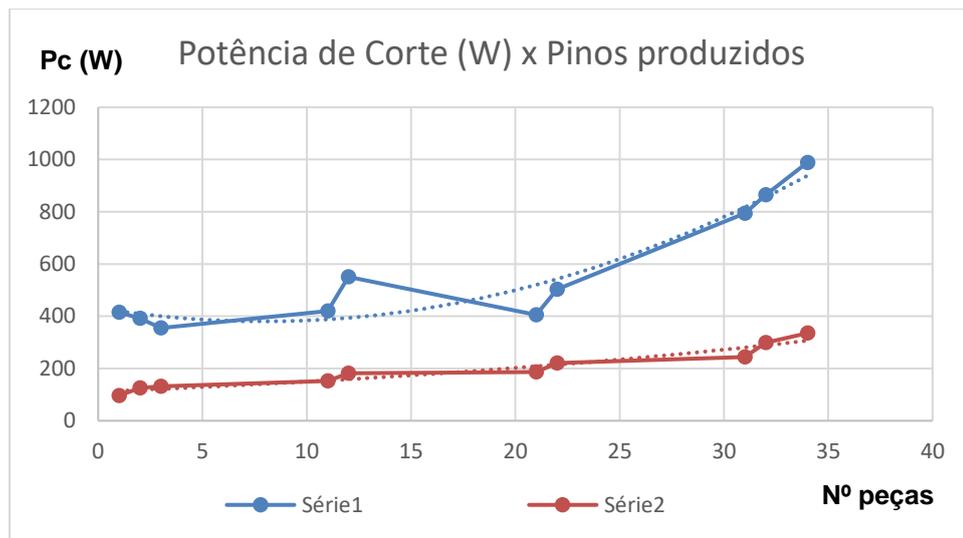


Figura 32 – Evolução da Potência de Corte em relação às peças produzidas (Autor)

5.3.2 Conclusões da terceira etapa de ensaios

Ficou comprovada a eficiência do sistema e metodologia para determinação da Potência de Corte por meio do monitoramento da variação de demanda de potência elétrica pela máquina, bem como o aumento dessa potência, conforme a pastilha se desgasta e perde sua eficiência de corte no processo de usinagem.

No gráfico da Figura 32 pode-se observar que na 1ª passada, onde a profundidade de usinagem foi maior, e conseqüentemente a potência de corte também, a curva apresentou uma tendência de crescimento exponencial, enquanto na 2ª passada, com profundidade de usinagem e potência de corte menores, a tendência de crescimento foi linear. Isso pode ser mais bem estudado em trabalhos futuros.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A metodologia e aparato desenvolvido se mostraram eficazes, no sentido de comprovar uma correspondência entre a Variação da Demanda de Potência Elétrica pela máquina e a Potência de Corte Efetiva no processo de usinagem em torno CNC. Conforme a pastilha se desgasta, perde sua eficiência, aumentando gradativamente a Potência de Corte envolvida no processo de usinagem.

Pode-se concluir que, para cada diferente equipamento em que a metodologia e sistema forem aplicados, haverá necessidade de ensaios de forma a se determinar a equação de conversão para cada caso.

Entretanto, para viabilizar sua aplicação industrial por meio de um sistema tecnológico eficiente, preciso e de simplicidade na implantação, será necessário um microcontrolador com maior capacidade de processamento, que possibilite alta taxa de captura e processamento de sinais da ordem de intervalos menores que 8 ms (precisão maior que 1/2 Hz)¹¹ ao invés dos 60 ms (precisão de 3,6 Hz). Em outros trabalhos, como os referenciados na revisão bibliográfica (tópico 2), foram utilizados dispositivos de captura e tratamento de sinais consagrados e adquiridos no mercado, entretanto, essa não é a proposta deste trabalho, seja pelo alto custo desses equipamentos (proibitivos para empresas de pequeno porte) ou pela complexa instalação que exigem por demandarem módulos separados como dispositivos de aquisição de dados (DAQ) sensíveis e microcomputadores (para análise de sinais por software) além dos sensores o que torna inadequada sua aplicação em ambiente industrial.

Também será necessário implementar algum grau de automação, em especial, para medição da velocidade do eixo árvore e para identificação da posição e deslocamento da ferramenta que possibilite a identificação dos dados no momento da usinagem.

¹¹ De acordo com o Teorema de Nyquist (também conhecido como “Teorema da Amostragem”), a quantidade de amostras por unidade de tempo de um sinal, chamada taxa ou frequência de amostragem, deve ser maior que o dobro da maior frequência contida no sinal a ser amostrado, para que possa ser reproduzido integralmente sem erro (RANDHALL, 2011 – p.72) . Como a frequência da rede elétrica no Brasil é de 60 Hz, devem ser capturadas mais do que duas amostras por período (duas a cada 16 ms que corresponde a 1 amostra a cada 8 ms).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALTIN, A. *et al.* **The effects of cutting speed on tool wear and tool life when machining Inconel 718 with ceramic tools.** *Materials & Design*, v.28, p.2518-2522. 2007.

ATTANASIO, A. *et al.* **Minimal quantity lubrication in turning: Effect on tool wear.** *Wear*, v.260, p.333-338. 2006.

AVRAM, O. I., XIROUCHAKIS, P. **Evaluating the use phase energy requirements of a machine tool system.** *Journal of Cleaner Production*, v.19.6 p.699-711. 2011.

BEHRENDT, T. *et al.* **Development of an energy consumption monitoring procedure for machine tools.** Author links open overlay panel. Laboratory for Manufacturing and Sustainability University of California at Berkeley USA. 2012.

BHUSHAN, R. K. **Optimization of cutting parameters for minimizing power consumption and maximizing tool life during machining of Al alloy SiC particle composites.** *Journal of Cleaner Production*, v.39 p.242-254. 2013.

BONIFACIO, M.E.R., DINIZ, A.E. **Correlating tool wear, tool life, surface roughness and tool vibration in finish turning with coated carbide tools.** *Wear*, v.173, p.137-144. 1994.

BOYLESTAD, R. L. **Introdução à Análise de Circuitos.** São Paulo: Pearson, 12ª Edição, 2014.

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

EVANS, M. *et al.* **Arduino em Ação.** São Paulo: Novatec, 2013.

FALEH, A. *et al.* **Use of electrical power for online monitoring of tool condition.** *Resenha*. 2005. Disponível em < www.sciencedirect.com > Acesso em: 16 jun.2016.

FRACARO, J. **Fabricação pelo Processo de Usinagem e meios de Controle.** Curitiba, Intersaberes, 1ª Edição, 2013.

GROOVER, M. P. **Automação Industrial e Sistemas de Manufatura**. São Paulo, Pearson, 3ª Edição, 2011.

INGA PROJETOS. **Aula 10**. Disponível em <<http://ingaprojetos.com.br/download/processo%20de%20usinagem.pdf>> Acessado em 12/01/2018

KURNAR, A.S. *et al.* **The effect of tool wear on tool life of alumina-based ceramic cutting tools while machining hardened martensitic stainless steel**. Journal of Materials Processing Technology, v.173, p.151-156. 2006

LANÇONI, P. N. **Estudo Comparativo de Medição de Força de Corte no Processo de Retificação**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia de Bauru – UNESP, janeiro/2008.

LI, W., KARA, S. **An empirical model for predicting energy consumption of manufacturing processes: a case of turning process**. CIRP Annals, v.61, p.43-46. 2011

MA, J. *et al.* **Assessment of cutting energy consumption and energy efficiency in machining of 4140 steel**. International Journal of Advanced Manufacturing Techn, v.74, p.1701-1708. 2014

MACHADO, A. R. *et al.* **Teoria da Usinagem dos Materiais**. São Paulo: Ed. Blucher, 12ª Edição, 2009.

MANNAMA, M. A. *et al.* **Monitoring and Adaptive Control of Cutting Process by Means of Motor Power and Current Measurements**. CIRP Annals – Manufacturing Technology, v.38, p.347-350. 1989. Disponível em < www.sciencedirect.com > Acesso em: 16 jun.2016.

MARKSBERRY, P.W., JAWAHIR, I.S. **A comprehensive tool-wear/tool-life performance model in the evaluation of NDM (near dry machining) for sustainable manufacturing**. International Journal of Machine Tools and Manufacture, v.48, p.878-886. 2008.

NEWMAN S.T. *et al.* **Energy efficient process planning for CNC machining.** CIRP – Journal of Manufacturing Science and Technology. v.6 p.127-136. 2012.

RANDHALL, R. B. **Vibration – Based Condition Monitoring.** New Delhi: Wiley, 2011.

ROMI. **Documentação Técnica. Centur 30D.** Santa Bárbara D'Oeste, 2009.

SANDVIK Coromant. **Manual Técnico de Usinagem.** Suécia: Elanders, 2009

SANDVIK Coromant Academy. **Training Handbook.** Suécia: Elanders, 2015.

SANDVIK Coromant. **Turning Tools.** Suécia: Elanders, 2015.

SHAOHUA, H. *et al.* **An on-line approach for energy efficiency monitoring of machine tools.** Journal of Cleaner Production, v.27, p.133-140. 2012

SARWAR, M. *et al.* **Measurement of specific cutting energy for evaluating the efficiency of bandsawing different workpiece materials.** International Journal of Machine Tools and Manufacture, v.49, p.958-965. 2009

SOUZA, A.J. **Aplicação de multisensores no prognóstico da vida da ferramenta de corte em torneamento.** Tese de doutorado em Engenharia Mecânica. UFSC. Florianópolis. setembro/2004.

SIEMENS. **Sinamics S. Induction Motors for Machine Tools.** Nurnberg, Germany, 2009.

SIEMENS. **Sinumerik 802D SL. Manual de programação e de utilização.** São Paulo, 2007.

TERMITE: Ferramenta de software, que permite capturar sinais provenientes do Arduino disponível em <http://termite.win7dwnld.com/download-new-version>

Anexo 3: Força específica de corte e dureza dos materiais

Fonte: SANDVICK (2009). Manual Técnico de Usinagem – pags. A-80 e A-82

(adaptado)

ISO	No. CMC	Material	Força de corte específica $k_c 0.4$	Dureza Brinell		
			N/mm ²	HB		
P AÇOS	01.1	Aços-carbono	C = 0.1 – 0.25 %	2000	125	
	01.2		C = 0.25 – 0.55 %	2100	150	
	01.3		C = 0.55 – 0.80 %	2200	170	
	02.1	Aços baixa-liga, (elementos de liga ≤5%)	Aço de rolamento de esferas não temperado Temperado e revenido Temperado e revenido	2150	180	
	02.12			2300	210	
	02.2			2550	275	
	02.2			2850	350	
	03.11	Aços alta-liga, (elementos de liga >5%)	Aço ferramenta recozido temperado	2500	200	
	03.21			3900	325	
	06.1	Aços fundidos	Sem liga baixa liga (elementos de liga ≤5%) Alta liga, elementos de liga >5%)	2000	180	
06.2	2100			200		
06.3	2650			225		
M Aço inox	05.11	Aços inoxidáveis – Barras/forjados Ferríticos/martensíticos	Não temperado	2300	200	
	05.12		PH-temperado	3550	330	
	05.13		Temperado	2850	330	
	05.21	Aços inoxidáveis – Barras/forjados Austeníticos	Austenítico	2300	180	
	05.22		PH-temperado	3550	330	
	05.23		Superausteníticos	2950	200	
	05.51	Aços inoxidáveis – Barras/forjados Austeníticos-ferríticos (Duplex)	Não soldáveis	≥ 0.05%C	2550	230
	05.52		Soldáveis	< 0.05%C	3050	260
	15.11	Aços inoxidáveis – Fundidos Ferríticos/-martensíticos	Não temperados	2100	200	
	15.12		PH-temperados	3150	330	
15.13	Temperados		2650	330		
15.21	Aços inoxidáveis – Fundidos Austeníticos	Austeníticos	2200	180		
15.22		PH-temperados	3150	330		
15.23		Superausteníticos	2700	200		
N Não ferrosos metais	30.11	Ligas de alumínio	Forjadas ou forjadas e trabalhadas a frio, não envelhecidas	500	60	
	30.12			Forjadas ou forjadas e envelhecidas	800	100
	30.21	Ligas de alumínio	Fundidas, não envelhecidas	750	75	
	30.22			Fundidas ou fundidas e envelhecidas	900	90
	30.41	Ligas de alumínio	Fundidas, 13–15% Si	950	130	
	30.42			Fundidas, 16–22% Si	950	130
	33.1	Cobre e ligas de cobre	Ligas de usinabilidade melhora, ≥1% Pb	700	110	
	33.2			Latão, bronzes com chumbo, ≤1% Pb	700	90
33.3	Bronze e cobre sem chumbo incl. cobre eletrolítico			1750	100	

Anexo 4: Sensor de Corrente modelo SCT-013

Fonte: Beijing Yaohuadechang Electronic Co.- www.yhdc.com / www.yhdc.lv – 20/08/2016

Split-Core Current Transformer

Model: SCT-013 Series

Characteristics: Opening size: 13mm×13mm

Non-linearity±3% (10%—120% rated input current)

1.5m leading wire, Φ3.5 three core plug standard output

Current output type or Voltage output type (Voltage output type built-in sampling resistor)

Purpose: Suitable for the current measuring

monitoring and protection of AC motor

lighting equipment air compressor and so on

Core material: Ferrite

Mechanical strength: The number of switching is not less than 1000 times

(Test under 20°C).

Safety index: Dielectric strength (between Shell and output) 6000V AC/1min

Fire resistance property: in accordance with UL94-V0

Working temperature: -25°C—+70°C

Outline size diagram: (in mm)

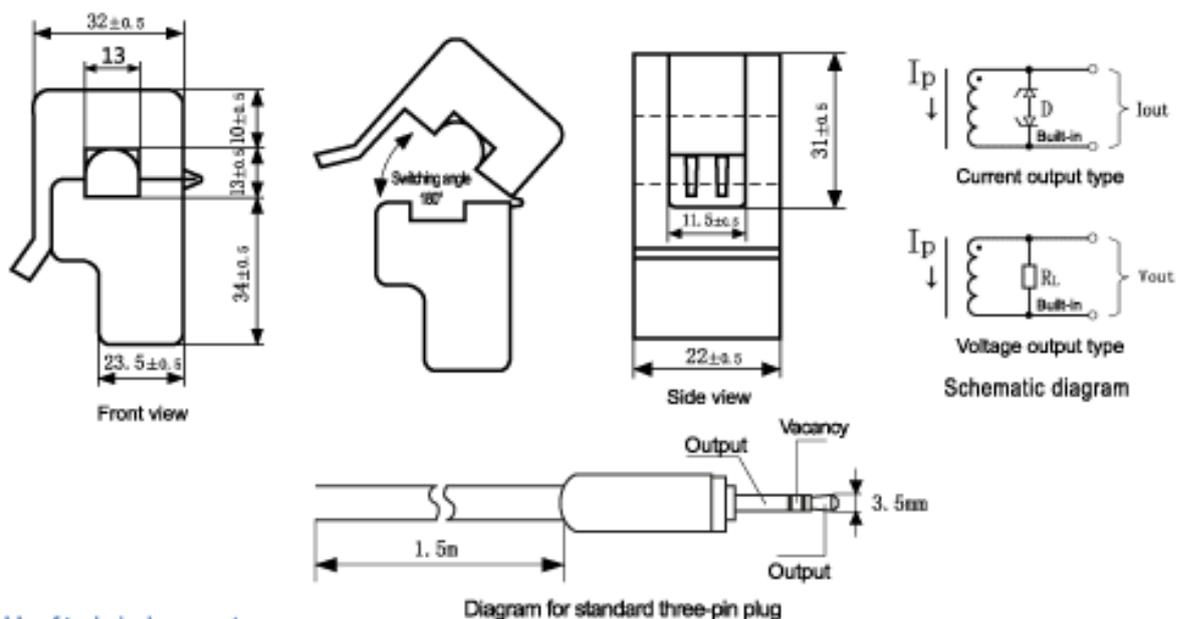


Table of technical parameters:

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 mode	Current/33m A	Voltage/1V	Voltage/1V	Voltage/1V	Voltage/1V
Model	SCT-013-025	SCT-013-030	SCT-013-050	SCT-013-060	SCT-013-070
Input current	0-25A	0-30A	0-50A	0-60A	
Output mode	Voltage/1V	Voltage/1V	Voltage/1V	Voltage/1V	

Output mode: Voltage output type built-in sampling resistor; Current output type built-in protective diode;
Forbidden to be opening operating for current type.

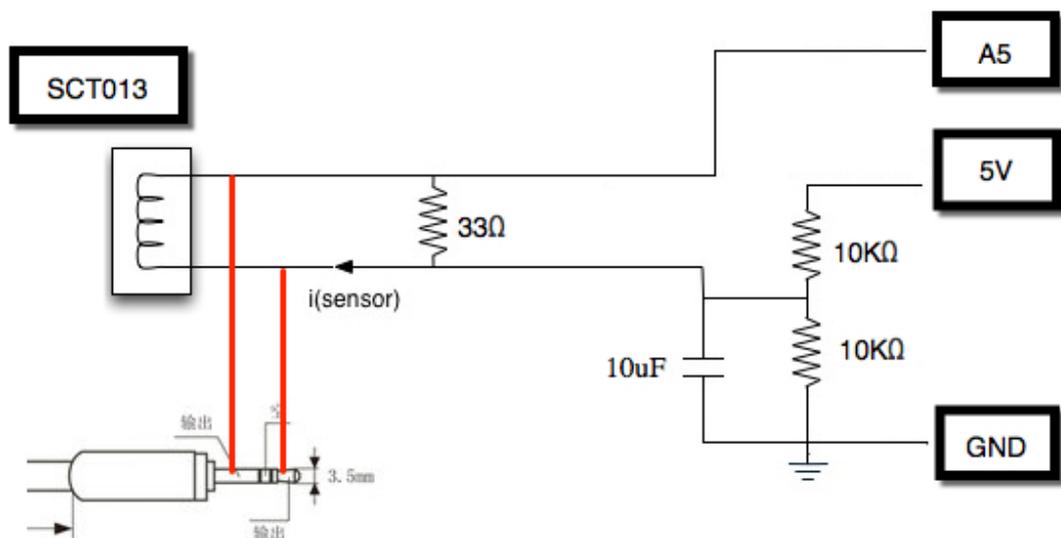
Typical table of technical parameters:

input current	output voltage	non-linearity	build-in sampling resistance (R _L)
0-30A	0-1V	±1%	62 Ω
turn ratio	resistance grade	work temperature	dielectric strength(between shell and output)
1800:1	Grade B	-25°C~+70°C	1500V AC/1min 5mA

Anexo 5: Esquema de ligações Sensor de Corrente modelo SCT-013

Fonte:

<http://cms.35g.tw/coding/arduino-using-sct013-measure-current/>

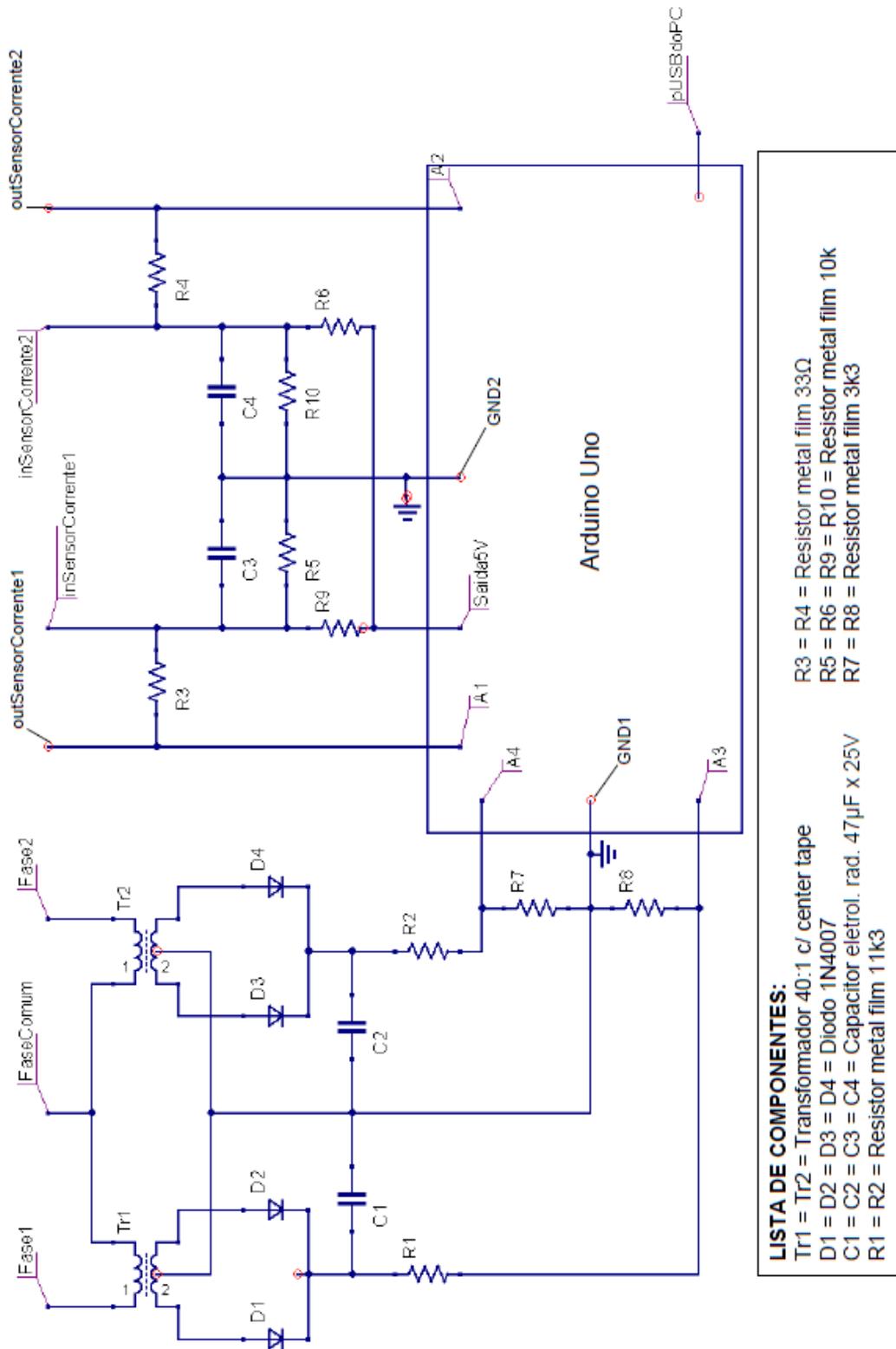


Apêndice A – Programa de usinagem com comentários explicativos e tempos decorridos em cada fase de operação.

Linha	Programa	Descrição do comando	Faixa de tempo (segundos)	Obs.
N10	G291	Blocos iniciais / deslocamento para ponto de troca de ferramenta	0 a 2	Avanço com velocidade de corte constante: Vc = 150 m/min
N20	G21 G40 G90 G95			
N30	T00			
N40	G54 G0 X200 Z300			
N50	T0501 (ACAB_EXT)			
N60	G96 S150			
N70	G92 S3000 M3			
N80	G0 X30 Z50	Aproximação rápida	2 a 4	
N90	G1 Z10 F0.4 M8	1º passe - Avanço em vazio/usinagem: d30 - f = 0,4 mm/r - vc = 150 m/min - 1292 rpm Percorrido em Z: 40mm / tempo: 4,64 seg.	4 a 8	
N100	G0 X35 Z50	Reposicionamento rápido para novo passe	aproxim. 0,5	
N110	X25			
N120	G1 Z10	2º passe - Avanço em vazio/usinagem d25 - f = 0,4 mm/r - vc = 150 m/min - 1910 rpm Percorrido em Z: 40 mm / tempo: 3,14 seg.	8 a 12	
N130	G0 X30 Z50	Reposicionamento rápido para novo passe	aproxim. 0,5	
N140	X20			
N150	G1 Z10	3º passe - Avanço em vazio/usinagem d20 - f = 0,4 mm/r - vc = 150 m/min - 2390 rpm Percorrido em Z: 40 mm / tempo: 2,51 seg	12 a 15	
N160	G0 X25 Z50	Reposicionamento rápido para novo passe	aproxim. 0,5	Avanço com velocidade do eixo árvore constante: 3000 rpm
N170	X15			
N180	G1 Z10	4º passe - Avanço em vazio/usinagem d15 - f = 0,4 mm/r - 3000 rpm Percorrido em Z: 40 mm / tempo: 2,00 seg.	16 a 18	
N190	G0 X20 Z50	Reposicionamento rápido para novo passe	aproxim. 0,5	
N200	X10			
N210	G1 Z10	5º passe - Avanço em vazio/usinagem d10 - f = 0,4 mm/r - 3000 rpm Percorrido em Z: 40 mm / tempo: 2,00 seg.	19 a 20	
N220	G0 X15 Z50	Reposicionamento rápido para novo passe	aproxim. 0,5	
N230	X5			
N240	G1 Z10	5º passe - Avanço em vazio/usinagem d5 - f = 0,4 mm/r - 3000 rpm Percorrido em Z: 40 mm / tempo: 2,00 seg.	21 a 23	
N250	G0 X10 Z50 M9		23 a 26	

N260	T00	Deslocamento rápido para troca de ferramenta.		
N270	G54 G0 X200 Z300			
N280	T0601 (bedame)			
N290	G96 S80			
N300	G92 S2000 M3			
N310	G0 X35 Z10.5	Aproximação rápida	26 a 28	
N320	G1 X-3 F0.05 M8	Corte	28 a 45	
N330	G0 X20 Z30 M9	Afastamento e Fim de programa	45 a 46	
N340	T00			
N350	M30			

Apêndice B – Esquema do circuito eletrônico do Dispositivo de Captura, condicionamento e tratamento dos sinais.



Apêndice C – Código para Calibração dos sinais de tensão elétrica

```
//Valores analógicos básicos lidos nas entradas de tensões

//Definição das Variáveis

float sensorTensao_1 = A1; //pino em que está ligado o sinal do primeiro sensor de tensao elétrica
float valorLido_1 = 0; //valor lido na entrada analógica 1

float sensorTensao_2 = A2; //pino em que está ligado o sinal do segundo sensor de tensao elétrica
float valorLido_2 = 0; //valor lido na entrada analógica 2

unsigned long time; //designa os intervalos de medição em unidades de tempo

void setup() {
  Serial.begin(9600); //Inicializa a comunicação Serial na taxa de 9600 bps
}

void loop() {

  valorLido_1 = analogRead(sensorTensao_1); //leitura da porta analógica em que o sensor de tensao
  eletrica 1 está ligado

  valorLido_2 = analogRead(sensorTensao_2); //leitura da porta analógica em que o sensor de tensao
  eletrica 2 está ligado

  time = millis();

  Serial.println(time); //imprime o tempo em tabela

  Serial.print(valorLido_1);
  Serial.print("\t"); //imprime o valor lido 1 (tensão 1) em tabela

  Serial.print(valorLido_2);
  Serial.print("\t"); //imprime o valor lido 2 (tensão 2) em tabela

  delay(100); //intervalo de 100 milisegundos entre cada leitura
}
```

Apêndice D – Código para Calibração dos sinais de corrente elétrica

```
//Calibração dos sensores de correntes

#include"EmonLib.h" //Inclusão da biblioteca de conversão dos sensores de correntes

EnergyMonitor emon1; //Instância de monitoramento do sensor de corrente 1

EnergyMonitor emon2; //Instância de monitoramento do sensor de corrente 2

unsigned long time; //designa os intervalos de medição em unidades de tempo

void setup() {

  Serial.begin(9600); //Inicializa a comunicação Serial na taxa de 9600 bps

  emon1.current(1,42); //Pino da entrada analógica 1 e parâmetro de calibração obtido para corrente 1

  emon2.current(2,42); //Pino de entrada analógica 2 e parâmetro de calibração obtido para corrente 2
}

void loop() {

  double Irms1 = emon1.calcIrms(30); //Cálculo da corrente rms 1 com 30 ciclos da onda para cada amostra

  double Irms2 = emon2.calcIrms(30); //Cálculo da corrente rms 2 com 30 ciclos da onda para cada amostra

  time = millis();

  Serial.println(time); //imprime o tempo em tabela

  Serial.print(Irms1);
  Serial.print("\t"); //imprime o valor da corrente rms 1 em tabela

  Serial.print(Irms2);
  Serial.print("\t"); //imprime o valor da corrente rms 2 em tabela

  delay(100); //intervalos de 100 milisegundos entre cada leitura
}
```

Apêndice E – Valores das Tensões (valores básicos capturados e valores medidos)

TENSÕES			
(Valores Básicos e Valores medidos)			
Tensão 1		Tensão 2	
Lido (valor básico)	Medido (V)	Lido (valor básico)	Medido (V)
0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00
212.00	112,00	215.00	112,00
216.00	112,00	218.00	112,00
216.00	112,00	217.00	112,00
215.00	112,00	216.00	112,00
215.00	112,00	216.00	112,00
214.00	112,00	215.00	112,00
216.00	112,00	218.00	112,00
216.00	112,00	217.00	112,00
215.00	112,00	216.00	112,00
215.00	112,00	216.00	112,00
214.00	112,00	215.00	112,00
216.00	112,00	218.00	112,00
216.00	112,00	217.00	112,00
215.00	112,00	216.00	112,00
215.00	112,00	216.00	112,00
214.00	112,00	215.00	112,00
215.00	112,00	217.00	112,00
215.00	112,00	216.00	112,00
214.00	112,00	215.00	112,00
215.00	112,00	217.00	112,00
215.00	112,00	216.00	112,00
214.00	112,00	215.00	112,00
213.00	112,00	215.00	112,00
213.00	112,00	214.00	112,00
215.00	112,00	216.00	112,00
214.00	112,00	216.00	112,00
214.00	112,00	215.00	112,00
213.00	112,00	214.00	112,00
213.00	112,00	214.00	112,00
215.00	112,00	216.00	112,00
215.00	112,00	216.00	112,00
214.00	112,00	215.00	112,00
213.00	112,00	215.00	112,00
213.00	112,00	215.00	112,00
216.00	112,00	217.00	112,00

Tensão 1		Tensão 2	
Lido (valor básico)	Medido (V)	Lido (valor básico)	Medido (V)
213.00	112,00	215.00	112,00
214.00	112,00	215.00	112,00
214.00	112,00	215.00	112,00
214.00	112,00	216.00	112,00
214.00	112,00	215.00	112,00
214.00	112,00	215.00	112,00
215.00	112,00	216.00	112,00
214.00	112,00	216.00	112,00
214.00	112,00	215.00	112,00
215.00	112,00	217.00	112,00
214.00	112,00	216.00	112,00
215.00	112,00	217.00	112,00
215.00	112,00	216.00	112,00
214.00	112,00	215.00	112,00
216.00	112,00	217.00	112,00
215.00	112,00	216.00	112,00
214.00	112,00	215.00	112,00
216.00	112,00	217.00	112,00
215.00	112,00	216.00	112,00
214.00	112,00	215.00	112,00
214.00	112,00	216.00	112,00
214.00	112,00	215.00	112,00
216.00	112,00	217.00	112,00
215.00	112,00	216.00	112,00
214.00	112,00	215.00	112,00
214.00	112,00	215.00	112,00
214.00	112,00	215.00	112,00
216.00	112,00	217.00	112,00
214.00	112,00	216.00	112,00
214.00	112,00	215.00	112,00
215.00	112,00	216.00	112,00
214.00	112,00	215.00	112,00
213.00	112,00	215.00	112,00
215.00	112,00	216.00	112,00
214.00	112,00	215.00	112,00
213.00	112,00	215.00	112,00
215.00	112,00	216.00	112,00
215.00	112,00	216.00	112,00
214.00	112,00	215.00	112,00
213.00	112,00	215.00	112,00
214.00	112,00	215.00	112,00
215.00	112,00	216.00	112,00

Apêndice F – Código para Captura dos Valores de Tensões e Correntes e cálculo das Potências.

```
//Determinação da Potência Útil Instantânea na Usinagem em torno à CNC - Versão 4.0

#include"EmonLib.h" //Inclusão da biblioteca de conversão dos sensores de correntes

EnergyMonitor emon1; //Instância de monitoramento do sensor de corrente 1

EnergyMonitor emon2; //Instância de monitoramento do sensor de corrente 2

//Definição das demais Variáveis

float sensorTensao_1 = A3; //pino em que está ligado o sinal do primeiro sensor de tensao elétrica
float valorLido_3 = 0; //valor lido na entrada analógica 3
float tensaoEletrica_1 = 0.00; //tensao elétrica 1 convertida para Volts

float sensorTensao_2 = A4; //pino em que está ligado o sinal do segundo sensor de tensao elétrica
float valorLido_4 = 0; //valor lido na entrada analógica 4
float tensaoEletrica_2 = 0.00; //tensao elétrica 2 convertida para Volts

float P1 = 0; //potência elétrica 1 em Watts

float P2 = 0; //potência elétrica 2 em Watts

float PT = 0; //potência elétrica total em Watts

float Pu = 0; //conversão da potência elétrica em potência útil de usinagem

unsigned long time; //designa os intervalos de medição em unidades de tempo

void setup() {

  Serial.begin(9600); //Inicializa a comunicação Serial na taxa de 9600 bps

  emon1.current(1,42); //Pino de entrada e parâmetro de calibração da corrente 1

  emon2.current(2,42); //Pino de entrada e parâmetro de calibração da corrente 2
}

void loop() {

  double Irms1 = emon1.calcIrms(30); //Cálculo da corrente rms 1 com base nos últimos 30 ciclos da
onda

  double Irms2 = emon2.calcIrms(30); //Cálculo da corrente rms 2 com base nos últimos 30 ciclos da
onda

  valorLido_3 = analogRead(sensorTensao_1); //leitura da porta analógica em que o sensor de tensao
eletrica 1 está ligado
  if (valorLido_3 <= 345) {
    tensaoEletrica_1 = (valorLido_3 * 0.4667) + 11.852; //converte o valor lido na entrada analógica para
o valor da tensao elétrica 1 (de acordo com o fator do sensor)
  }
  if (valorLido_3 > 345){
    tensaoEletrica_1 = (valorLido_3 * 3.4088) - 1013; //converte o valor lido na entrada analógica para o
valor da tensao elétrica 1 (de acordo com o fator do sensor)
  }
}
```

```

P1 = (Irms1 * tensaoEletrica_1); //cálculo da potência elétrica 1

valorLido_4 = analogRead(sensorTensao_2); //leitura da porta analógica em que o sensor de tensao
eletrica 2 está ligado
if (valorLido_4 <= 345){
  tensaoEletrica_2 = (valorLido_4 * 0.4667) + 11.852; //converte o valor lido na entrada analógica para
o valor da tensao elétrica 2 (de acordo com o fator do sensor)
}
if (valorLido_4 > 345){
  tensaoEletrica_2 = (valorLido_4 * 3.4088) - 1013; //converte o valor lido na entrada analógica para o
valor da tensao elétrica 2 (de acordo com o fator do sensor)
}

P2 = (Irms2 * tensaoEletrica_2); //cálculo da potência elétrica 2

PT = (P1 + P2); //cálculo da potência elétrica total demandada pela máquina

//Pu = (PT - 2000) * 0.8; //cálculo da potência útil de usinagem (potência em vazio=2000/rendimento
total=0,8)

time = millis();

Serial.println(time); //imprime o tempo em tabela

Serial.print(Irms1);
Serial.print("\t"); //imprime o valor da corrente 1 em tabela
Serial.print(tensaoEletrica_1);
Serial.print("\t"); //imprime o valor da tensao elétrica 1 em tabela
Serial.print(P1);
Serial.print("\t"); //imprime o valor da potência elétrica 1 em tabela

Serial.print(Irms2);
Serial.print("\t"); //imprime o valor da corrente 2 em tabela
Serial.print(tensaoEletrica_2);
Serial.print("\t"); //imprime o valor da tensao elétrica 2 em tabela
Serial.print(P2);
Serial.print("\t"); //imprime o valor da potência elétrica 2 em tabela

Serial.print(PT);
Serial.print("\t"); //imprime o valor da potência elétrica total em tabela

//Serial.print(Pu);
//Serial.print("\t"); //imprime o valor da potência útil de usinagem em tabela

delay(250); //intervalos de 250 milisegundos entre cada leitura
}

```

Apêndice G – Código Arduino para captura somente da corrente.

```
//Determinação da Corrente Instantânea na Usinagem em torno à CNC - Versão 4.0
#include"EmonLib.h" //Inclusão da biblioteca de conversão dos sensores de correntes
EnergyMonitor emon1; //Instância de monitoramento do sensor de corrente 1
EnergyMonitor emon2; //Instância de monitoramento do sensor de corrente 2

unsigned long time; //designa os intervalos de medição em unidades de tempo

void setup() {

  Serial.begin(9600); //Inicializa a comunicação Serial na taxa de 9600 bps

  emon1.current(1,42); //Pino de entrada e parâmetro de calibração da corrente 1

  emon2.current(2,42); //Pino de entrada e parâmetro de calibração da corrente 2
}

void loop() {

  double Irms1 = emon1.calcIrms(30); //Cálculo da corrente rms 1 com base nos últimos 30 ciclos da
onda

  double Irms2 = emon2.calcIrms(30); //Cálculo da corrente rms 2 com base nos últimos 30 ciclos da
onda

  time = millis();

  Serial.println(time); //imprime o tempo em tabela

  Serial.print(Irms1);
  Serial.print("\t"); //imprime o valor da corrente 1 em tabela

  Serial.print(Irms2);
  Serial.print("\t"); //imprime o valor da corrente 2 em tabela

  delay(50); //intervalos de 50 milisegundos entre cada leitura
}
```

Apêndice H – Resultados da 1ª Fase de ensaios.

APÊNDICE G Resumo dos Ensaios Finais 1ª Fase		POTÊNCIAS MÁXIMAS NOS AVANÇOS (Watts)																	
		1 1292 rpm	1 Médias	1 Pu (teórica)	2 1910 rpm	2 Médias	2 Pu (teórica)	3 2390 rpm	3 Médias	3 Pu (teórica)	4 3000 rpm	4 Médias	4 Pu (teórica)	5 3000 rpm	5 Médias	5 Pu (teórica)	6 3000 rpm	6 Médias	6 Pu (teórica)
Ensaio Irm em Vazio 1	2537		2635		3632		4679		5761		6804		7861		8923		9023		9042
Ensaio Irm em Vazio 2	1979		2631		2724		3692		X		X		X		X		X		X
Ensaio Irm em Vazio 3	2488	2301	2874	2762	4089	0	4202	3498	0	4046	4052	0	4046	3710	0	4035	3647	0	0
Ensaio Irm em Vazio 4	2722		2828		3191		4461						3799			3948			
Ensaio Prms 1 em Vazio	1778		2591		3873		3327						3235			3257			
Irm usin past nova alum 1	2503		4159		X		X						X			X			
Irm usin past nova alum 2	2843		3934		5789		6996		2000		6288		4594		1250	4594		4657	630
Irm usin past nova alum 3	2598		4216		5661		5581		2000		1880		5949		1250	4720			
Prms usin past nova alum 1	2052		4481		5532		X						X			X			
Irm usin past gasta alum 1	2802		4464		4801		5072						5233			5089			
Irm usin past gasta alum 2	2811		3654		X		X						X			X			
Irm usin past gasta alum 2	3203	3023	4706	4384	5499	2000 + ΔP	6241	5304	2000 + ΔP		5535	1880 + ΔP	6443	5838	1250 + ΔP	X	5069		630 + ΔP
Prms usin past gasta alum 1	3190		4410		5643		5292						X			X			
Prms usin past gasta alum 2	3110		X		X		X						X			X			
Irm usin past nova aço 1	3341		7759		9225		8504						8023			8042			
Irm usin past nova aço 1a	3318		8438		8124		7892						X			X			
Irm usin past nova aço 2	3574	3405	8459	8138	8839	5000	8427	8710	5000		8825	4700	X	7838	3130	X	6456		1570
Irm usin past nova aço 3	3442		7789		8919		9248						7727			8621			
Prms usin past nova aço 1	3586		8290		8727		9308						8490			8150			
Prms usin past nova aço 2	3170		8082		8424		8773						6523			6711			
Irm usin past gasta aço 1	3816		8037		9633		9023						8863			8900			
Irm usin past gasta aço 1a	3934		8554		10336		9487						9690			5985			
Irm usin past gasta aço 2	4251		8945		8554		9700		5000 + ΔP		9541	4700 + ΔP	9012		3130 + ΔP	6601			1570 + ΔP
Irm usin past gasta aço 3	4072		8624		X		X						X			X			
Prms usin past gasta aço 1	8927		9002		9214		10366						9028			7068			
Prms usin past gasta aço 2	3497		8613		10088		9127						7701			X			

Apêndice I – Exemplo de dados capturados e análise para extração daqueles do momento da usinagem (resumido).

Irms usin past nova aço 1				Potência Elétrica (W) (Total Irms x 288 V)	Tempo relativo (ms)	Potência Elétrica máxima no intervalo (W)	Operação
Irms 1 (A)	Irms 2 (A)	Tempo absoluto (ms)	Total Irms				
1,82	1,73	564443	3,55	1022,40	6003		
1,75	2,09	564508	3,84	1105,92	6068		
1,81	2,24	564575	4,05	1166,40	6135		
2,03	2,19	564640	4,22	1215,36	6200		
2,04	2,05	564706	4,09	1177,92	6266		
2,1	1,98	564772	4,08	1175,04	6332		
2,03	1,84	564838	3,87	1114,56	6398		
2,03	1,9	564903	3,93	1131,84	6463		
3,5	6,48	564970	9,98	2874,24	6530		
3,44	7,2	565036	10,64	3064,32	6596		
3,74	8,08	565101	11,82	3404,16	6661		
4,8	9,88	565168	14,68	4227,84	6728		
6,12	11,3	565233	17,42	5016,96	6793		
8,07	12,08	565299	20,15	5803,20	6859		
10,24	11,26	565365	21,50	6192,00	6925		
12,79	9,36	565431	22,15	6379,20	6991		
14,49	9,74	565496	24,23	6978,24	7056		
14,9	12,35	565563	27,25	7848,00	7123		
15,74	17,4	565628	33,14	9544,32	7188		
14,82	24,98	565694	39,80	11462,40	7254		
15,67	27,79	565761	43,46	12516,48	7321		
17,42	31,59	565826	49,01	14114,88	7386		
2,96	5,61	565892	8,57	2468,16	7452	3341	1º Passe
3,23	3,34	565958	6,57	1892,16	7518		
3,05	3,14	566024	6,19	1782,72	7584		
2,56	3,02	566090	5,58	1607,04	7650		
2,69	2,66	566156	5,35	1540,80	7716		
2,65	2,55	566221	5,20	1497,60	7781		
2,42	2,38	566288	4,80	1382,40	7848		
2,94	3,37	566353	6,31	1817,28	7913		
2,84	2,37	566420	5,21	1500,48	7980		
2,9	2,72	566486	5,62	1618,56	8046		
2,68	2,71	566551	5,39	1552,32	8111		
2,87	2,9	566618	5,77	1661,76	8178		
2,48	3,4	566683	5,88	1693,44	8243		
2,31	2,57	566750	4,88	1405,44	8310		

2,34	3,96	567541	6,30	1814,40	9101
2,2	2,42	567607	4,62	1330,56	9167
2,61	3,47	567673	6,08	1751,04	9233
1,92	2,35	567739	4,27	1229,76	9299
1,84	2,35	567804	4,19	1206,72	9364
2,02	2,36	567871	4,38	1261,44	9431
2,3	2,92	567937	5,22	1503,36	9497
2,25	3,55	568003	5,80	1670,40	9563
1,86	2,84	568069	4,70	1353,60	9629
1,59	2,96	568465	4,55	1310,40	10025
2,67	4,09	568530	6,76	1946,88	10090
2,74	2,7	568596	5,44	1566,72	10156
3,13	2,92	568663	6,05	1742,40	10223
2,7	4,14	568728	6,84	1969,92	10288
2,42	6,54	568794	8,96	2580,48	10354
3,27	6,92	568860	10,19	2934,72	10420
3,64	7,93	568926	11,57	3332,16	10486
3,67	7,11	568991	10,78	3104,64	10551
4,63	6,97	569058	11,60	3340,80	10618
3,73	6,11	569123	9,84	2833,92	10683
4,73	4,85	569190	9,58	2759,04	10750
4,57	3,95	569255	8,52	2453,76	10815
3,8	3,42	569321	7,22	2079,36	10881
4,42	4,44	569388	8,86	2551,68	10948
4,06	5,13	569453	9,19	2646,72	11013
2,58	6,67	569519	9,25	2664,00	11079
2,61	7,78	569585	10,39	2992,32	11145
2,87	7,69	569651	10,56	3041,28	11211
3,05	8,13	569716	11,18	3219,84	11276
2,42	6,03	569783	8,45	2433,60	11343
2,41	6,15	569848	8,56	2465,28	11408
1,87	4,99	569915	6,86	1975,68	11475
2,38	2,92	569980	5,30	1526,40	11540
2,9	2,7	570046	5,60	1612,80	11606
2,3	2,79	570113	5,09	1465,92	11673
2,89	4,68	570178	7,57	2180,16	11738
3,13	5,62	570244	8,75	2520,00	11804
2,52	5,86	570310	8,38	2413,44	11870
3,42	7,1	570376	10,52	3029,76	11936
2,45	3,4	570441	5,85	1684,80	12001
2,1	3,74	570508	5,84	1681,92	12068
3,94	4,47	570573	8,41	2422,08	12133
2,22	3,13	570640	5,35	1540,80	12200
1,82	2,7	570705	4,52	1301,76	12265
1,49	2,17	570771	3,66	1054,08	12331

31,23	17,74	570836	48,97	14103,36	12396		
27,35	21,15	570903	48,50	13968,00	12463		
23,55	27,33	570969	50,88	14653,44	12529		
2,03	5,75	571035	7,78	2240,64	12595	7759	2º Passe
2,46	2,12	571101	4,58	1319,04	12661		
2,36	1,63	571166	3,99	1149,12	12726		
1,53	1,92	571233	3,45	993,60	12793		
2,16	3,73	571298	5,89	1696,32	12858		
2,73	5,03	571364	7,76	2234,88	12924		
3,36	2,5	571430	5,86	1687,68	12990		
2,21	2,14	571496	4,35	1252,80	13056		
1,65	1,99	571563	3,64	1048,32	13123		
2,32	2,25	571628	4,57	1316,16	13188		
2,19	3,16	571695	5,35	1540,80	13255		
3,56	5,8	571760	9,36	2695,68	13320		
2,47	5,28	571826	7,75	2232,00	13386		
3,21	4,37	571892	7,58	2183,04	13452		
1,72	1,69	571958	3,41	982,08	13518		
2,23	2,21	572024	4,44	1278,72	13584		
2,79	2,57	572090	5,36	1543,68	13650		
2,01	5,26	572155	7,27	2093,76	13715		
1,73	3,56	572222	5,29	1523,52	13782		
1,4	1,82	572288	3,22	927,36	13848		
1,23	2	572354	3,23	930,24	13914		
1,88	1,94	572420	3,82	1100,16	13980		
2,92	2,51	572485	5,43	1563,84	14045		
1,51	4,53	572551	6,04	1739,52	14111		
8,61	16,53	572617	25,14	7240,32	14177		
8,65	15,33	572683	23,98	6906,24	14243		
9,61	15,27	572748	24,88	7165,44	14308		
8,58	12,52	572815	21,10	6076,80	14375		
10,96	12,14	572880	23,10	6652,80	14440		
8,61	8,18	572946	16,79	4835,52	14506		
12,94	9,24	573012	22,18	6387,84	14572		
12,81	8,45	573078	21,26	6122,88	14638		
11,08	12,9	573144	23,98	6906,24	14704		
9,63	13,61	573210	23,24	6693,12	14770		
6,32	15,4	573276	21,72	6255,36	14836		
7,22	14,92	573342	22,14	6376,32	14902		
7,97	16,2	573408	24,17	6960,96	14968		
9,06	16,57	573473	25,63	7381,44	15033		
11,29	15,65	573540	26,94	7758,72	15100		
11,62	11,68	573605	23,30	6710,40	15165		
10,76	8,62	573671	19,38	5581,44	15231		
11,82	7,24	573737	19,06	5489,28	15297		

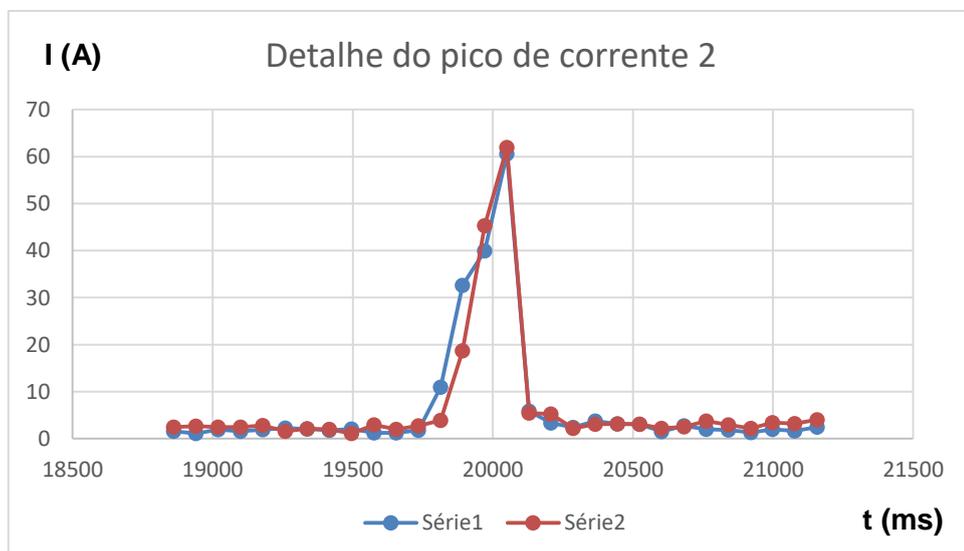
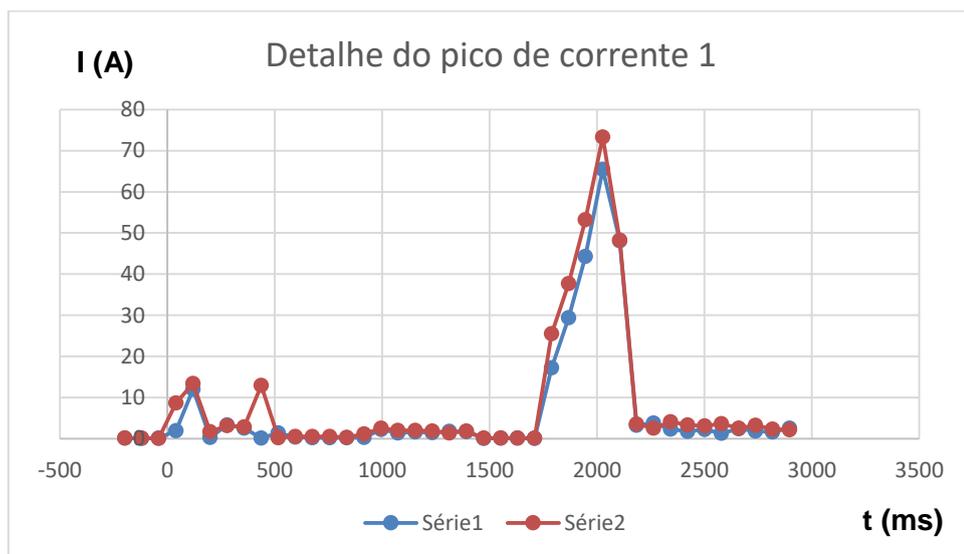
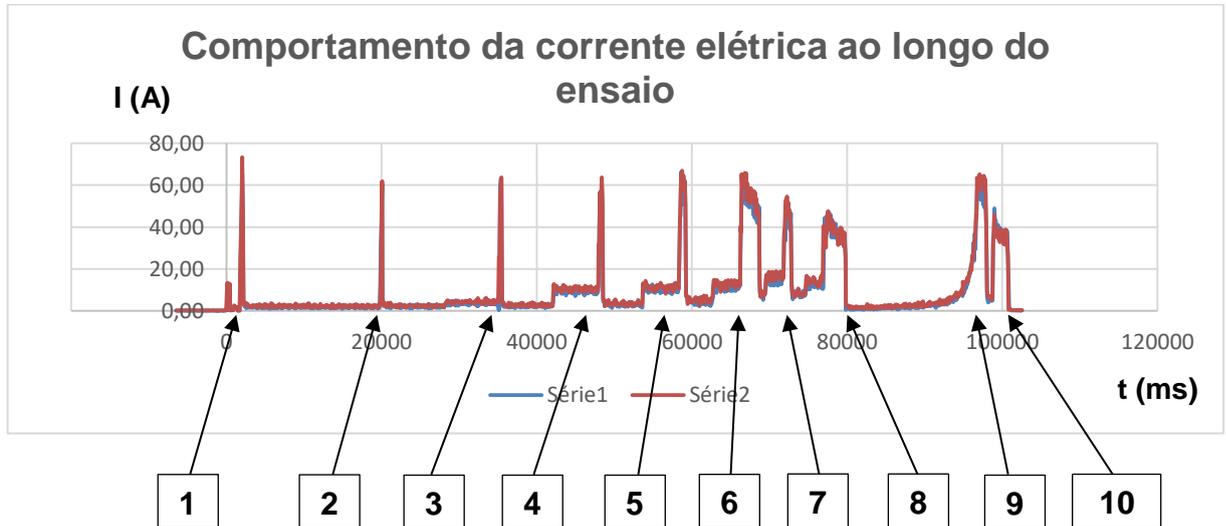
9,98	7,83	573803	17,81	5129,28	15363		
12,1	11,23	573869	23,33	6719,04	15429		
9,19	14,52	573935	23,71	6828,48	15495		
9,43	16,93	574001	26,36	7591,68	15561		
7,86	14,62	574066	22,48	6474,24	15626		
8,08	14,29	574132	22,37	6442,56	15692		
5,34	7,19	574198	12,53	3608,64	15758		
2,23	4,7	574264	6,93	1995,84	15824		
3,95	4,86	574330	8,81	2537,28	15890		
3,11	2,63	574396	5,74	1653,12	15956		
2,55	2,63	574461	5,18	1491,84	16021		
2,16	3,32	574528	5,48	1578,24	16088		
29,73	22,53	574594	52,26	15050,88	16154		
23,87	27,18	574659	51,05	14702,40	16219		
20,33	30,66	574726	50,99	14685,12	16286		
19,37	32,7	574791	52,07	14996,16	16351		
19,18	32,45	574857	51,63	14869,44	16417		
19,88	17,96	574923	37,84	10897,92	16483		
2,66	4,57	574989	7,23	2082,24	16549		
3,7	4,33	575055	8,03	2312,64	16615		
2,6	4,2	575121	6,80	1958,40	16681		
1,65	3,31	575186	4,96	1428,48	16746		
4,07	4,56	575253	8,63	2485,44	16813		
2,55	4,59	575319	7,14	2056,32	16879		
3,43	8,48	575384	11,91	3430,08	16944		
3,2	3,54	575451	6,74	1941,12	17011		
2,88	10,69	575516	13,57	3908,16	17076		
1,48	2,95	575583	4,43	1275,84	17143		
2,49	9,1	575648	11,59	3337,92	17208		
1,93	5,85	575714	7,78	2240,64	17274		
2,99	4,22	575780	7,21	2076,48	17340		
2,74	3,09	575846	5,83	1679,04	17406	9225	3º Passe
5,33	1,33	575911	6,66	1918,08	17471		
2,77	2,9	575978	5,67	1632,96	17538		
2,51	3,93	576044	6,44	1854,72	17604		
10,93	11,62	576109	22,55	6494,40	17669		
8,49	13,64	576176	22,13	6373,44	17736		
7,96	14,72	576241	22,68	6531,84	17801		
9,75	11,88	576307	21,63	6229,44	17867		
7,06	13,13	576372	20,19	5814,72	17932		
10,44	11,62	576439	22,06	6353,28	17999		
9,14	10,56	576504	19,70	5673,60	18064		
13,27	7,04	576571	20,31	5849,28	18131		
14,05	7,21	576636	21,26	6122,88	18196		
13,68	10,78	576702	24,46	7044,48	18262		

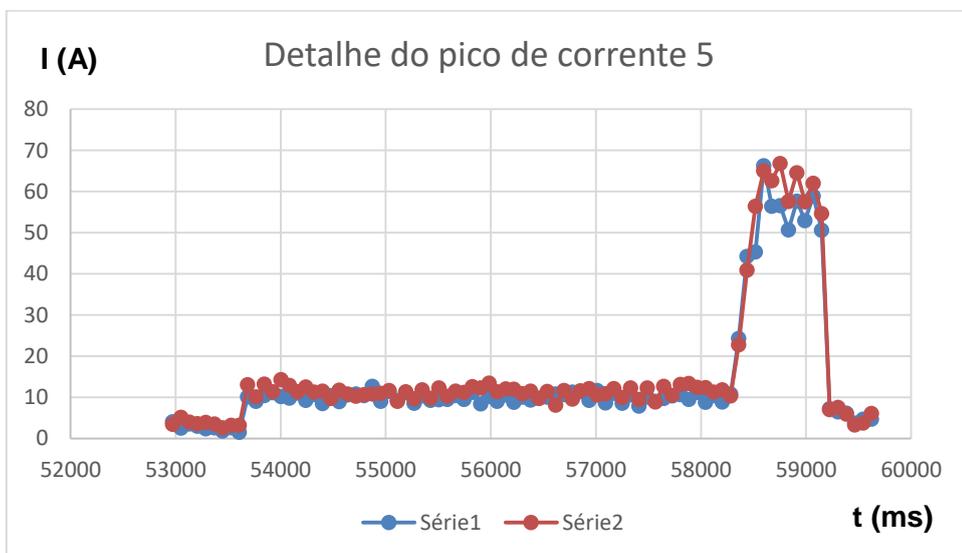
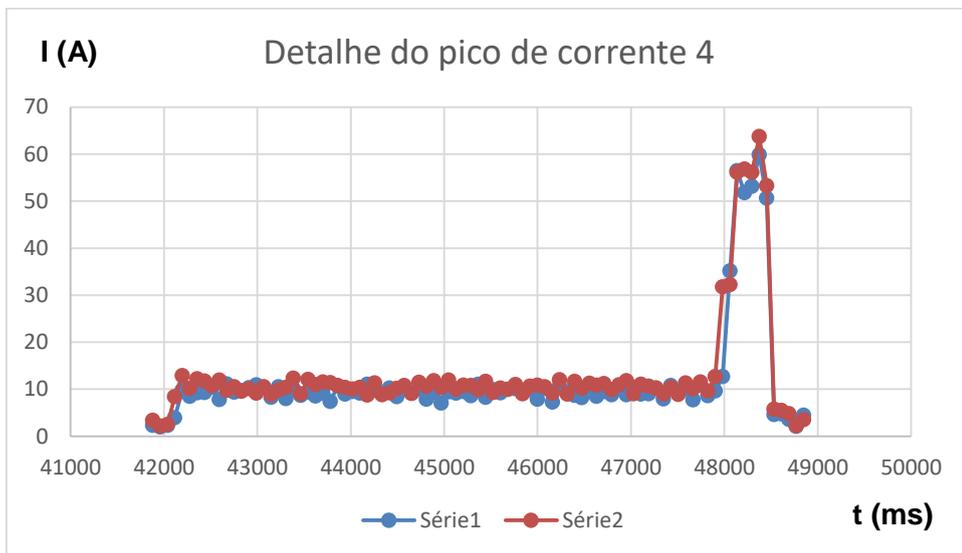
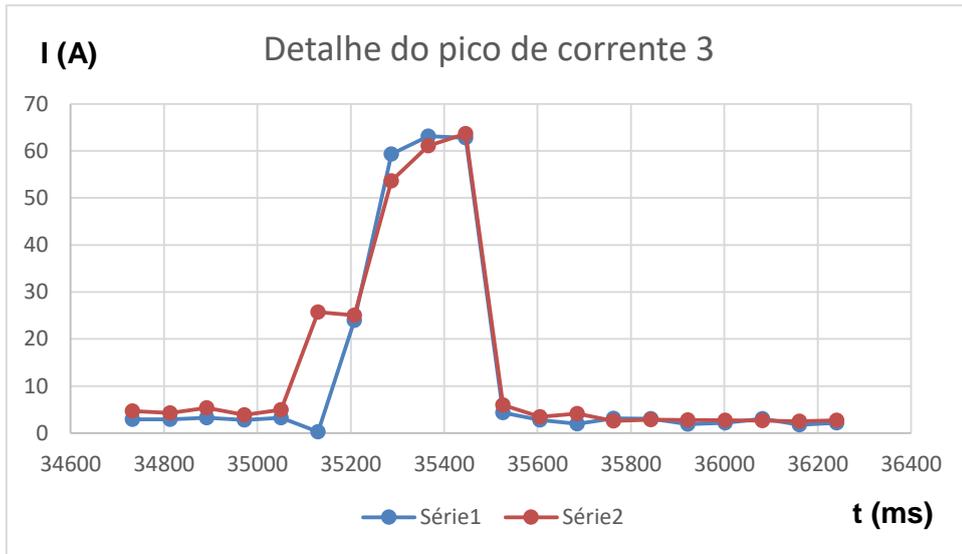
10,01	10,35	576769	20,36	5863,68	18329		
10,06	15,32	576834	25,38	7309,44	18394		
8,48	13,43	576900	21,91	6310,08	18460		
8,25	20,02	576965	28,27	8141,76	18525		
9,43	17,49	577032	26,92	7752,96	18592		
8,52	18,22	577097	26,74	7701,12	18657		
13,83	18,2	577163	32,03	9224,64	18723		
11,97	13,86	577229	25,83	7439,04	18789		
14,28	13,49	577295	27,77	7997,76	18855		
1,69	2,1	577361	3,79	1091,52	18921		
2,4	3,56	577427	5,96	1716,48	18987		
2,56	3,79	577492	6,35	1828,80	19052		
2,61	3,37	577559	5,98	1722,24	19119		
3,41	6,39	577625	9,80	2822,40	19185		
2,35	2,04	577690	4,39	1264,32	19250		
19,82	34,99	577757	54,81	15785,28	19317		
19,37	32,77	577822	52,14	15016,32	19382		
21,53	29,58	577888	51,11	14719,68	19448		
24,37	25,3	577953	49,67	14304,96	19513		
26,4	18,99	578020	45,39	13072,32	19580		
26,59	17,09	578085	43,68	12579,84	19645		
24,94	18,8	578151	43,74	12597,12	19711		
21,84	23,25	578217	45,09	12985,92	19777		
18,41	27,71	578283	46,12	13282,56	19843		
5,58	8,84	578349	14,42	4152,96	19909		
3,56	6,24	578415	9,80	2822,40	19975		
4,69	4,11	578481	8,80	2534,40	20041		
5,7	3,05	578546	8,75	2520,00	20106		
7,97	7,02	578613	14,99	4317,12	20173		
4,67	5,86	578678	10,53	3032,64	20238		
2,11	1,54	578744	3,65	1051,20	20304		
4,85	1,43	578810	6,28	1808,64	20370		
7,1	1,9	578876	9,00	2592,00	20436		
5,06	2,91	578941	7,97	2295,36	20501		
14,75	15,2	579008	29,95	8625,60	20568		
10,47	16,43	579074	26,90	7747,20	20634	9504	4º Passe
7,83	14,25	579139	22,08	6359,04	20699		
5,58	7,8	579205	13,38	3853,44	20765		
10,89	9,9	579271	20,79	5987,52	20831		
13,48	13,24	579337	26,72	7695,36	20897		
8,47	8,55	579402	17,02	4901,76	20962		
5,72	6,11	579469	11,83	3407,04	21029		
8,69	8,14	579534	16,83	4847,04	21094		
10,42	15,04	579600	25,46	7332,48	21160		
9,11	16,61	579665	25,72	7407,36	21225		

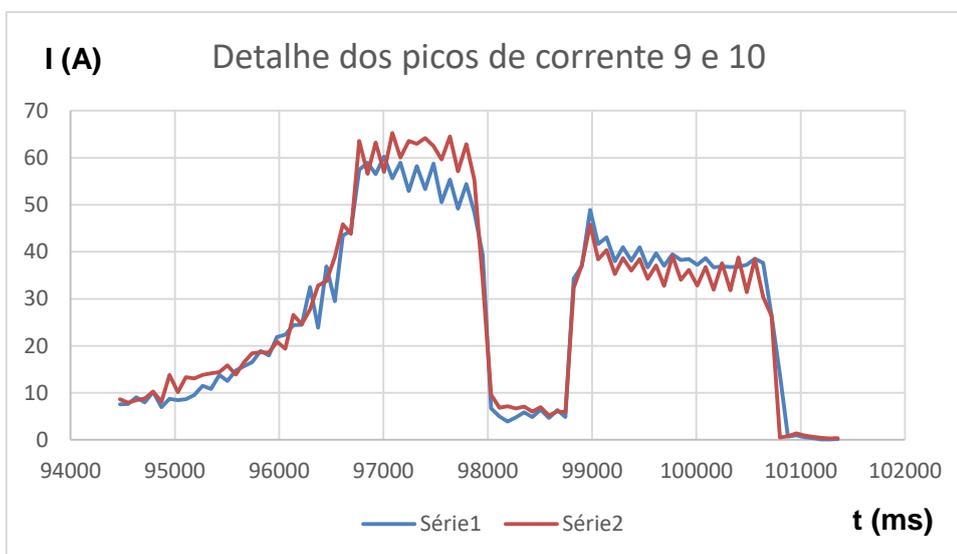
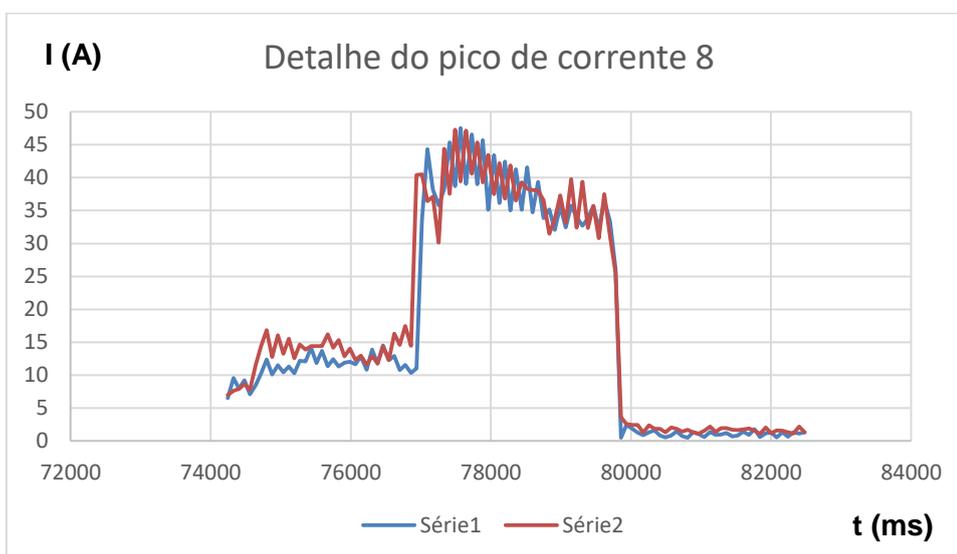
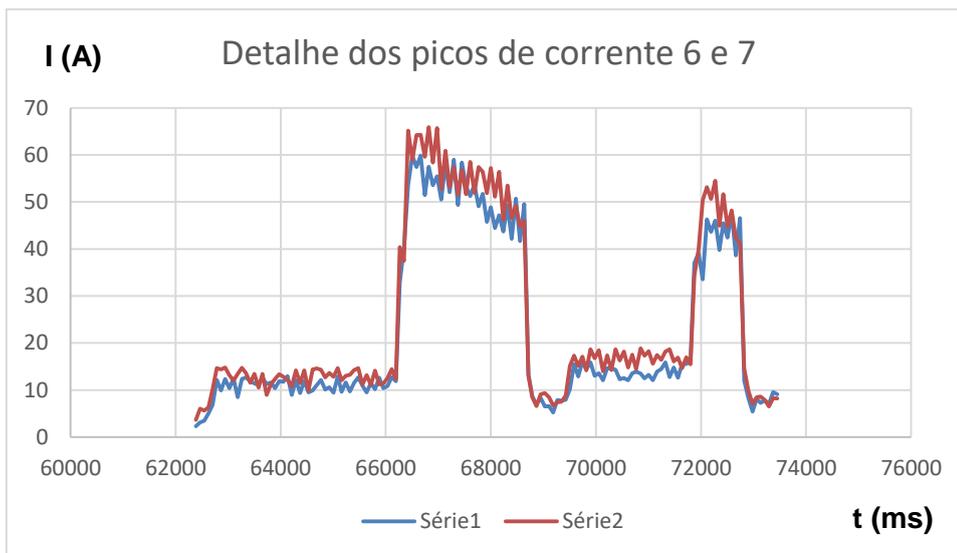
6,89	16,66	579732	23,55	6782,40	21292		
10,74	22,26	579798	33,00	9504,00	21358		
10,89	20,84	579864	31,73	9138,24	21424		
11,96	13,54	579930	25,50	7344,00	21490		
13,44	6,05	579995	19,49	5613,12	21555		
7,81	5,97	580061	13,78	3968,64	21621		
4,7	6,21	580127	10,91	3142,08	21687		
4,23	1,88	580193	6,11	1759,68	21753		
3,63	2,38	580258	6,01	1730,88	21818		
6,42	4,88	580325	11,30	3254,40	21885		
4,64	9,16	580390	13,80	3974,40	21950		
3,04	1,88	580456	4,92	1416,96	22016		
3,58	1,72	580523	5,30	1526,40	22083		
3,42	6,75	580588	10,17	2928,96	22148		
2,55	3,15	580654	5,70	1641,60	22214		
2,7	3,29	580720	5,99	1725,12	22280		
2,59	4,72	580786	7,31	2105,28	22346		
1,76	3,66	580851	5,42	1560,96	22411		
4,62	2,31	580918	6,93	1995,84	22478		
3,69	4,14	580983	7,83	2255,04	22543		
3,39	7,58	581049	10,97	3159,36	22609		
2,93	11,55	581115	14,48	4170,24	22675		
2,93	6,32	581181	9,25	2664,00	22741		
2,46	2,66	581246	5,12	1474,56	22806		
3,46	2,8	581313	6,26	1802,88	22873		
4,48	6,9	581379	11,38	3277,44	22939		
1,82	3,46	581444	5,28	1520,64	23004		
1,8	2,56	581511	4,36	1255,68	23071		
6,31	6,52	581576	12,83	3695,04	23136		
9,91	6,68	581642	16,59	4777,92	23202		
8,58	7,69	581708	16,27	4685,76	23268		
13,1	12,91	581774	26,01	7490,88	23334		
10,84	20,49	581839	31,33	9023,04	23399	9023	5º Passe
5,93	14,65	581906	20,58	5927,04	23466		
3,82	6,28	581971	10,10	2908,80	23531		
7,71	7,85	582037	15,56	4481,28	23597		
10,75	12,18	582103	22,93	6603,84	23663		
7,14	6,57	582169	13,71	3948,48	23729		
5,17	5,97	582235	11,14	3208,32	23795		
8,01	7,82	582300	15,83	4559,04	23860		
8,39	9,04	582366	17,43	5019,84	23926		
6,35	9,92	582432	16,27	4685,76	23992		
7,89	14,28	582498	22,17	6384,96	24058		
9,05	17,29	582563	26,34	7585,92	24123		
4,6	11,72	582630	16,32	4700,16	24190		

2,53	3,26	582695	5,79	1667,52	24255		
5,85	3,83	582761	9,68	2787,84	24321		
7,63	4,03	582828	11,66	3358,08	24388		
2,98	3,06	582893	6,04	1739,52	24453		
3,07	1,71	582959	4,78	1376,64	24519		
2,43	1,87	583025	4,30	1238,40	24585		
4,19	3,91	583091	8,10	2332,80	24651		
3,48	4,73	583156	8,21	2364,48	24716		
2,88	3,08	583223	5,96	1716,48	24783		
2,24	6,55	583288	8,79	2531,52	24848		
1,96	3,79	583354	5,75	1656,00	24914		
3,3	3,44	583420	6,74	1941,12	24980		
2,35	2,63	583486	4,98	1434,24	25046		
4,17	4,31	583552	8,48	2442,24	25112		
2,44	4,16	583618	6,60	1900,80	25178		
7,5	2,5	583684	10,00	2880,00	25244		
3,22	2,71	583749	5,93	1707,84	25309		
2,55	6,33	583816	8,88	2557,44	25376		
2,55	7,09	583881	9,64	2776,32	25441		
1,55	3,55	583947	5,10	1468,80	25507		
1,82	5,63	584013	7,45	2145,60	25573		
2,07	6,55	584079	8,62	2482,56	25639		
2,2	2,47	584144	4,67	1344,96	25704		
7,39	6,59	584211	13,98	4026,24	25771		
9,56	9,15	584276	18,71	5388,48	25836		
6,74	8,8	584342	15,54	4475,52	25902		
2,75	4,71	584409	7,46	2148,48	25969		
4,47	4,18	584474	8,65	2491,20	26034	6042	6º Passe
8,39	9,72	584541	18,11	5215,68	26101		
5,8	15,18	584606	20,98	6042,24	26166		
4,64	11,42	584672	16,06	4625,28	26232		
3,41	10,06	584737	13,47	3879,36	26297		
6,41	12,49	584804	18,90	5443,20	26364		
5,56	8,91	584869	14,47	4167,36	26429		
4,32	6,69	584935	11,01	3170,88	26495		
8,07	7,53	585001	15,60	4492,80	26561		
7,79	8,48	585067	16,27	4685,76	26627		
3,35	6,53	585133	9,88	2845,44	26693		
3,16	6,25	585199	9,41	2710,08	26759		
6,04	10,02	585265	16,06	4625,28	26825		
4,23	12,29	585330	16,52	4757,76	26890		
1,63	7,85	585397	9,48	2730,24	26957		
1,52	1,85	585462	3,37	970,56	27022		
2,66	2,87	585528	5,53	1592,64	27088		

Apêndice J – Detalhes dos Picos de correntes ao longo dos ensaios, demonstrando a paridade das correntes da linha 1 (série 1 em azul) e da linha 2 (série 2 em vermelho).







Apêndice K – Resultados da segunda etapa de ensaios

Potências Elétricas Máximas medidas nas passadas (Pe) e as Potências de Corte teóricas (Pc)														valores	
em Watts - 2ª Etapa de Ensaios															
Condição do Ensaio	1ª Passada 35mm/1363rpm		2ª Passada 30mm/1590rpm		3ª Passada 25mm/1909rpm		4ª Passada 20mm/2386rpm		5ª Passada 15mm/3182rpm		6ª Passada 10mm/4773rpm		7ª Passada 5mm/5000rpm		
	Pe	Pc	Pe	Pc											
Vazio	1304	0	1379	0	1606	0	2092	0	3058	0	4566	0	4784	0	
1 - Alumínio d38,1	Vazio	1506	0	1729	0	1955	0	2592	0	3632	0	5453	0	6009	0
	Usinagem	1706	310	3669	500	3821	500	3710	500	4748	500	6497	500	6119	263
2 - Alumínio d38,1	Vazio	1311	0	1483	0	1648	0	2196	0	2977	0	4691	0	4788	0
	Usinagem	\	310	1871	500	3577	500	3745	500	4604	500	7400	500	6063	263
3 - Alumínio d38,1	Vazio	1451	0	1514	0	1799	0	2095	0	3237	0	4547	0	4816	0
	Usinagem	2471	310	3238	500	3704	500	3735	500	5213	500	6569	500	5965	263
4 - Alumínio d38,1	Vazio	1425	0	1600	0	1693	0	2051	0	3117	0	4801	0	4729	0
	Usinagem	2467	310	3360	500	3754	500	5056	500	5926	500	5991	500	5771	263
5 - Alumínio d38,1	Vazio	1409	0	1419	0	1648	0	2094	0	2901	0	4502	0	4601	0
	Usinagem	2507	310	3503	500	3628	500	5013	500	5302	500	6000	500	5630	263
6 - Alumínio d38,1	Vazio	1356	0	1497	0	1769	0	2055	0	2829	0	4763	0	4663	0
	Usinagem	2328	310	3862	500	3666	500	3869	500	4789	500	6097	500	5751	263
7 - Alumínio d38,1	Vazio	1295	0	1350	0	1710	0	1984	0	2763	0	4279	0	4621	0
	Usinagem	2663	310	4090	500	3615	500	4913	500	4406	500	6150	500	5623	263
8 - Bronze Al d25,4	Vazio	1390	0	1435	0	1627	0	1988	0	2753	0	3993	0	4370	0
	Usinagem	\	\	\	\	\	\	5058	1063	5994	1063	7337	1063	6424	560
9 - Bronze Al d25,4	Vazio	1287	0	1391	0	1466	0	1958	0	2594	0	4045	0	4391	0
	Usinagem	\	\	\	\	\	\	5161	1063	5881	1063	7706	1063	6534	560
10 - Bronze Al d25,4	Vazio	1200	0	1307	0	1562	0	1843	0	2742	0	3955	0	4187	0
	Usinagem	\	\	\	\	\	\	5152	1063	5967	1063	7444	1063	6467	560
11 - Bronze Al d25,4	Vazio	1233	0	1442	0	1615	0	1944	0	2657	0	3983	0	4268	0
	Usinagem	\	\	\	\	\	\	5222	1063	6012	1063	7752	1063	6343	560
12 - Bronze Al d25,4	Vazio	1258	0	1436	0	1505	0	1905	0	2654	0	4062	0	4142	0
	Usinagem	\	\	\	\	\	\	5344	1063	7103	1063	7418	1063	6566	560
13 - Bronze Al d25,4	Vazio	1260	0	1381	0	1475	0	1937	0	2774	0	3811	0	4232	0
	Usinagem	\	\	\	\	\	\	5044	1063	6086	1063	7621	1063	6329	560
14 - Bronze Al d25,4	Vazio	1280	0	1287	0	1475	0	1936	1063	2685	0	3948	0	4147	0
	Usinagem	\	\	\	\	\	\	5125	1063	6296	1063	7498	1063	6485	560
15 - Bronze Al d25,4	Vazio	1412	0	1354	0	1548	0	1898	0	2747	0	3905	0	4182	0
	Usinagem	\	\	\	\	\	\	5043	1063	6074	1063	7411	1063	6436	560
16 - Bronze Al d25,4	Vazio	1337	0	1530	0	1572	0	1966	0	2937	0	3880	0	4259	0
	Usinagem	\	\	\	\	\	\	5083	1063	6107	1063	7693	1063	6259	560
17 - Bronze Al d25,4	Vazio	1253	0	1353	0	1507	0	1963	0	2756	0	3888	0	4244	0
	Usinagem	\	\	\	\	\	\	5147	1063	6041	1063	7230	1063	6218	560
18 - Bronze Al d25,4	Vazio	1361	0	1422	0	1584	0	2000	0	2661	0	3815	0	4196	0
	Usinagem	\	\	\	\	\	\	5240	1063	6345	1063	7441	1063	6220	560
19 - Aço P20 d31,8	Vazio	1260	0	1327	0	1612	0	2106	0	2846	0	3993	0	4212	0
	Usinagem	\	\	2078	563	5657	1563	6266	1563	6995	1563	8252	1563	6832	823
20 - Aço P20 d31,8	Vazio	1292	0	1316	0	1478	0	2147	0	2761	0	3895	0	4244	0
	Usinagem	\	\	2128	563	5914	1563	5983	1563	6667	1563	8097	1563	6860	823
21 - Aço P20 d31,8	Vazio	1218	0	1425	0	1543	0	1902	0	2956	0	3857	0	4227	0
	Usinagem	\	\	2174	563	5651	1563	5884	1563	7017	1563	8280	1563	6659	823
22 - Aço P20 d31,8	Vazio	1324	0	1299	0	1528	0	1958	0	2732	0	3733	0	4171	0
	Usinagem	\	\	2220	563	5552	1563	5900	1563	6588	1563	8064	1563	7084	823
23 - Aço P20 d31,8	Vazio	1206	0	1325	0	1464	0	1829	0	2510	0	3803	0	4185	0
	Usinagem	\	\	2068	563	5569	1563	5978	1563	6901	1563	8515	1563	6696	823
24 - Aço P20 d31,8	Vazio	1261	0	1404	0	1472	0	1877	0	2682	0	3839	0	4211	0
	Usinagem	\	\	2226	563	5749	1563	6138	1563	6594	1563	7952	1563	6790	823
25 - Aço Inox d31,8	Vazio	1368	0	1385	0	1548	0	1916	0	2679	0	3576	0	4186	0
	Usinagem	\	\	2071	518	5185	1438	5631	1438	6244	1438	7535	1438	6520	757
26 - Aço Inox d31,8	Vazio	1286	0	1462	0	1505	0	2103	0	2867	0	3922	0	4222	0
	Usinagem	\	\	2099	518	5044	1438	5492	1438	6129	1438	7630	1438	6557	757
27 - Aço Inox d31,8	Vazio	1270	0	1553	0	1517	0	2000	0	2781	0	3916	0	3959	0
	Usinagem	\	\	2216	518	5095	1438	5429	1438	6567	1438	7572	1438	6563	757
28 - Aço Inox d31,8	Vazio	1247	0	1463	0	1488	0	2059	0	2673	0	4038	0	4100	0
	Usinagem	\	\	2099	518	5064	1438	5516	1438	6104	1438	8012	1438	6670	757
29 - Aço Inox d31,8	Vazio	1175	0	1317	0	1534	0	1944	0	2747	0	3918	0	4142	0
	Usinagem	\	\	2039	518	5170	1438	5432	1438	6180	1438	7570	1438	6826	757

Cálculo dos Valores Médios das Potências Elétricas medidas para os diferentes materiais em usinagem (Watts)														
Amostragem Pe Alumínio		1706		3669		3821		3710		4748		6497		6119
		\		1871		3577		3745		4604		7400		6063
		2471		3238		3704		3735		5213		6569		5965
		2467		3360		3754		5056		5926		5991		5771
		2507		3503		3628		5013		5302		6000		5630
		2328		3862		3666		3869		4789		6097		5751
	2663		4090		3615		4913		4406		6150		5623	
Pe média (W) Alumínio		2357		3370		3681		4292		4998		6386		5846
Amostragem Pe Bronze-Alumínio (UNS C63000)		\		\		\		5058		5994		7337		6424
		\		\		\		5161		5881		7706		6534
		\		\		\		5152		5967		7444		6467
		\		\		\		5222		6012		7752		6343
		\		\		\		5344		7103		7418		6566
		\		\		\		5044		6086		7621		6329
		\		\		\		5125		6296		7498		6485
		\		\		\		5043		6074		7411		6436
		\		\		\		5083		6107		7693		6259
		\		\		\		5147		6041		7230		6218
	\		\		\		5240		6345		7441		6220	
Pe média (W) Bronze-Alumínio		\		\		\		5147		6173		7505		6389
Amostragem Pe ferramenta P20		\		2078		5657		6266		6995		8252		6832
		\		2128		5914		5983		6667		8097		6860
		\		2174		5651		5884		7017		8280		6659
		\		2220		5552		5900		6588		8064		7084
		\		2068		5569		5978		6901		8515		6696
	\		2226		5749		6138		6594		7952		6790	
Pe média (W) ferramenta P20		\		2149		5682		6025		6794		8193		6820
Amostragem Pe Inoxidável 304		\		2071		5185		5631		6244		7535		6520
		\		2099		5044		5492		6129		7630		6557
		\		2216		5095		5429		6567		7572		6563
		\		2099		5064		5516		6104		8012		6670
	\		2039		5170		5432		6180		7570		6826	
Pe média (W) Inoxidável 304		\		2105		5112		5500		6245		7664		6627

Cálculo dos Valores Médios das Potências Elétricas medidas para os diferentes avanços em vazio (Watts)															
Amostragem Pe Avanços em vazio		1304		1379		1606		2092		3058		4566		4784	
		1506		1729		1955		2592		3632		5453		6009	
		1311		1483		1648		2196		2977		4691		4788	
		1451		1514		1799		2095		3237		4547		4816	
		1425		1600		1693		2051		3117		4801		4729	
		1409		1419		1648		2094		2901		4502		4601	
		1356		1497		1769		2055		2829		4763		4663	
		1295		1350		1710		1984		2763		4279		4621	
		1390		1435		1627		1988		2753		3993		4370	
		1287		1391		1466		1958		2594		4045		4391	
		1200		1307		1562		1843		2742		3955		4187	
		1233		1442		1615		1944		2657		3983		4268	
		1258		1436		1505		1905		2654		4062		4142	
		1260		1381		1475		1937		2774		3811		4232	
		1280		1287		1475		1936		2685		3948		4147	
		1412		1354		1548		1898		2747		3905		4182	
		1337		1530		1572		1966		2937		3880		4259	
		1253		1353		1507		1963		2756		3888		4244	
		1361		1422		1584		2000		2661		3815		4196	
		1260		1327		1612		2106		2846		3993		4212	
		1292		1316		1478		2147		2761		3895		4244	
		1218		1425		1543		1902		2956		3857		4227	
		1324		1299		1528		1958		2732		3733		4171	
		1206		1325		1464		1829		2510		3803		4185	
		1261		1404		1472		1877		2682		3839		4211	
		1368		1385		1548		1916		2679		3576		4186	
		1286		1462		1505		2103		2867		3922		4222	
		1270		1553		1517		2000		2781		3916		3959	
		1247		1463		1488		2059		2673		4038		4100	
		1175		1317		1534		1944		2747		3918		4142	
	Pe média (W) Avanços em vazio		1308		1420		1582		2011		2824		4113		4383