

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

MARY LAURA DELGADO MONTES

**Mapeamento e Avaliação do Consumo de Energia na Fase de Uso
de uma Máquina-Ferramenta visando a Sustentabilidade**

São Carlos

2012

Mary Laura Delgado Montes

Mapeamento e Avaliação do Consumo de Energia na Fase de Uso de uma Máquina-Ferramenta visando a Sustentabilidade

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Área de Concentração:

Processos Avançados de Produção

Orientador:

Prof. Dr. Reginaldo Teixeira Coelho

São Carlos

2012

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Delgado Montes, Mary Laura
D235m Mapeamento e Avaliação do Consumo de Energia na Fase de Uso de uma Máquina-Ferramenta visando a Sustentabilidade. / Mary Laura Delgado Montes; orientador Reginaldo Teixeira Coelho. São Carlos, 2012.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Área de Concentração em Processos e Gestão de Operações -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2012.

1. Energia Elétrica. 2. Sistema Máquina-Ferramenta. 3. Potência. 4. Usinagem. 5. Sustentabilidade. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Bacharel **MARY LAURA DELGADO MONTES**.

Título da dissertação: "Mapeamento e avaliação do consumo de energia na fase de uso de uma máquina-ferramenta visando a sustentabilidade".

Data da defesa: 25/09/2012

Comissão Julgadora:

Resultado:

Profa. Dra. **Maíra Martins da Silva (Orientadora Substituta)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADA

Prof. Dr. **Dennis Brandão**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

aprovada

Prof. Dr. **André Luiz Morelato França**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

APROVADA

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção:
Prof. Titular **Henrique Rozenfeld**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

*A Deus, pela sua sabedoria
aos meus pais, Ingrid e José, pela exortação inesgotável
aos meus irmãozinhos, Edgardo e José, pelo carinho
lhes dedico este trabalho com muita gratidão.*

Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao professor Reginaldo Teixeira Coelho pela parceria, orientação e amizade, ao professor Luis Norberto de Lacalle e ao professor André Morelato França pela confiança.

Gostaria de agradecer também aos integrantes do Laboratório de Otimização de Processos de Fabricação – *OPF*, ao Ricardo Arai e o André Giuffrida pelo encorajamento, orientação e *feedback* sobre a minha dissertação. Ao Rodrigo Andrade pela grande amizade e força durante a primeira etapa do mestrado. Ao técnico Adolfo pela disposição durante todo o trabalho experimental. A todos os colegas pelo companheirismo. Aos professores e funcionários pela orientação no dia a dia no departamento. Também gostaria muito de agradecer ao Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica – LSEE por colaborar na realização da pesquisa, de forma especial ao Etienne Biasotto pela muita disposição.

Gostaria de agradecer ao abrigo *Helena Dornfeld*, à casa *Douglas*, aos meus queridos irmãozinhos da Aliança Bíblica Universitária do Brasil – ABUB e à Igreja Presbiteriana Central de São Carlos pelo amor, atenção e exortação, por me terem adotado como neta, filha e irmã, e fazerem um excelente papel como minha família no Brasil. Em especial à Maria Lúcia “Malu” Brito Dos Santos, à Maria Vitória Cabral, ao Oséias Tscherne e à Sueli Costa pela amizade, confiança, cuidado e carinho.

Gostaria de agradecer a todos os meus familiares e aos meus amigos no Peru pelo suporte e ânimo inesgotável, em especial à minha vovó Laura Venegas de Montes e à minha amiga Ofelia Cari. Agradecer a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, em que não só aprendi a mensurar o fluxo de energia em um sistema trifásico senão que pude ver os efeitos de outra energia que provêm da amizade. A meus amigos Andrea Pineda, David Kurka, Débora Lasso, Felipe Marra, Jemima Lasso, Lígia Moreira, Lucas Simone, Lucelindo Ferreira “Luke”, Luciano Santos, Marcelo Amâncio, Nicholas Ferreira e Taynan Ferreira. De forma especial gostaria de agradecer à Jemima e ao Taynan pelas contribuições na conformação do texto na língua portuguesa.

Finalmente, gostaria de agradecer à CAPES pelo financiamento e investimento na pesquisa.

La Energía **A Energia**

*¿Es acaso la actividad de un inmenso volcán?
Por acaso é a atividade de um inmenso vulcão?
Playas regadas por las olas que vienen y van,
Praias banhadas pelas ondas que vem e vão,
agua caliente de las termas de hogar,
água quente dos aquecedores de lar,
y noches de hermosa clara luz lunar...
e noites de formosa clara luz luar...
motivos suficientes para tenerles admiración
motivos suficientes para ter-lhes admiração
a las energías que este mundo nos da sin restricción.
às energias que este mundo nos dá sem restrição.*

*Para todo este complejo e inmenso sistema,
Para todo este complexo e inmenso sistema,
tenemos energía disponible en forma extrema.
temos energia disponível de forma extrema.
Simplemente, al tomar un baño de luz solar
Simplesmente, ao tomar banho de luz solar
es consumir energía que luego va a beneficiar:
é consumir energia que logo vai beneficiar:*

*Todas las vidas posibles del universo
Todas as vidas possíveis do universo
son como máquinas que con escaso esfuerzo,
são como máquinas que com escasso esforço,
pero cargadas de la divina energía,
porém, carregadas da divina energia,
consiguen mover este mundo en armonía.
conseguem mover este mundo em harmonia.*

*Todo lo que se pueda lograr con trabajo e dedicación
Tudo o que se possa alcançar com trabalho e dedicação
depende mucho del esfuerzo o la potencia en la aplicación.
depende muito do esforço ou a potência na aplicação.
Resultados más que satisfactorios... halagadores,
Resultados mais que satisfatórios... lisonjeiros,
por tener energía, fuerza e fe para ser ganadores.
por terem energia, força e fé para serem vencedores.*

*Todo tiene medida, todo tiene valor; todo tiene recompensa
Tudo tem medida, tudo tem valor; tudo tem recompensa
y así después de lograr algo, algo nuevo comienza,
e assim depois de alcançar algo, algo novo começa,
nuevas metas, nuevos logros, nuevos sueños,
novas metas, novas conquistas, novos sonhos,
porque cada uno de su destino es dueño,
porque cada pessoa de seu destino é dono,
aún así no bastarían miles de Joules como calificativo,
ainda assim não bastariam milhares de Joules como qualificativo,
si sublime misión no es efectuada con gusto significativo.
se sublime missão não é efetuada com gosto significativo.
La recompensa no llega en el resultado sino con el esfuerzo
A recompensa não chega com o resultado, mas sim com o esforço
cuando emprendamos algún proyecto de los muchos en el universo.
quando empreendemos algum projeto dos muitos no universo.*

José Domingo Delgado Lazo

Resumo

DELGADO M., M. L. **Mapeamento e Avaliação do Consumo de Energia na Fase de Uso de uma Máquina-Ferramenta visando a Sustentabilidade**. 2012. 199 págs. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

Como seguir com o crescimento da indústria, da economia e do consumo de energia de forma sustentável? No setor manufatureiro as máquinas-ferramentas são peças-chave nos processos de fabricação. Como saber se uma bomba, um motor ou outro elemento acessório é adequado para uma máquina-ferramenta específica? Normalmente, fabricantes se baseiam em sugestões dos fornecedores para selecionar tais elementos, o que resulta em um projeto ajustado pela experiência e por estimativas subjetivas, às vezes superestimando as dimensões do projeto por segurança. O objetivo deste trabalho é monitorar o consumo da energia elétrica durante a fase de uso da máquina-ferramenta, com o fim de explicar a demanda de energia em cada uma de suas tarefas, sugerindo diretrizes para o aperfeiçoamento do projeto desta nos seus componentes críticos. Esta dissertação apresenta uma cuidadosa revisão de livros e pesquisas anteriores, os quais direcionaram a etapa experimental. Assim, elegeu-se trabalhar em um centro de usinagem, o qual foi monitorado por um analisador de qualidade de energia. A metodologia experimental iniciou-se com a avaliação da eficiência energética da máquina-ferramenta em termos de fator de potência, a fim de trabalhar dentro dos parâmetros da legislação brasileira, e finalizou-se com o monitoramento do consumo de energia elétrica. Tal monitoramento foi feito em três cenários de usinagem: em vazio, a seco e com fluido, utilizando um mesmo plano de trabalho em todas as situações. Concluiu-se que prognósticos de consumo de energia são possíveis se tempos e constantes do modelo apresentado são conhecidos para uma máquina-ferramenta específica, parâmetros que são influenciados pela experiência do operador. A medição do consumo de energia da máquina em vazio e com remoção permitiram conhecer o consumo de energia pela usinagem propriamente dita. Observou-se também que apenas a máquina-ferramenta consome 59% da energia total quando está usinando; as mudanças de velocidade não afetam o consumo de energia diferentemente da taxa de remoção de material; elementos auxiliares à usinagem não deterioram a eficiência energética da máquina, embora possam representar uma boa taxa percentual de gasto no consumo total; e a troca de ferramentas é mais eficiente na usinagem do que em vazio.

Palavras-chave: Energia Elétrica, Sistema Máquina-Ferramenta, Potência, Usinagem, Sustentabilidade.

Abstract

DELGADO M., M. L. **Mapping and Evaluation of Energy Consumption during the Useable Phase of a Machine Tool Aiming at Sustainability.** São Carlos, 2012. 199 pg. Dissertation (Master Degree) - São Carlos School of Engineering, University of São Paulo.

How to follow the growth of industry, economy and energy consumption in a sustainable way? In the manufacturing sector, the machine tools are key-parts in the processes. How can we know if a pump, an electric motor or another accessory element is adequate to a specific machine tool? Usually, the manufacturer relies on suggestions from suppliers to select those elements, resulting in a project adjusted by experience and subjective estimations, sometimes overestimating for security. The objective of the present work is to monitor the consumption of electric power during the useable phase, in order to map the energy demand in each of its tasks, thus suggesting guidelines for the improvement of the project to its critical components. This dissertation presents a thorough review of books and previous research, which has guided the experimental phase. Accordingly, it was chosen to work in a machining center, which was monitored by a power quality analyzer. The experimental methodology began with the evaluation of the energetic efficiency of the machine tool in terms of power factor, in order to work within the parameters of the Brazilian legislation, and ended up with electric energy consumption monitoring. Such monitoring was made in three machining scenarios: cutting air, cutting dry and with coolant, using the same CNC workplan in all situations. The conclusions include that forecasting of energy consumption is possible if time and constants of the proposed model are known for a specific machine tool, parameters which are influenced by the experience gathered by the operator. The measurement of energy consumption during air cutting and removing material allowed to know the energy consumption of the machining operation itself. It was also observed that: the machine alone consumes 59% of the total energy when in operation; the energy consumption is not affected by speed changes, but by the material removal rate; auxiliary elements to the machining do not negatively affect the energy efficiency of the machine, although they may represent considerable expenditure in total consumption; and, the exchange of tools is more efficient when removing material, than when air machining.

Key words: Electrical Energy, Machine Tool System, Power, Machining, Sustainability.

Resumen

DELGADO M., M. L. **Mapeo y Evaluación del Consumo de Energía en la Fase de Uso de las Máquinas-Herramienta visando Sostenibilidad.** São Carlos, 2012. 199 p. Tesis de maestría – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

¿Cómo continuar con el crecimiento de la industria, de la economía y del consumo de energía de manera sostenible? En el sector manufacturero las máquinas-herramienta son piezas clave en los procesos de fabricación. ¿Cómo saber si una bomba, un motor u otro elemento accesorio son adecuados para una máquina-herramienta específica? Normalmente fabricantes se basan en sugerencias de los proveedores para seleccionar tales elementos, lo cual resulta en un proyecto ajustado por la experiencia e estimaciones subjetivas, a veces sobredimensionamiento el proyecto. El objetivo de este trabajo es monitorear el consumo de energía eléctrica durante la fase de uso de una máquina-herramienta, con ello explicar la demanda de energía en cada tarea, sugiriendo lineamientos para las mejoras del proyecto de ésta en sus componentes críticos. La presente tesis de maestría desenvuelve una cuidadosa exploración de libros e investigaciones anteriores, los cuales encaminaron la fase experimental. En ella, se optó por trabajar en un centro de mecanizado, el cual fue monitoreado por un analizador de calidad de energía. La metodología experimental se inició con el análisis de la eficiencia energética de la máquina-herramienta en términos de su factor de potencia, a fin de trabajar dentro de los parámetros de la legislación brasilera, y se concluyó el trabajo con la monitorización del consumo de energía eléctrica. Tal monitorización fue efectuada en tres escenarios de mecanizado: en vacío, a seco y con fluido, utilizando un mismo plano de trabajo en todas las situaciones. Las conclusiones obtenidas son las siguientes: Pronósticos de consumo de energía son posibles, si tiempos y constantes para el modelo de consumo de energía dado son conocidos para una máquina-herramienta específica, los cuales son influenciados por la experiencia del operador; la medición en vacío y con remoción permitió conocer el consumo de energía por el mecanizado; sólo la máquina-herramienta consume 59% de la energía total consumida cuando está mecanizando; las variaciones de velocidad no afectan al consumo de energía, pero sí la tasa de remoción de material; elementos auxiliares al mecanizado no deterioran la eficiencia energética de la máquina a pesar de representar una buena parte del gasto total de energía; y, el cambio de herramientas es más eficiente durante el mecanizado que durante el mecanizado en vacío.

Palabras clave: Energía Eléctrica, Sistema Máquina-Herramienta, Potencia, Mecanizado. Sostenibilidad.

Sumário

Dedicatória	vi
Agradecimentos	vii
Resumo	ix
Abstract.....	x
Resumen.....	xi
Lista de ilustrações	xvii
Lista de Tabelas	xx
Lista de siglas	xxi
Lista de símbolos	xxii
Introdução	- 1 -
Objetivos	- 5 -
Estrutura do trabalho	- 5 -
1. Revisão da Literatura.....	- 7 -
1.1. Conceitos iniciais	- 7 -
1.1.1. Evolução do conceito da sustentabilidade na fabricação	- 7 -
1.1.2. Sistemas e processos de fabricação	- 10 -
1.1.3. Consumo de energia na manufatura	- 11 -
1.2. Fundamentos de energia elétrica	- 13 -
1.2.1. Natureza da corrente elétrica	- 15 -
1.2.1.1. Geração da tensão e corrente alternadas	- 15 -
1.2.1.2. Características da tensão e a corrente senoidais	- 16 -
1.2.2. Potência em circuitos de corrente alternada	- 19 -
1.2.2.1. Potência ativa	- 22 -
1.2.2.2. Potência reativa	- 23 -
1.2.2.3. Potência aparente	- 24 -
1.2.2.4. Fator de potência	- 25 -
1.2.3. O sistema trifásico	- 26 -
1.2.3.1. Geração de tensão trifásica	- 26 -
1.2.3.2. Conexões em sistemas trifásicos equilibrados	- 28 -
1.2.3.3. Potência em cargas trifásicas equilibradas	- 28 -
1.2.3.4. Medida da potência trifásica	- 29 -

1.2.4.	Legislação para o consumo de energia elétrica no Brasil.....	- 31 -
1.3.	O processo de usinagem	- 32 -
1.3.1.	O fenômeno de formação de cavaco.....	- 33 -
1.3.2.	Consumo de energia no processo de usinagem.....	- 34 -
1.3.2.1.	Modelo básico de formação de cavaco	- 35 -
1.3.2.2.	Modelo da potência consumida e da temperatura no processo.....	- 37 -
1.3.2.3.	Modelos atuais	- 38 -
1.3.3.	Usinagem sustentável	- 39 -
1.4.	Tecnologia de usinagem	- 41 -
1.4.1.	Máquina-ferramenta.....	- 41 -
1.4.2.	Elementos da máquina-ferramenta	- 42 -
1.4.2.1.	A estrutura	- 43 -
1.4.2.2.	Guias e sistema de fixação de ferramentas	- 45 -
1.4.2.3.	Elementos de sujeição da peça de trabalho	- 45 -
1.4.2.4.	Eixo-árvore, mancais e rolamentos.....	- 45 -
1.4.2.5.	Mecanismos de acionamento da peça e das ferramentas	- 46 -
1.4.2.6.	Comandos de acionamentos e de controle	- 47 -
1.4.3.	Tipos de máquinas-ferramentas	- 49 -
1.4.3.1.	Centros de usinagem	- 50 -
1.4.4.	Fases do ciclo de vida da máquina-ferramenta	- 51 -
1.4.4.1.	Fase de aquisição de matéria-prima	- 52 -
1.4.4.2.	Fase de fabricação	- 53 -
1.4.4.3.	Fase de uso.....	- 54 -
1.4.4.4.	Fase de fim de vida.....	- 55 -
1.4.5.	Avaliação do ciclo de vida da máquina-ferramenta	- 55 -
1.5.	Aperfeiçoamento das máquinas-ferramentas.....	- 58 -
1.5.1.	Sistema da Máquina-Ferramenta (SMF).....	- 58 -
1.5.2.	Produtividade das máquinas-ferramentas	- 60 -
1.5.3.	Variáveis a considerar no aperfeiçoamento da máquina-ferramenta	- 62 -
1.5.4.	Aperfeiçoamento do SMF com enfoque no consumo de energia.....	- 63 -
1.6.	Limitações da pesquisa.....	- 65 -
2.	Proposta de Avaliação do Consumo de Energia Elétrica da Máquina-Ferramenta.....	- 66 -
2.1.	Método para calcular o consumo de energia da máquina-ferramenta	- 66 -
2.1.1.	Hipótese	- 67 -
2.1.2.	Tarefas básicas da máquina-ferramenta	- 67 -
2.1.3.	Formulação proposta do consumo de energia quando a máquina está ocupada .	- 71 -

2.2.	Modelo para estimar o consumo de energia do processo de usinagem	- 73 -
2.2.1.	Medição dinamométrica	- 73 -
2.2.2.	Medição “por diferença”	- 74 -
3.	Materiais e Métodos	- 78 -
3.1.	Materiais	- 78 -
3.1.1.	SMF da máquina-ferramenta em estudo	- 78 -
3.1.1.1.	Subsistema do eixo-árvore	- 80 -
3.1.1.2.	Subsistema de mesas de trabalho “X” e “Y”	- 81 -
3.1.1.3.	Subsistema do CNC	- 83 -
3.1.1.4.	Subsistema do trocador automático de ferramenta	- 83 -
3.1.1.5.	Subsistema de lubrificação	- 84 -
3.1.1.6.	Subsistema de refrigeração	- 85 -
3.1.1.7.	Subsistema pneumático	- 86 -
3.1.1.8.	Subsistema de remoção de cavacos	- 87 -
3.1.1.9.	Subsistema de exaustão	- 87 -
3.1.1.10.	Acessórios	- 88 -
3.1.2.	Equipamento de medição do consumo de energia	- 89 -
3.1.3.	Ferramentas de corte para a usinagem com a máquina-ferramenta	- 91 -
3.1.4.	Peça de trabalho	- 95 -
3.1.5.	Banco de ensaios	- 95 -
3.1.5.1.	Aquisição dos dados de energia elétrica	- 97 -
3.1.5.2.	Sistema de aquisição de dados	- 100 -
3.1.5.3.	Aquisição simultânea dos dados	- 102 -
3.2.	Métodos	- 103 -
3.2.1.	Grandezas registradas pelo analisador de qualidade de energia	- 103 -
3.2.2.	Planejamento experimental	- 104 -
3.2.3.	Metodologia para a execução dos experimentos	- 106 -
3.2.4.	Características esperadas dos experimentos	- 108 -
4.	Resultados e Discussões	- 113 -
4.1.	Análise dos dados coletados	- 114 -
4.1.1.	Consumo de energia elétrica	- 114 -
4.1.1.1.	Potência ativa	- 114 -
4.1.1.2.	Potência reativa	- 116 -
4.1.1.3.	Fator de potência	- 117 -
4.1.1.4.	Avaliação de P, Q e FP	- 118 -
4.1.2.	Tarefas e instruções executadas pela máquina-ferramenta	- 120 -

4.2.	Avaliação do consumo de energia durante o uso da máquina-ferramenta.....	- 121 -
4.2.1.	Consumo de energia durante o carregamento de ferramentas	- 123 -
4.2.1.1.	Análise da potência ativa no carregamento de ferramentas	- 125 -
4.2.1.2.	Análise da potência reativa no carregamento de ferramentas	- 126 -
4.2.1.3.	Análise do fator de potência no carregamento de ferramentas	- 127 -
4.2.2.	Consumo de energia durante a usinagem.....	- 128 -
4.2.2.1.	Análise da potência ativa na usinagem	- 128 -
4.2.2.2.	Análise da potência reativa na usinagem.....	- 134 -
4.2.2.3.	Análise do fator de potência na usinagem	- 139 -
4.2.3.	Consumo de energia durante esperas, programações e inspeções	- 141 -
4.2.3.1.	Espera	- 141 -
4.2.3.1.1.	Análise da potência ativa nas esperas	- 142 -
4.2.3.1.2.	Análise da potência reativa nas esperas.....	- 143 -
4.2.3.1.3.	Análise do fator de potência nas esperas	- 144 -
4.2.3.2.	Programação	- 144 -
4.2.3.2.1.	Análise da potência ativa nas programações	- 146 -
4.2.3.2.2.	Análise da potência reativa nas programações.....	- 146 -
4.2.3.2.3.	Análise do fator de potência nas programações	- 147 -
4.2.3.3.	Inspeções.....	- 147 -
4.2.3.3.1.	Análise da potência ativa nas inspeções.....	- 148 -
4.2.3.3.2.	Análise da potência reativa nas inspeções	- 149 -
4.2.3.3.3.	Análise do fator de potência nas inspeções	- 150 -
4.3.	Avaliação do modelo proposto	- 151 -
4.3.1.	Consumo básico de energia da máquina-ferramenta (E_0).....	- 151 -
4.3.2.	Consumo de energia pelo carregamento de ferramentas (E_2).....	- 152 -
4.3.3.	Consumo de energia pela usinagem (E_3).....	- 154 -
4.3.3.1.	Análise do consumo mínimo de energia pela máquina-ferramenta durante a usinagem.....	- 156 -
4.3.3.2.	Análise do impacto do consumo de energia dos elementos auxiliares na usinagem com fluido	- 162 -
4.3.4.	Consumo pela troca de ferramentas (E_4).....	- 165 -
5.	Conclusões	- 168 -
	Referências	- 171 -
	Apêndice(s)	- 177 -
	APÊNDICE A – Base de dados MTConnect	- 177 -
	APÊNDICE C – Análise da estrutura metalográfica da peça.....	- 191 -

APÊNDICE D – Estudo de dureza	- 195 -
Anexo(s).....	- 198 -
ANEXO A – Mecanismos de acionamento da D800.....	- 198 -
ANEXO B – Energia específica de corte e o fator de remoção de material.....	- 199 -

Lista de ilustrações

Figura 1: Fases do ciclo de vida e limites do sistema de um produto	- 3 -
Figura 2: Fases da ACV	- 4 -
Figura 3: Demanda de energia incremental por setor e região no cenário de Novas Políticas, 2008-2035	- 11 -
Figura 4: Consumo de energia por setores no Brasil, 2001-2011	- 12 -
Figura 5: Dois ciclos de tensão alternada gerados pela rotação de uma espira em um gerador de dois polos	- 15 -
Figura 6: Corrente alternada	- 16 -
Figura 7: Tipos de ondas periódicas	- 16 -
Figura 8: Valores de amplitude para uma onda senoidal de CA.....	- 17 -
Figura 9: Um fasor, ou vetor, em sentido anti-horário, a velocidade angular constante ω (rad/s) ...	- 18 -
Figura 10: Ângulo de fase	- 18 -
Figura 11: Potência média	- 20 -
Figura 12: Diagrama temporal da potência	- 21 -
Figura 13: Relação entre as potências	- 24 -
Figura 14: Tensão alternada trifásica	- 27 -
Figura 15: Conexões para fontes de alimentação CA 3- ϕ	- 28 -
Figura 16: Conexão de um wattímetro e medida da potência com três wattímetros.....	- 30 -
Figura 17: Medida da potência trifásica	- 31 -
Figura 18: Fenômeno de remoção de material	- 33 -
Figura 19: Entradas e saídas nos modelos de usinagem.....	- 35 -
Figura 20: Modelo de formação de cavaco	- 36 -
Figura 21: Zonas de cisalhamento no processo de usinagem	- 38 -
Figura 22: Elementos básicos da usinagem sustentável.....	- 39 -
Figura 23: Aspectos gerais da tecnologia da usinagem.....	- 41 -
Figura 24: Acionamento na máquina-ferramenta	- 46 -
Figura 25: Fases do Ciclo de Vida da Máquina-Ferramenta	- 51 -
Figura 26: Avaliação do Ciclo de Vida.....	- 56 -
Figura 27: Mapeamento Estrutural-Funcional do SMF	- 59 -
Figura 28: Formas de avaliação da máquina-ferramenta	- 60 -
Figura 29: Influência do tempo.....	- 61 -
Figura 30: Variáveis que afetam à precisão do processo de usinagem	- 62 -
Figura 31: Temperatura do Eixo-árvore durante 3.5 horas de trabalho	- 64 -
Figura 32: Diagrama do fluxo de trabalho da máquina-ferramenta	- 68 -

Figura 33: Troca de ferramenta	- 69 -
Figura 34: Sistema de medição de forças de usinagem.....	- 74 -
Figura 35: Cenários de usinagem e subsistemas.....	- 75 -
Figura 36: Balanço energético simples de um motor elétrico	- 76 -
Figura 37: Estrutura do Centro de Usinagem, modelo D 800	- 79 -
Figura 38: Conjunto do Cabeçote	- 80 -
Figura 39: Eixo "Z"	- 81 -
Figura 40: Eixo "X"	- 82 -
Figura 41: Eixo "Y"	- 82 -
Figura 42: CNC GE Fanuc 0i-MC aplicado na Romi D800	- 83 -
Figura 43: Trocador de Ferramenta	- 84 -
Figura 44: Composição do Sistema de Lubrificação	- 85 -
Figura 45: Subsistema de Refrigeração	- 85 -
Figura 46: Controle do Sistema Pneumático	- 86 -
Figura 47: Transportador de cavaco	- 87 -
Figura 48: Exaustor de Névoa	- 87 -
Figura 49: Porta Automática	- 88 -
Figura 50: Analisador de Qualidade da energia trifásico	- 89 -
Figura 51: Peça do ensaio	- 95 -
Figura 52: Aquisição simultânea de dados.....	- 96 -
Figura 53: Esquema da coleta dos dados	- 96 -
Figura 54: Sistema trifásico de três fios (sem condutor neutro)	- 98 -
Figura 55: Arquitetura para a implementação do padrão MTConnect®.....	- 100 -
Figura 56: Algoritmo para aplicativo de armazenamento de dados.....	- 101 -
Figura 57: Tempo estimado distribuído no uso da máquina-ferramenta nos experimentos.....	- 112 -
Figura 58: Curva de carga dos experimentos	- 113 -
Figura 59: Leitura da potência ativa	- 115 -
Figura 60: Leitura da potência reativa	- 116 -
Figura 61: Leitura do fator de potência.....	- 117 -
Figura 62: Potência total consumida no carregamento	- 123 -
Figura 63: Potência ativa positiva e negativa do carregamento de ferramentas	- 125 -
Figura 64: Potência reativa no carregamento de ferramentas.....	- 126 -
Figura 65: FP capacitivo de importação na tarefa de carregamento de ferramentas	- 127 -
Figura 66: Consumo de potência durante a usinagem	- 133 -
Figura 67: Potência reativa positiva e negativa durante a usinagem	- 138 -
Figura 68: FP capacitivo da usinagem.....	- 140 -
Figura 69: Potência total consumida nas esperas	- 142 -

Figura 70: Potência ativa positiva e negativa do tempo de esperas	- 142 -
Figura 71: Potência reativa no tempo de esperas	- 143 -
Figura 72: Potência total consumida nas programações	- 145 -
Figura 73: Potência ativa positiva e negativa nas programações	- 146 -
Figura 74: Potência reativa nas programações	- 146 -
Figura 75: Potência total consumida nas inspeções	- 148 -
Figura 76: Potência ativa positiva e negativa nas inspeções	- 148 -
Figura 77: Potência reativa nas inspeções	- 149 -
Figura 78: Consumo de E_0 experimental VS do modelo.....	- 152 -
Figura 79: Consumo de E_2 no modelo VS experimental.....	- 153 -
Figura 80: Potência das operações em cada cenário	- 155 -
Figura 81: Consumo de energia da máquina-ferramenta durante a usinagem e a usinagem em vazio	- 157 -
Figura 82: Potência VS velocidade do <i>spindle</i> em cada cenário	- 158 -
Figura 83: Avaliação de E_3	- 159 -
Figura 84: Consumo de energia das operações em cada cenário	- 161 -
Figura 85: Consumo de energia dos subsistemas auxiliares à usinagem com fluido.....	- 162 -
Figura 86: Energia consumida pela máquina-ferramenta e a usinagem.....	- 164 -
Figura 87: Potência da troca de ferramentas na usinagem em dois cenários.....	- 165 -
Figura 88: Comparação do consumo de energia durante a troca de ferramentas entre cenários	- 166 -
Figura 89: Esquema de um espectrômetro LIBS	- 187 -
Figura 90: Zona do plasma na amostra	- 188 -
Figura 91: Corpo de prova não embutido.....	- 191 -
Figure 93: Lixamento semiautomático.....	- 192 -
Figura 93: Fotos metalográficas	- 194 -
Figura 94: Penetrador esférico.....	- 195 -
Figura 95: Profundidade produzida por um penetrador cônico de diamante.....	- 195 -
Figura 96: Penetrador e peça	- 196 -
Figura 97: Durômetro.....	- 196 -
Figura 98: Medição da dureza	- 197 -

Lista de Tabelas

Tabela 1: Exemplo da otimização de uma fresadora	- 57 -
Tabela 2: Valores básicos calculados pelo analisador de qualidade de energia elétrica	- 90 -
Tabela 3: Parâmetros adicionais de energia elétrica	- 91 -
Tabela 4: Ferramentas do ensaio	- 92 -
Tabela 5: Parâmetros de entrada no analisador de qualidade de energia trifásico.....	- 99 -
Tabela 6: Grandezas mensuradas.....	- 103 -
Tabela 7: Valores máximos e mínimos por totais.....	- 103 -
Tabela 8: Matrizes de experimentos	- 105 -
Tabela 9: Tempos aproximados para a execução de tarefas.....	- 108 -
Tabela 10: Atividades no plano de trabalho da máquina	- 111 -
Tabela 11: Máximos, mínimos e totais trifásicos da coleta de dados no plano de trabalho	- 118 -
Tabela 12: Informações coletadas da máquina-ferramenta via MTConnect.....	- 120 -
Tabela 13: Subsistemas ativos por tarefa	- 122 -
Tabela 14: Consumo total de potências reativas no carregamento de ferramentas	- 126 -
Tabela 15: Resultados experimentais do consumo de energia na usinagem	- 129 -
Tabela 16: Consumo total de potências reativas na usinagem	- 134 -
Tabela 17: Mecanismos de acionamento responsáveis pelas potências reativas na usinagem.....	- 135 -
Tabela 18: FP médio em cada cenário de usinagem	- 139 -
Tabela 19: Consumo total de potências reativas nas esperas	- 143 -
Tabela 20: FP médio nas esperas.....	- 144 -
Tabela 21: Consumo total de potências reativas nas programações	- 147 -
Tabela 22: FP médio nas programações.....	- 147 -
Tabela 23: Consumo total de potências reativas nas inspeções	- 149 -
Tabela 24: FP médio nas inspeções	- 150 -
Tabela 25: Análise estatística da P_2	- 153 -
Tabela 26: Valores experimentais e teóricos correspondentes à usinagem.....	- 160 -
Tabela 27: Consumo de energia por operação a seco e com fluido.....	- 164 -
Tabela 28: Tempo, potência e consumo de energia da TAF	- 167 -
Tabela 29: Comandos e instruções executados pela máquina-ferramenta	- 177 -
Tabela 30: Conformidades segundo a norma ABNT/SAE/AISI 1045	- 189 -
Tabela 31: Influência dos elementos de liga no aço	- 190 -
Tableau 32: Fotos metalográfica	- 193 -
Tabela 33: Conversão de durezas	- 197 -
Tabela 34: Principais mecanismos de acionamento e elementos de consumo de energia elétrica .	- 198 -
Tabela 35: Valor específico de potência para metais durante a remoção de material	- 199 -

Lista de siglas

<i>ACV</i>	<i>Análise do Ciclo de Vida</i>
<i>ANEEL</i>	<i>Agência Nacional de Energia Elétrica</i>
<i>CNC</i>	<i>Comando Numérico Computadorizado</i>
<i>CC</i>	<i>Corrente Continua</i>
<i>CA</i>	<i>Corrente Alternada</i>
<i>CF</i>	<i>Com fluido</i>
<i>D.C.</i>	<i>Depois de Cristo</i>
<i>DNC</i>	<i>Direct Numerical Control</i>
<i>EUA</i>	<i>Estados Unidos de América</i>
<i>EIA</i>	<i>U.S. Energy Information Administration</i>
<i>EPE</i>	<i>Empresa de Pesquisa Energética</i>
<i>EESC</i>	<i>Escola de Engenharia de São Carlos</i>
<i>f.e.m.</i>	<i>Força electro motriz</i>
<i>FEM</i>	<i>Finite Element Method</i>
<i>GMT</i>	<i>Hora Média de Greenwich</i>
<i>HTTP</i>	<i>Hypertext Transfer Protocol</i>
<i>ISO</i>	<i>International Organization for Standardization</i>
<i>LSEE</i>	<i>Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica</i>
<i>OECD</i>	<i>Organization for Economic Co-operation and Development</i>
<i>OPF</i>	<i>Laboratório de Otimização de Processos de Fabricação</i>
<i>PC</i>	<i>Personal Computer</i>
<i>PIB</i>	<i>Produto Interno Bruto</i>
<i>rms</i>	<i>root-mean-square</i>
<i>SF</i>	<i>Sem fluido</i>
<i>SMF</i>	<i>Sistema Máquina-Ferramenta</i>
<i>TAF</i>	<i>Trocador automático de ferramenta</i>
<i>VCC</i>	<i>Voltagem de corrente contínua</i>
<i>USP</i>	<i>Universidade de São Paulo</i>
<i>XML</i>	<i>Extensible Markup Language</i>

Lista de símbolos

$1-\phi$	<i>Sistema monofásico</i>
$3-\phi$	<i>Sistema trifásico</i>
φ	<i>Ângulo de fase corrente-tensão</i>
v	<i>Velocidade de corte, [mm/min]</i>
\dot{v}	<i>Taxa de processamento de material, [mm³/s].</i>
v_c	<i>Velocidade de cavaco, [mm/min]</i>
v_f	<i>Velocidade de avanço, [mm/min]</i>
v_s	<i>Velocidade de cisalhamento, [mm/min]</i>
v	<i>Tensão alternada, [V]</i>
ω	<i>Velocidade angular constante, [rad/s]</i>
C_2H_4	<i>Eteno</i>
CEA	<i>Consumo de energia ativa, [Wh]</i>
CO_{2eq}	<i>Dióxido de Carbono equivalente</i>
E	<i>Energia consumida pela máquina-ferramenta durante sua operação, [Wh]</i>
E_0	<i>Energia básica consumida pela máquina-ferramenta, [Wh]</i>
E_1	<i>Energia consumida pela máquina-ferramenta durante seu preparo, [Wh]</i>
E_2	<i>Energia consumida pela máquina-ferramenta durante o carregamento de ferramentas, [Wh]</i>
E_3	<i>Energia consumida pela máquina-ferramenta durante a usinagem, [Wh]</i>
E_4	<i>Energia consumida pela máquina-ferramenta durante a troca de ferramenta, [Wh]</i>
F_γ	<i>Força de atrito, [N]</i>
F_c	<i>Força tangencial ou de corte, [N]</i>
F_c	<i>Força de cisalhamento, [N]</i>
FER	<i>Valor de faturamento total, [\$R, moeda]</i>
F_f	<i>Força de avanço, [N]</i>
F_{nc}	<i>Força normal ao plano de cisalhamento, [N]</i>
F_{ny}	<i>Força passiva, [N]</i>
FP	<i>Fator de potência</i>
FPm	<i>Fator de potência indutivo médio</i>
FP_r	<i>Fator de potência de referencia</i>

FP_t	<i>Fator de potência total</i>
FP_{tc+}	<i>Fator de potência capacitivo total de importação</i>
FP_{tc-}	<i>Fator de potência capacitivo total de exportação</i>
FP_{ti+}	<i>Fator de potência indutivo total de importação</i>
FP_{ti-}	<i>Fator de potência indutivo total de exportação</i>
FP_x	<i>Fator de Potência da fase</i>
F_t	<i>Força específica de corte, [N]</i>
F_u	<i>Força de usinagem, [N]</i>
h	<i>Rendimento</i>
i	<i>Corrente elétrica, [A]</i>
I	<i>Corrente contínua, [A]</i>
I	<i>Corrente alternada, [A]</i>
\hat{I}	<i>Fasor de corrente</i>
I_0	<i>Corrente do condutor neutro, [A]</i>
I_{ef}	<i>Corrente eficaz ou de fase, [A]</i>
I_L	<i>Corrente de linha, [A]</i>
I_x	<i>Corrente de fase, [A]</i>
k	<i>Valor específico de potência para metais durante a remoção de material, [Ws/mm³]</i>
L	<i>Comprimento total da peça, [mm]</i>
NO_3^-eq	<i>Nitrato equivalente</i>
p	<i>Potência, [J/s, W]</i>
P	<i>Potência ativa trifásica, média, real ou de valor r.m.s. [W]</i>
P_+	<i>Potência ativa de importação, [W]</i>
P_-	<i>Potência ativa de exportação, [W]</i>
P_0	<i>Potência básica da máquina-ferramenta [W]</i>
P_1	<i>Potência pelo preparo da máquina-ferramenta, [W]</i>
P_2	<i>Potência pelo carregamento das ferramentas, [W]</i>
P_3	<i>Potência dos elementos auxiliares da usinagem, [W]</i>
P_4	<i>Potência do trocador de ferramentas, [W]</i>
P_γ	<i>Potência de atrito, [W]</i>
P_c	<i>Potência de cisalhamento, [W]</i>
P_e	<i>Potência de entrada, [W]</i>

$P_{m\acute{e}dia}$	<i>Pot\^encia m\^edia, [W]</i>
P_s	<i>Pot\^encia de sa\^ıda, [W]</i>
P_t	<i>Pot\^encia ativa total, [W]</i>
P_x	<i>Pot\^encia ativa de fase, [W]</i>
q	<i>Carga, [C]</i>
Q	<i>Pot\^encia reativa trif\^asica ou de quadratura, [VAr]</i>
Q_t	<i>Pot\^encia reativa total, [VAr]</i>
Q_{tc+}	<i>Pot\^encia reativa capacitiva total de importa\~ao, [VAr]</i>
Q_{tc-}	<i>Pot\^encia reativa capacitiva total de exporta\~ao, [VAr]</i>
Q_{ti+}	<i>Pot\^encia reativa indutiva total de importa\~ao, [VAr]</i>
Q_{ti-}	<i>Pot\^encia reativa indutiva total de exporta\~ao, [VAr]</i>
Q_x	<i>Pot\^encia reativa de fase, [VAr]</i>
R	<i>Resistor ou resist\^encia el\^etrica, [Ω]</i>
S	<i>Pot\^encia aparente trif\^asica ou complexa, [VA]</i>
SO_{2eq}	<i>Di\^oxido de enxofre equivalente</i>
S_t	<i>Pot\^encia aparente total, [VA]</i>
S_x	<i>Pot\^encia aparente de fase, [VA]</i>
t	<i>Tempo, [s]</i>
T	<i>Tempo, [s]</i>
t_1	<i>Tempo em que a m\^aquina-ferramenta est\^a em estado de espera, [s]</i>
t_2	<i>Tempo do carregamento das ferramentas, [s]</i>
t_3	<i>Tempo de usinagem ou corte, [s]</i>
t_4	<i>Tempo de troca de ferramentas, [s]</i>
T_c	<i>Tempo de corte, [min]</i>
TCA	<i>Tarifa de energia ativa, [\$R, moeda]</i>
U, V	<i>Tens\~ao alternada, [V]</i>
U_x	<i>Tens\~ao da fase, [V]</i>
U_{xy}	<i>Tens\~ao fase a fase, [V]</i>
\hat{V}	<i>Fasor de tens\~ao</i>
V_{ef}	<i>Tens\~ao eficaz ou de fase, [V]</i>
V_L	<i>Tens\~ao de linha, [V]</i>
V_M	<i>Tens\~ao m\^axima ou de pico, [V]</i>
w	<i>Trabalho, [J]</i>

Introdução

Constata-se que ao longo do tempo várias formas de energia têm provido nossas necessidades, formas essas que variam conforme as técnicas que o homem utiliza. Na pré-história, o homem nômade consumia 5 000 kcal/dia em atividades básicas como alimentação, iluminação noturna e aquecimento. O homem apropriou-se do uso do fogo e desenvolveu a agricultura e a pecuária, armazenando energia excedente dos animais e alimentos. Ao final da idade média (1400 D.C.), com o desenvolvimento das ciências, surgiram o domínio e a transformação das diversas formas de energia disponíveis na natureza. A fonte de energia mais utilizada para a navegação, em moinhos, nas indústrias têxtil, madeireira e metalúrgica, na fabricação de papel, na extração de azeites, entre outros, era o vento. Além disso, nessa mesma época iniciou-se o uso de artefatos mecânicos para multiplicar a força e alguns séculos depois, em 1698, foi inventada a primeira máquina a vapor. Com a urbanização e a consequente ocupação de vastas florestas europeias, o consumo de energia elevou-se para 26 000 kcal/dia. Na era industrial, por volta de 1 875, o uso intensivo do carvão permitiu atingir o nível médio de 77 000 kcal/dia. Esses números representam um crescimento de pouco mais de 15 vezes nos últimos 12 milênios, um aumento exponencial com o tempo desde o início da atuação do homem na natureza. (HÉMERY, BEBIER e DELÉAGE 2007, FARIAS e SELLITTO ; 2011)

Algumas conclusões do relatório de 2009 do Departamento de Energia dos Estados Unidos revelam que 30% da energia consumida nesse país deve-se às atividades industriais^a. Entre essas atividades, somente a fabricação de maquinarias e produtos metálicos consome

^a A *North American Industry Classification* (NAICS) agrupa as atividades industriais em: Alimentos, bebida e tabaco, fábricas e produtos têxteis, vestuário, couro, produtos de madeira, papel, produtos químicos, plásticos e derivados do petróleo, produtos minerais não metálicos, metais primários, produtos metálicos, máquinas, produtos eletrônicos, produtos elétricos, equipamentos de transporte e diversos.

176 000 GWh^b (EIA 2009), comparável a 5,3 vezes o consumo de eletricidade residencial do estado de São Paulo (EPE 2012).

Entre os processos de fabricação no tocante à ação física sobre a matéria-prima, o processo de remoção de material tem um papel importante (DIAZ, CHOI, et al. 2010) e no que se refere a ele, aperfeiçoar as máquinas-ferramentas é a primeira preocupação dos fabricantes.

Devido ao fato de que as máquinas-ferramentas são equipamentos criados para a produção de máquinas, instrumentos, ferramentas e todos os tipos de peças de reposição (YOUSSEF e EL-HOFY 2008, 59), sua complexidade começa nos elementos que a compõem. Tipicamente consistem de uma estrutura base, componentes e mecanismos de acionamento. A base proporciona rigidez e suporta os vários componentes, tais como: mecanismos cinéticos e atuadores para o movimento das ferramentas e das mesas (eixos), múltiplos sensores para a retroalimentação das informações, os sistemas de refrigeração e de iluminação e o Comando Numérico Computadorizado – CNC (SHIN 2004). Os mecanismos de acionamento da máquina-ferramenta vêm a ser os motores, mecanismos de avanço e bombas (WITTE 1998, 53-154), os quais são alimentados principalmente por energia elétrica e mecânica.

Com o intuito de aperfeiçoar a máquina-ferramenta, diferentes abordagens têm sido exploradas, como a inovação na automação, no monitoramento e no controle, através de sensores e novas tecnologias. Especificamente, a manufatura verde, o *eco-design* e o ciclo de vida são as abordagens propostas no projeto e na fabricação das máquinas-ferramentas (DAHMUS 2007, VIJAYARAGHAVAN e DORNFELD 2010, ROMANIW 2010, I. AVRAM 2010).

A manufatura verde (*Green Manufacturing*), uma estratégia de gestão que envolve todos os âmbitos da empresa (LI, LIU e WANG 2010), coloca ênfase em criar produtos que usem menos materiais e menos energia (ALLWOOD 2004). Assim, projetistas dos mais variados tipos de máquinas-ferramentas têm procurado aperfeiçoar os componentes que demandam significativa quantidade de energia durante a usinagem, tais como o comando numérico, o painel, os servomecanismos, a iluminação, o *spindle*, os motores de avanço das mesas, as bombas de refrigeração e o processo de corte (JARVIS 2009).

Já o *eco-design* ou *Design for Environment* permite focar os impactos ambientais associados ao produto na sua fase de projeto. Isso implica considerar a variável ambiental entre

^b Do original 600x10¹² BTU para 2009

os requerimentos convencionais do produto, sem perder sua funcionalidade, combinando-a com o preço e qualidade de modo sensato. Além disso, a influência do *eco-design* em fases futuras é mais dificultosa devido ao fato de que o ciclo de vida do produto é decidido durante a fase do projeto e planejamento de produção. (SONNEMANN, SCHUHMACHER e CASTELLS 2003)

Por outro lado, a ideia do ciclo de vida é uma maneira de abordar os problemas ambientais a partir de uma perspectiva holística do produto. O ciclo de vida de um produto envolve quatro fases básicas, como apresentadas na Figura 1, e em alguns casos o transporte e distribuição configura a quinta fase. Entretanto, a metodologia de avaliação sistemática dos impactos ambientais durante as fases do ciclo de vida surge apenas em 1990. Essa metodologia, chamada de Avaliação do Ciclo de Vida – ACV, começou ser desenvolvida pela *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* e pela *International Organization for Standardization* – ISO (SONNEMANN, SCHUHMACHER e CASTELLS 2003, KRONENBERG 2007, CURRAN 1996).

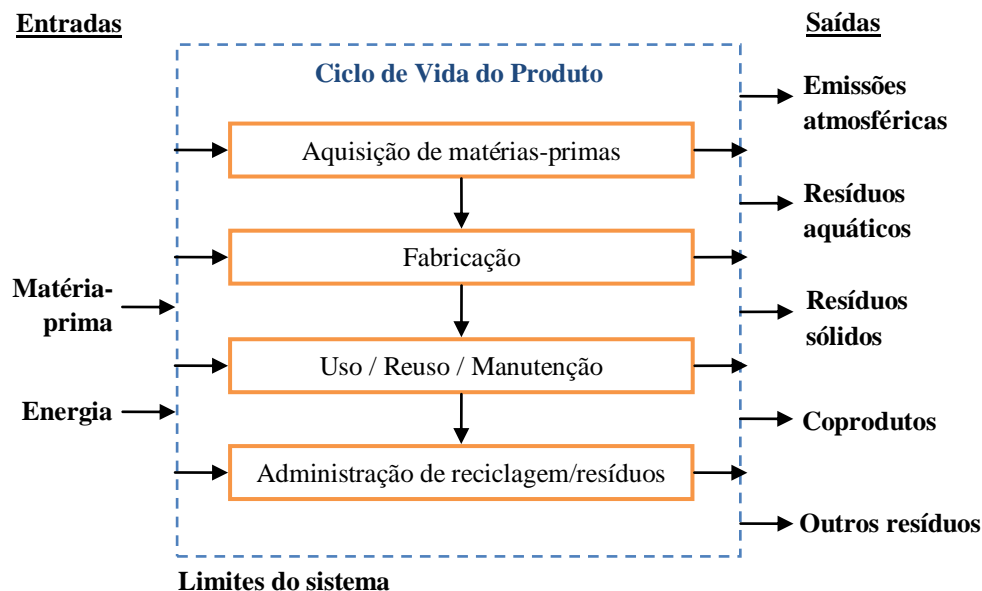


Figura 1: Fases do ciclo de vida e limites do sistema de um produto

Fonte – EPA, 1993 apud CURRAN, 1996, p. 2

A ISO descreve a ACV segundo o esquema da Figura 1, como uma “compilação e avaliação das entradas, saídas e potenciais impactos ambientais de um sistema de produto atra-

vés de seu ciclo de vida” (ISO 2006, Cláusula 3.2), e Curran, M. (1996) agrega que esses impactos ambientais incluem aqueles associados às matérias-primas desde sua extração até o ponto em que os materiais retornam à natureza.

A metodologia ACV, representada na Figura 2, começa com a definição do objetivo e do escopo, isto é, a delimitação das fases do ciclo de vida do produto a pesquisar. Para isso é necessário definir uma unidade mensurável mediante a qual serão avaliados os impactos ambientais. A análise do inventário reúne e quantifica as entradas (recursos e energia) e saídas (emissões e resíduos) do sistema, ao passo que, a avaliação classifica e caracteriza os impactos identificados em categorias. Toda essa avaliação é descrita e interpretada em um relatório segundo os parâmetros da ISO 14040/44 (KRONENBERG 2007, 133-139).

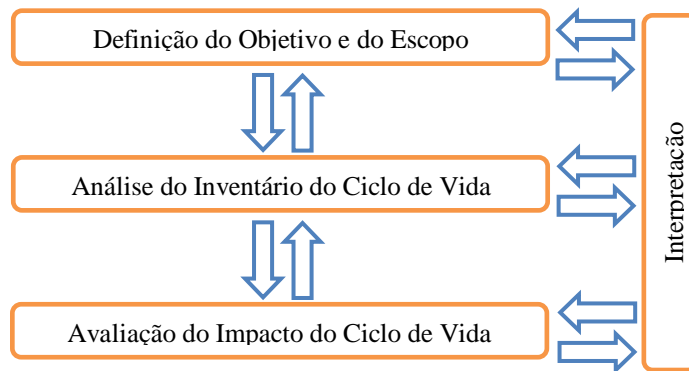


Figura 2: Fases da ACV

Fonte – ISO 14040/44

De forma concreta, através da ACV sabe-se que o maior impacto das máquinas-ferramentas acontece na fase de uso (AVRAM, STROUD e XIROUCHAKIS 2010, p 699 Apud, DAHMUS e GUTOWSKI 2004), sendo que o consumo e uso de recursos nessa mesma fase pode ser direcionada pela manufatura verde. Parece lógico alegar que as melhorias no sistema da máquina-ferramenta dependem do seu uso. Porém, quando o sistema é realmente complexo, fatores importantes durante o uso, como o consumo de recursos, entre eles a energia elétrica, passam despercebidos durante o projeto da máquina-ferramenta.

Em relação ao ciclo de vida, a pesquisa se limita à fase de uso da máquina-ferramenta, e sob a perspectiva da sustentabilidade, o fator abordado é o consumo de energia elétrica. No enfoque sistêmico, o comportamento do consumo de energia para cada subsistema e/ou componentes críticos da máquina-ferramenta permitirá formular e avaliar a sua efetividade, informações essas que conduzirão ao aperfeiçoamento do projeto desses equipamentos. Tendo

ciência da grande variedade de máquinas-ferramentas para a usinagem, a pesquisa desenvolveu-se com a máquina mais comum no chão de fábrica, o centro de usinagem.

Objetivos

O objetivo deste trabalho é monitorar o consumo da energia elétrica durante a fase de uso da máquina-ferramenta, com o intuito de mapear a demanda de energia em cada uma de suas tarefas e/ou subsistemas. As conclusões deste trabalho podem assim ser tomadas como diretrizes para o aperfeiçoamento do projeto da máquina-ferramenta, entre outras aplicações.

Objetivos Específicos:

- 1°. Estudar o centro de usinagem como sistema.
- 2°. Identificar as variáveis determinantes do consumo de energia elétrica.
- 3°. Propor uma metodologia que permita estimar o consumo de energia em máquinas-ferramentas durante a execução de uma peça em condições normais de trabalho.
- 4°. Testar a proposta e identificar limitações.

Estrutura do trabalho

Este documento está dividido e organizado em cinco capítulos.

No Capítulo 1, um levantamento bibliográfico é detalhado no que se refere à sustentabilidade, à fabricação, aos conceitos e à mensuração da energia elétrica, ao processo de usinagem, à máquina-ferramenta. Há também um resumo do que outros pesquisadores têm realizado no aperfeiçoamento da máquina-ferramenta sob enfoques que hoje são integrados na sustentabilidade. Todas as informações desse capítulo concluem-se com a definição das limitações (escopo) da pesquisa.

No Capítulo 2, apresenta-se uma proposta para a avaliação do consumo de energia elétrica da máquina-ferramenta, em que se explanam um método para calcular o dito consumo e um modelo para estimá-lo no processo de usinagem.

No Capítulo 3, são descritos os materiais e equipamentos: a máquina-ferramenta em estudo, o equipamento de medição e a peça de trabalho; bem como a aquisição de dados. Além disso, são descritos os métodos para efetuar o trabalho: as grandezas registradas, o planejamento experimental e a execução do experimento, envolvendo as suas características e condições de trabalho.

No Capítulo 4, são mostrados os resultados e a discussão, iniciando-se com a análise do banco de ensaios e a avaliação do consumo de energia em cada tarefa efetuada pela máquina-ferramenta. De forma específica, é avaliado o consumo de energia por causa da usinagem em si mesma.

No Capítulo 5, são apresentadas as conclusões, assim como os trabalhos e recomendações propostos para pesquisas futuras que de alguma forma foram previamente apresentadas no capítulo 4.

Finalmente, é apresentada a bibliografia utilizada, apêndice e anexos.

1. Revisão da Literatura

1.1. Conceitos iniciais

1.1.1. Evolução do conceito da sustentabilidade na fabricação

Em termos gerais, a sustentabilidade tem um conceito abrangente que, no início quando se tentou definir o desenvolvimento sustentável, era entendido como “um desenvolvimento que satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras satisfazerem as suas próprias necessidades” (BRUNTLAND 1987).

Assim, o conceito de sustentabilidade está apoiado em três pilares: o aspecto social, o aspecto ambiental e o aspecto econômico. Este conceito é conhecido como *triple bottom line*, aceito e formalizado desde 1992, no Rio de Janeiro (United Nations 1992). Empresas, instituições e nações vêm trabalhando para alcançar a sustentabilidade. Principalmente essas últimas têm desenvolvido uma grande quantidade de indicadores que, em conjunto, podem revelar o nível de desenvolvimento sustentável daquela sociedade – consequentemente, a qualidade de vida de sua população – e permitem a comparação com outras nações, com a finalidade de aplicar políticas que possam melhorar o nível de desenvolvimento sustentável das mesmas. Por exemplos indicadores como os Princípios de Bellagio^a (Canadá), *Calvert-Henderson Quality of Life Indicators*^b (EUA.), *Dashboard of Sustainability*^c (vários países), etc. (LOUETTE 2007)

Como trazer a sustentabilidade e seus indicadores para o chão de fábrica? Ou para as máquinas-ferramentas? A literatura mostra uma grande preocupação por parte dos pesquisadores em desenvolver manufatura sustentável. Uma consideração a se fazer a respeito do con-

^a Os princípios de Bellagio foram criados tanto para iniciar processos de avaliação do desenvolvimento sustentável quanto para avaliar processos já existentes de qualquer instituição. São em número de dez e abrangem todas as etapas do processo de desenvolvimento de indicadores para mensuração da sustentabilidade.

^b É um índice de mensuração da qualidade de vida dos EUA, que considera tendências e resultados econômicos, ambientais e sociais por meio de uma abordagem sistêmica.

^c O *Dashboard of Sustainability* é um índice agregado de vários indicadores de desempenho econômico, social e ambiental que mostra visualmente os avanços dos países em direção à sustentabilidade, utilizando a metáfora de um painel de veículo.

ceito “manufatura”, longe do conceito original (“feito a mão”), é que hoje ele é identificado como a produção em larga escala de produtos, que compreende a fabricação dos vários elementos que compõem esses produtos.

Em princípio, o *International Trade Administration* dos EUA (2007) define fabricação sustentável como “a criação de produtos manufaturados que usaram processos que minimizam os impactos ambientais negativos, conservam a energia e os recursos naturais, são seguros para os trabalhadores, comunidades e consumidores e são economicamente viáveis”. Esse conceito se considera válido porque envolve claramente os três aspectos da sustentabilidade explicados inicialmente.

Um exemplo da aplicação da sustentabilidade entre as empresas é a Bosch Rexroth, especialista em tecnologias de comando e controle, a qual, sob o compromisso de aumentar a produtividade e reduzir custos, consegue atingir tais objetivos mediante a ampla competência em controle, soluções de eficiência energética e conceitos consistentes de segurança. Tudo isso, em síntese, é automação e sustentabilidade (Bosch Rexroth AG s.d.). No aspecto da sustentabilidade, a empresa tem identificado quatro áreas chave: a eficiência energética em componentes (bombas de pistão axial, sensores de pressão, etc.), a recuperação de energia (equipamentos de fornecimento com capacidade *feedback*, acumuladores hidráulicos e o uso múltiplo de ar comprimido), a energia segundo a demanda e o projeto de sistemas de eficiência energética (como o sistema regenerativo de travagem hidrostático) para unidades móveis ou veiculares em que claramente se consegue reduzir o consumo de energia em até 25% (LINDZUS s.d.). Inclusive nas máquinas-ferramentas observa-se que essas têm aumentado a eficiência com ajuda de componentes da Rexroth, aperfeiçoando o sistema do servomotor, da bomba e do sistema pneumático, mediante a recuperação de energia elétrica e/ou hidráulica (Bosch Rexroth AG 2008).

Para os pesquisadores, Jain e Kibira (2010) a manufatura sustentável envolve a interação de quatro sistemas complexos, quais sejam a fabricação, o meio ambiente, o financeiro e o social, dos quais emerge um modelo dinâmico, que de acordo com o pensamento sistêmico, é possível conseguir a fabricação sustentável. Isto também se visualiza no exemplo anterior da Bosch Rexroth.

A complexidade da manufatura sustentável precisa então da criação de métricas e indicadores. Essa tarefa não é fácil. Se no início se define o objetivo de análise, escolhe-se o tipo de parâmetro, define-se o escopo ou abrangência de análise (máquina-ferramenta, linha

de produção, sistema de fabricação ou cadeia de suprimentos) e limita-se o âmbito geográfico, é possível ter indicadores apropriados que possam guiar as decisões em qualquer nível da empresa (REICH-WEISER, VIJAYARAGHAVAN e DORNFELD 2008). Esses parâmetros possibilitam o monitoramento e até a simulação da fabricação. Porém, devido à grande variedade de indicadores (HEILALA, et al. 2008), os mesmos não são incorporados à análise em uma única simulação, pelo alto risco de se incorrer em erros quando se efetua a integração de todos os indicadores em uma só simulação, apesar de suas diferenças conceituais. Consequentemente, a simulação não é usada para algumas aplicações, tais como as análises de impacto ambiental.

Um segundo conceito de manufatura sustentável é apresentado por Jayal et al. (2010), eles asseveram que a manufatura sustentável não somente envolve o produto e a sua fabricação mas também toda a cadeia de suprimentos, isto é, inclui os sistemas e processos de fabricação e envolve vários ciclos de vida de produtos. Um modelo teórico preditivo e técnicas de otimização foram propostas pelos autores usando a usinagem como exemplo em três cenários diferentes: usinagem a seco, usinagem quase a seco e criogênico. Sem dúvida tem sentido considerar a cadeia de suprimentos, e com ela vários processos de fabricação e seus ciclos de vida em um mundo idealmente padronizado. Porém, essa proposta deixa ver que os impactos nos aspectos da sustentabilidade podem ser completamente distintos para um mesmo suprimento pelo simples fato de ter sido fabricado sob distintas condições (local, cidade, ou até mesmo continentes).

Paralelamente, seguindo a lógica do Laboratório de Produção e Sustentabilidade da Universidade da Califórnia, Berkeley, os elementos da fabricação sustentável começam com a energia limpa para mover as máquinas verdes, mediante as quais acontece a fabricação verde e daí os produtos verdes (LMAS 2007). De acordo com isso, a ACV e a manufatura verde são dois pontos frequentemente mencionados nas últimas pesquisas publicadas na área da manufatura sustentável. Isso abrange os diferentes processos de fabricação.

Portanto a manufatura sustentável precisa de indicadores que avaliem seu impacto na fabricação, no meio ambiente, no econômico e no social. Tais indicadores vão depender do(s) processo(s) de fabricação envolvido(s).

1.1.2. Sistemas e processos de fabricação

Pode-se afirmar que os sistemas de fabricação são definidos como uma combinação de pessoas, máquinas e equipamentos unidos por material e um fluxo de informação. Tais sistemas podem ser divididos em duas áreas: a área onde os materiais são processados e partes individuais ou componentes são feitos, e a área onde as partes individuais ou os componentes são unidos ou montados. Para a montagem, a estrutura do sistema de fabricação pode ser abordada por atividade, projeto, sistema em célula, fluxo linear ou sistema contínuo. (CHRYSSOLOURIS 2005)

Entretanto, há uma segunda definição dos sistemas de fabricação. Eles podem ser definidos como um conjunto de entidades (de entrada e saídas) que se desenvolvem em meio a atividades, recursos e controles. Além disso, os sistemas de fabricação podem ser representados em modelos matemáticos que podem simulá-los e facilitar o seu aperfeiçoamento. Já o *design* do sistema de fabricação consiste em uma série de assuntos inter-relacionados, como a estratégia de ferramentas, o sistema de manuseio de materiais, o tamanho do sistema, a configuração de fluxo dos processos, a flexibilidade necessária para alterações de engenharia futuras ou capacidade de adaptação e a estratégia espacial (HARRELL e TUMAY 1995, HEILALA, et al. 2008). Nesse sentido, falar do aperfeiçoamento de um sistema de fabricação com o intuito da economia da energia adiciona mais parâmetros para serem manipulados simultaneamente (HEILALA, et al. 2008), prevalecendo, assim, a importância da complementaridade do monitoramento e do controle nos sistemas de fabricação.

Unindo as duas definições anteriores, todo processo no sistema de fabricação precisa ser conhecido em termos físicos, e até em termos químicos, a fim de ser controlado para garantir seu maior desempenho possível. Para o controle de qualquer atividade se faz necessário um monitoramento adequado ao tipo de processo.

A esse respeito, os tipos de processos de fabricação no que se refere à ação física sobre a matéria-prima dividem-se em processos: de deposição de material, tais como vazamento ou sinterização e a montagem; de formação de material, como o forjamento; de separação de material, como o corte por perfuração, corte por laser ou jato de água abrasiva; e de remoção de material ou processos de usinagem (LÓPEZ DE L. e LAMIKIZ 2009, p. 2). Os processos de fabricação também podem ser agrupados em quatro categorias principais: Fundição, forjamento, usinagem e montagem (SHIN 2004).

A usinagem, dentre os processos de fabricação mencionados, dependendo da ferramenta de corte utilizada, com aresta de corte definida ou indefinida, apresenta diversos, porém, semelhantes, processos (LÓPEZ DE L. e LAMIKIZ 2009, p. 2): fresamento, aplainamento, corte de perfis, brochamento, corte de engrenagens, torneamento, mandrilagem e furação (YOUSSEF e EL-HOFY 2008, p. 1-10). Todos esses são efetuados com as máquinas-ferramentas, dentre as quais os centros de usinagem serão o foco de estudo na parte experimental do presente trabalho.

1.1.3. Consumo de energia na manufatura

De acordo com um estudo da *International Energy Agency* (2010), a demanda mundial de energia tende a crescer paralelamente ao PIB, embora geralmente a uma taxa inferior. Essa taxa de crescimento da demanda tem flutuado ao longo do tempo, caindo de 0,64% em 1980 para 0,46% na década de 1990 e, em seguida, passando a 0,67% entre os anos de 2000 e 2008, principalmente por causa de uma rápida expansão do setor manufatureiro na China (que quadruplicou o consumo de energia no setor). Assim, estima-se que em 2035 a demanda de energia para o setor industrial no mundo (Figura 3) alcançaria cerca de aproximadamente 30% da energia total consumida, dos quais três quintos pertenceriam somente à Índia e a China.

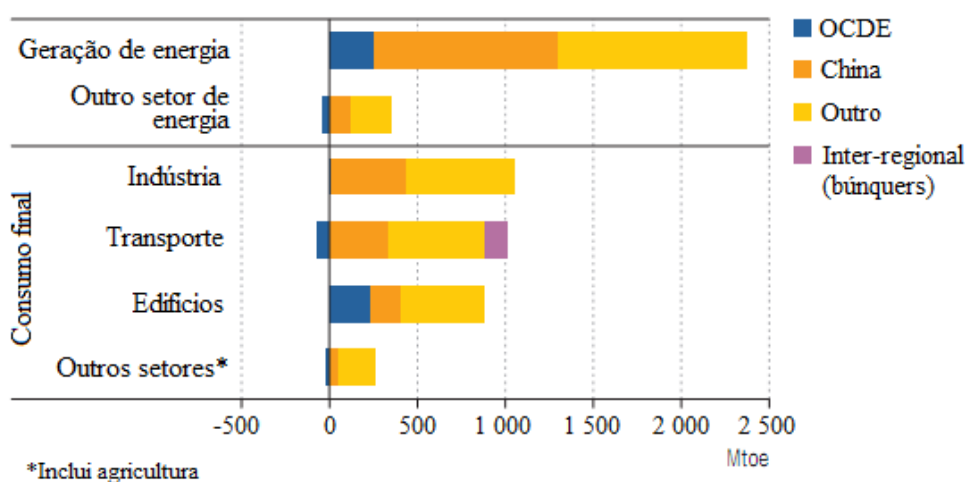


Figura 3: Demanda de energia incremental por setor e região no cenário de Novas Políticas, 2008-2035

Fonte: *International Energy Agency* (2010, p. 89)

Os combustíveis fósseis representam 68% das fontes mundiais para a geração de energia elétrica (EIA 2009), sendo o Brasil uma exceção nesse quadro. Segundo o balanço energético brasileiro, aproximadamente 89% da energia elétrica é originada de fontes renováveis,

dos quais 81,9% provêm da energia hídrica (EPE 2012, p. 16). No entanto, no período de 2001 a 2011, o consumo de energia do setor industrial já foi em média de 39%, visivelmente explicado na Figura 4.

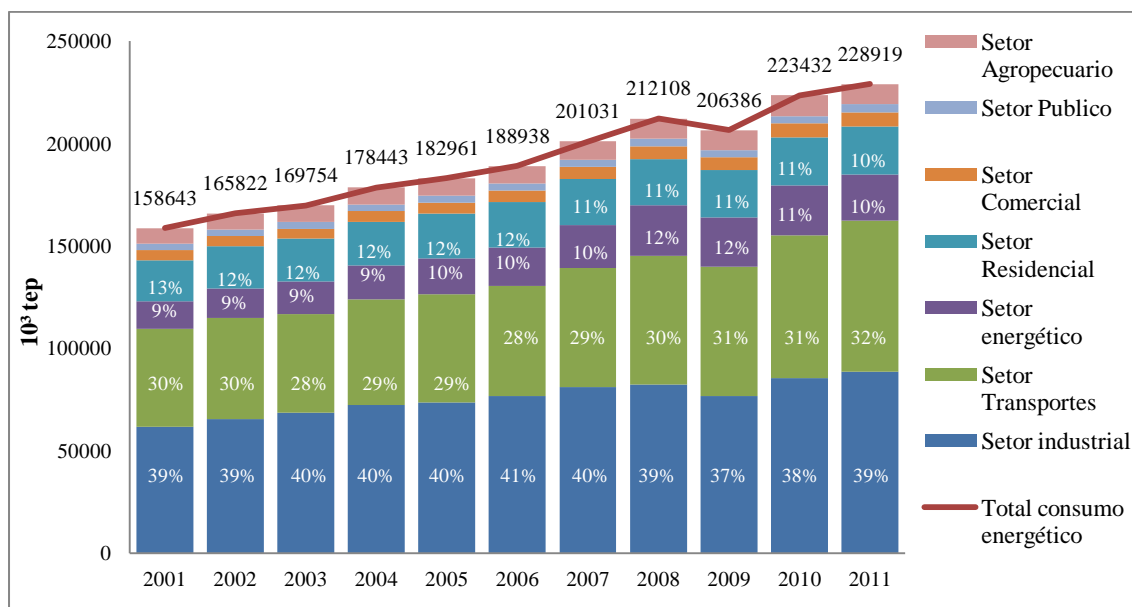


Figura 4: Consumo de energia por setores no Brasil, 2001-2011

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2012, p. 27)

Diferentes e variadas hipóteses podem explicar o elevado consumo de energia pelo setor industrial no Brasil, mas não é possível negar que este setor industrial tem ainda uma grande jornada a percorrer para aperfeiçoar os seus sistemas e processos de fabricação no que se refere ao consumo de energia.

O aperfeiçoamento dos processos, com o intuito de minimizar o consumo de energia, depende do conhecimento para mensurar e manipular as variáveis controláveis e ainda para lidar com as variáveis não controláveis. Sem perder o foco em melhorar o desempenho do processo dentro do sistema de fabricação, cuidando da sua influência e dependência de outros processos.

1.2. Fundamentos de energia elétrica

A energia elétrica é uma forma de energia que o homem aprendeu a criar e manipular para seu próprio benefício. Nesse sentido não é fácil, para o homem, extraí-la da natureza de forma imediata, mas pode ser obtida através da energia química ou da energia mecânica, por meio de turbinas e geradores que, na verdade, transformam essas formas de energia em energia elétrica.

Em um equipamento elétrico, seu funcionamento depende dos elementos constitutivos dos seus circuitos elétricos. Os circuitos apresentam, mas não de forma exclusiva, dois tipos de elementos, os ativos e os passivos. Os elementos ativos são fontes de tensão ou corrente capazes de proporcionar energia elétrica ao circuito. As resistências (resistores), as bobinas (indutores) e os condensadores (capacitores) são elementos passivos que tomam energia da fonte (elementos ativos) para transformá-la em outro tipo de energia ou acumulá-la em forma de campo magnético ou elétrico. (EDMINISTER e NAHVI 1997, p.9)

A energia elétrica possui duas grandes vantagens, a sua flexibilidade e a sua controlabilidade. É flexível, porque pode ser transformada basicamente em luz, calor, movimentação mecânica e alimenta circuitos eletrônicos (para gerar sinais de rádio, imagens de televisão e som estéreo). É muito controlável, porque pode ser ligada e desligada em um milionésimo de segundo, e medida com precisão. (PHILIPSON e LEE W. 2006, p. 119–149). Para isso, nos itens a seguir explicar-se-ão sucintamente a energia e a potência elétricas, a natureza da corrente e os sistemas trifásicos, conceitos básicos para explicar a sua mensuração.

A unidade fundamental da energia no Sistema Internacional de unidades é o Joule (J), que representa o trabalho de uma força de um Newton na movimentação de um corpo através de uma distância de 1 m ao longo da direção da força ($1J=1N\times 1m$). A energia elétrica é a capacidade de uma corrente elétrica realizar trabalho. Vale dizer que a energia elétrica se acumula em condensadores (campo elétrico) e indutores ou bobinas (campo magnético) (EDMINISTER e NAHVI 1997, p.4).

Ora, se aplicada uma força eletromotriz (f.e.m.) a um condutor, as suas cargas exemplificadas por elétrons livres, movimentam-se em uma direção, dando origem à corrente elétrica. Nesse fenômeno observam-se dois elementos presentes, a corrente elétrica e a tensão:

- A corrente elétrica i é constituída pelas cargas elétricas em movimento. A unidade de corrente é o Ampère (A), o qual se define como a taxa de passagem de carga q , isto é uma ta-

xa uniforme de Coulomb (C), que passa perpendicularmente por uma superfície a cada segundo (s) (HAYT e BUCK 2003, p.70). Por tanto:

$$i(t) = \frac{dq}{dt} \quad \dots(1)$$

$$q = \int i dt \quad \dots(2)$$

- A tensão v é o trabalho realizado w , proporcionado por uma fonte (agente externo) que cria um campo elétrico sobre uma carga, ao deslocar uma unidade de carga positiva através do elemento. A unidade de tensão, ou diferença de potencial, é o volt (V) (JOHNSON, HILBURN e JOHNSON 2000, p.6-8). Se há tensão v (V) e uma pequena carga diferencial dq (C) se move através do elemento, então a energia dw (J) dissipada ou trabalho diferencial executado pela energia elétrica em um instante é dado por:

$$dw = v dq \quad \dots(3)$$

A velocidade com que a energia é dissipada ou produzida, medida em Joules por segundo, é o que se denomina potência elétrica (JOHNSON, HILBURN e JOHNSON 2000, p.8), daqui em diante chamada potência. A potência é a taxa (J/s) em que a energia elétrica se transfere, pela qual trabalho são produzidos num instante do tempo. Assim, a potência é a derivada da energia com relação ao tempo, de forma que a potência p é geralmente função do tempo t (EDMINISTER e NAHVI 1997, p.4):

$$p = \frac{dw}{dt} \quad \dots(4)$$

A unidade fundamental da potência é o watt ($1 W = 1 J/s$). Normalmente, a energia elétrica é medida em watt-hora ($1 Wh = 3,6 \times 10^3 J$) – unidade se adotará como padrão nesta dissertação, exceto quando indicado o contrário (BOLDEA 2006, p.1-1). Com as equações 1-4 concluímos que a potência p é diretamente proporcional à tensão e à corrente, em que p é uma grandeza variável no tempo como apresentado na equação (5):

$$p(t) = v(t)i(t) \quad \dots(5)$$

1.2.1. Natureza da corrente elétrica

Dado que a corrente elétrica é provocada pela existência de uma tensão, a natureza desta influencia na forma da corrente. Desse modo, têm-se dois tipos de corrente: a corrente contínua e a corrente alternada.

Em sistemas com corrente contínua CC (I), o fluxo da corrente que passa através de um condutor ou de um circuito é unidirecional para o período de tempo em consideração. Isso se deve ao fato de que as fontes de tensão, como pilhas e baterias, mantêm a mesma polaridade da tensão de saída. Essas fontes podem variar o valor da sua tensão de saída e manter a sua polaridade. A tensão fornecida por elas é chamada tensão contínua. Em sistemas de corrente alternada CA (i), o sentido da corrente varia no tempo como consequência da fonte de tensão alternada, que alterna periodicamente a sua polaridade (GUSSOW 2009, p.20-21, PHILIPSON e LEE W. 2006, p.104).

1.2.1.1. Geração da tensão e corrente alternadas

Uma tensão alternada U ou V pode ser produzida por um gerador chamado alternador. Existem vários tipos de geradores. Conforme o apresentado na Figura 5, o gerador mais simples consiste de uma espira retangular que gira em um campo magnético uniforme. E, os ciclos de tensão correspondem à rotação de um círculo. (EDMINISTER e NAHVI 1997, p.297).

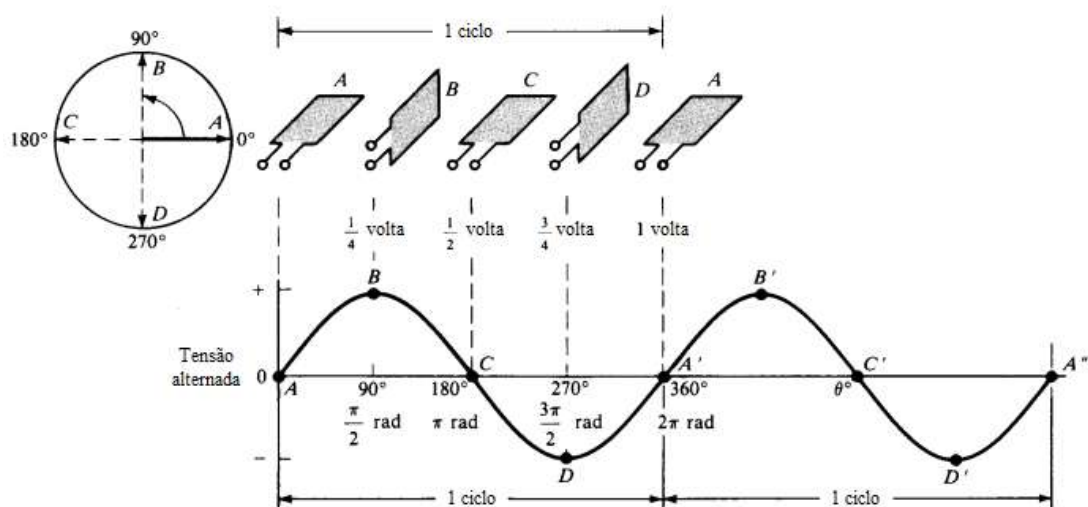


Figura 5: Dois ciclos de tensão alternada gerados pela rotação de uma espira em um gerador de dois polos

Fonte – (GUSSOW 2009, p.265)

Em um gerador de dois polos, a rotação da bobina da armadura ao longo de 360° gera um ciclo de tensão alternada. No entanto, em um gerador de quatro polos, um ciclo se completa em uma rotação de 180° . Os sentidos da tensão e da corrente podem sofrer muitas inversões por segundo, sendo que os ciclos por segundo são dados pela frequência, cuja unidade é Hertz (Hz). A frequência padrão dos sistemas de energia elétrica brasileiros é de 60 Hz (ALMEIDA G. e FREITAS 1995).

A corrente alternada é gerada quando uma onda senoidal de tensão alternada U é conectada a uma resistência de carga R , a corrente que passa pelo circuito gera-se também de forma senoidal (Figura 6).

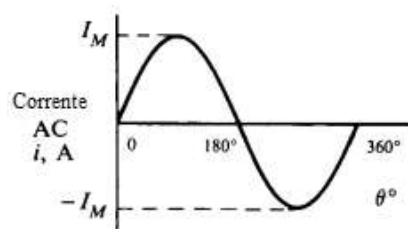


Figura 6: Corrente alternada
Fonte – (GUSSOW 2009)

1.2.1.2. Características da tensão e a corrente senoidais

– As tensões e intensidades de corrente, como funções temporais podem agrupar-se em três tipos: função periódica, não periódica (como a exponencial) e aleatória. Como apresentado na Figura 7.

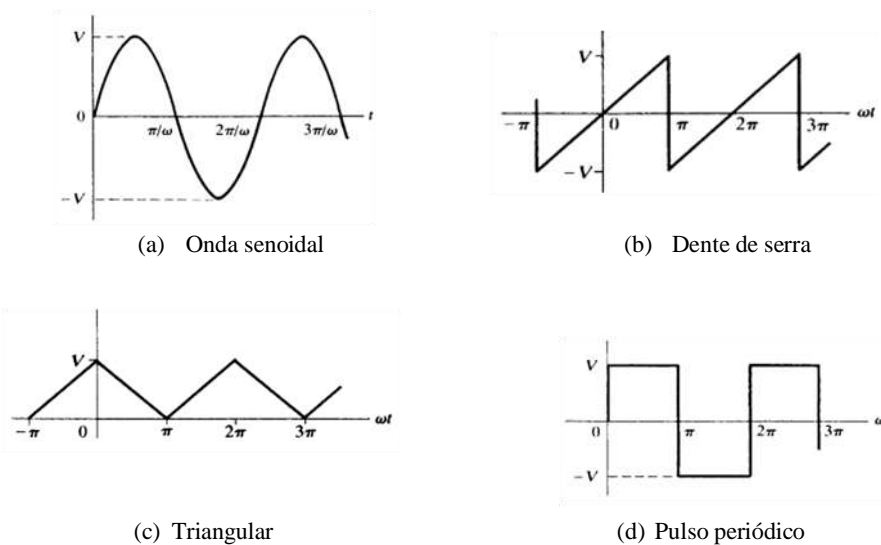


Figura 7: Tipos de ondas periódicas
Fonte – (EDMINISTER e NAHVI 1997, pp. 507 - 515)

As funções periódicas podem ser, do ponto de vista gráfico: senoidais (Figura 7-a), dente de serra (Figura 7-b), triangulares (Figura 7-c) e retangulares ou pulsantes (Figura 7-d).

- Caso se considere os elementos dos circuitos lineares e invariantes no tempo no sistema (resistência, indutância e capacitância), todas as fontes sejam senoidais com a mesma frequência, correspondem às tensões senoidais correntes também senoidais, em regime permanente.
- Uma onda senoidal de corrente alternada ou tensão alternada possui vários valores instantâneos ao longo do ciclo, como se mostra na Figura 8, são os valores de pico, médio e valor rms (valor eficaz ou valor médio quadrático). O valor eficaz da corrente I_{ef} pode ser interpretado como sendo o valor de corrente contínua que produziria o mesmo efeito em termos de energia provocado pela corrente alternada em questão (ALMEIDA G. e FREITAS 1995, p.25, GUSSOW 2009, p.271).

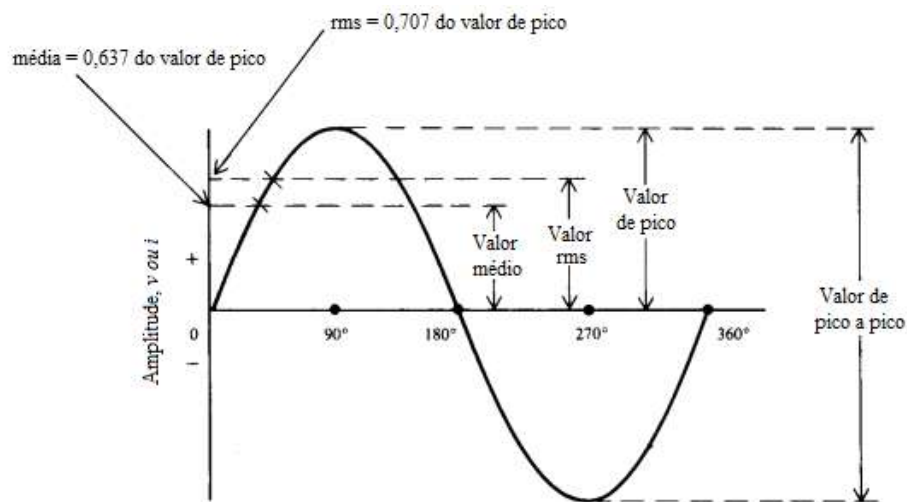


Figura 8: Valores de amplitude para uma onda senoidal de CA

Fonte – (GUSSOW 2009, p.271)

- As tensões e correntes senoidais possuem dois parâmetros principais, a saber, a amplitude e a diferença de fase. Pela teoria de fasores, um fasor girando no sentido anti-horário a uma velocidade angular constante ω (rad/s), possui uma projeção horizontal que é uma senoide assim como apresentado na Figura 9. A magnitude do fasor é o valor máximo desta função senoidal. O ângulo entre duas posições do fasor é a diferença de fase entre os pontos correspondentes na função cosseno.

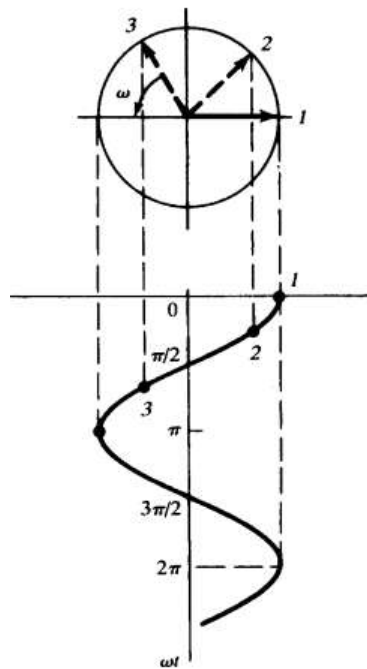
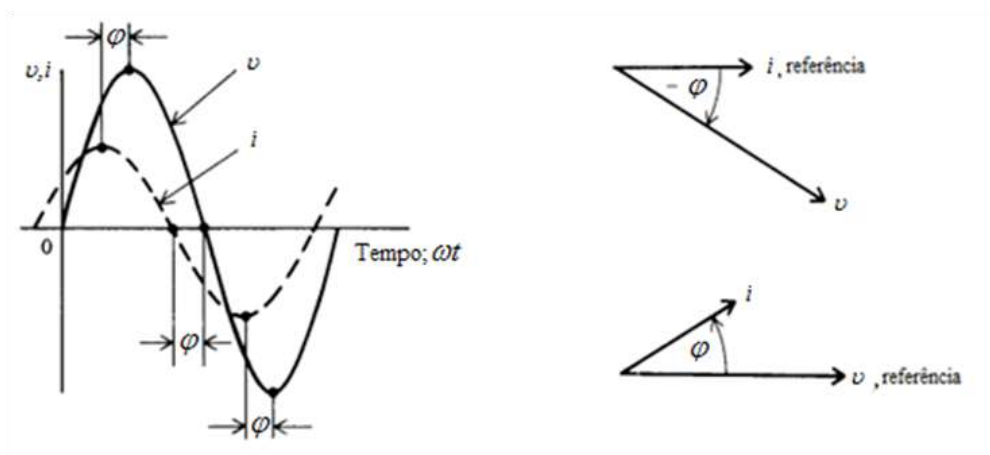


Figura 9: Um fasor, ou vetor, em sentido anti-horário, a velocidade angular constante ω (rad/s)

Fonte – (EDMINISTER e NAHVI 1997, p.227)

- Colocando-se a tensão e a corrente sobre a mesma escala de tempo, observa-se uma defasagem chamada “ângulo de fase” ϕ , a qual mostra o deslocamento entre estas. Por convenção o ângulo de fase é sempre “o ângulo que a corrente i faz com a tensão v ” (EDMINISTER e NAHVI 1997). Na Figura 10 o ângulo de fase entre a onda i e v é medido nos valores máximos, mínimos ou intersecção com a abscissa.



(a) Determinação do ângulo de fase entre as ondas i e v

(b) Diagrama fasorial com diferente fasor de referência

Figura 10: Ângulo de fase

Fonte – (GUSSOW 2009, p.270-271)

1.2.2. Potência em circuitos de corrente alternada

A potência instantânea em circuitos apresentada na equação (5), é o produto da tensão pela corrente. A resultante do produto da tensão e da corrente também é uma função do tempo, cuja amplitude e valor dependerão dos elementos passivos do circuito e da sua impedância (EDMINISTER e NAHVI 1997).

Impedância é a razão da tensão elétrica pela corrente (V/I) a qual representa a oposição de vários componentes de um sistema elétrico à passagem da corrente elétrica por suas propriedades resistivas e eletromagnéticas do material. (EDMINISTER e NAHVI 1997).

Segundo Gussow (2009, p.266), Orsini (2004, pp.587-589) e Almeida & Freitas (1995, pp.32-34) e considerando que as propriedades do sistema (circuito) não estão variando, isto é, está em condições de regime permanente senoidal, os diferentes autores antes mencionados concordam que, sendo a tensão senoidal v no tempo como na equação (6), ela é o produto da tensão máxima, ou de pico V_M (V), pela função cosseno de deslocamento angular $\cos \omega t$:

$$v(t) = V_M \cos \omega t \quad \dots(6)$$

Nessas condições, adotando a tensão como referência de fases, como na equação (7), a corrente instantânea i (A) é o produto da corrente máxima I_M (A) pela função cosseno, a qual será uma senoide com a mesma frequência da tensão, mas defasada de um ângulo φ em relação a esta:

$$i(t) = I_M \cos(\omega t - \varphi) \quad \dots(7)$$

Substituindo esses valores da tensão e da corrente na expressão da potência instantânea na equação (5), se obtém a seguinte expressão:

$$p(t) = \frac{V_M I_M}{2} \cos \varphi + \frac{V_M I_M}{2} \cos(2\omega t - \varphi) \quad \dots(8)$$

Particularmente, em funções senoidais, o valor eficaz é proporcional ao valor máximo (valor de pico) da seguinte forma:

$$I_{ef} = \frac{I_M}{\sqrt{2}}, \quad V_{ef} = \frac{V_M}{\sqrt{2}}$$

Ao considerar valores eficazes da tensão V_{ef} e da corrente I_{ef} , a potência instantânea fluindo de uma rede a outra equivale a:

$$p(t) = V_{ef}I_{ef} \cos(2\omega t - \varphi) + V_{ef}I_{ef} \cos \varphi \quad \dots(9)$$

A potência instantânea segundo a equação (9) consiste em um componente senoidal, $V_{ef}I_{ef} \cos(2\omega t - \varphi)$, mais um valor constante $V_{ef}I_{ef} \cos \varphi$, que vem a ser a potência média $P_{média}$ da Figura 11. Existem casos em que a potência pode ser negativa em uma parte do seu ciclo, porém o valor médio total de potência durante um ciclo é sempre “não negativo” e é chamado de potência média, ou potência ativa ou real.

Usam-se os valores eficazes, pois, por convenção, os valores nominais que especificam as características dos equipamentos elétricos em termos de tensão e corrente são expressos em valor eficaz. Exemplo, quando se diz quem uma lâmpada é de 127V, esse é o valor eficaz da tensão alternada.

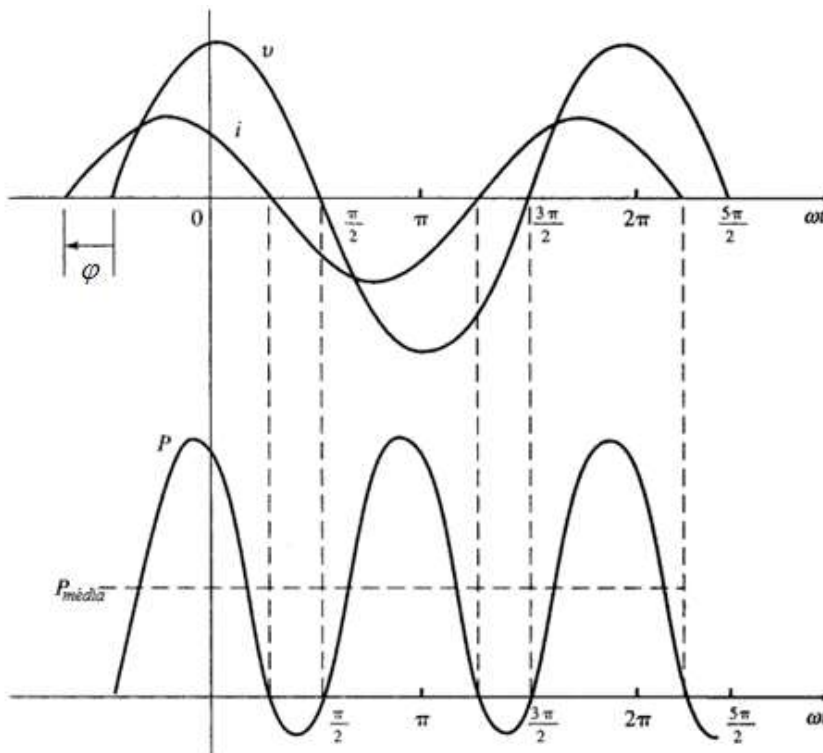


Figura 11: Potência média

Fonte – (EDMINISTER e NAHVI 1997, p.264)

A integral da potência instantânea $p[W]$ durante um intervalo de tempo t e t_0 , dá a energia trocada $w [Wh]$ nesse intervalo.

$$w(t, t_0) = \int_{t_0}^t p(t) dt \quad \dots(10)$$

Para fins de faturamento, o medidor de energia é um aparelho que efetua a integral desde o momento da instalação até o momento da sua leitura, e é habitualmente medido em kWh.

A potência p pode tomar valores positivos ou negativos, dependendo do ângulo de fase φ entre a corrente e a tensão. Quando a tensão v e a corrente i forem ambas positivas ou negativas, o seu produto $p(t)=v(t)i(t)$ é positivo (Figura 12-a). Se a tensão v for positiva e a corrente i for negativa, ou vice-versa, o seu produto p será negativo (Figura 12-b).

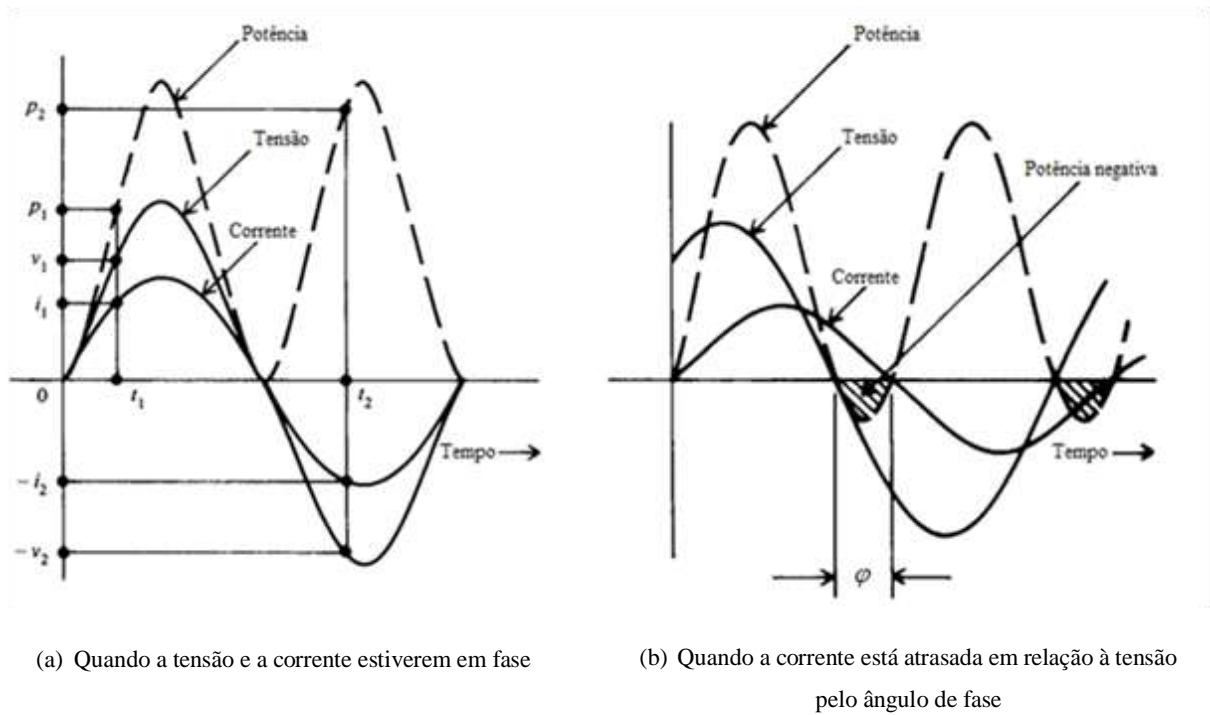


Figura 12: Diagrama temporal da potência

Fonte – (GUSSOW 2009, p.352)

Uma “potência positiva” indica uma transferência de energia da fonte para os elementos passivos. A energia que recebe um elemento passivo transforma-se em calor, energia mecânica, química e/ou eletromagnética. Por outro lado, a “potência negativa” não está disponível para a realização de trabalho, mas é uma potência que volta para a linha, sendo transferida da estrutura (a carga) para a fonte. Como a capacidade de armazenamento de energia de uma bobina ou de um condensador é finita, esses elementos passivos não podem receber permanentemente energia. Assim, no estado estacionário e durante cada ciclo, toda a energia que

recebem (que vai além da sua capacidade) é devolvida. (GUSSOW 2009, p.352, EDMINISTER e NAHVI 1997, p.261-264)

A complexidade do comportamento da potência e as razões pelas quais ocorre o ângulo de fase explicam-se nos conceitos de resistência, reatância, potência ativa, potência reativa e o fator de potência.

1.2.2.1. Potência ativa

Este tipo de potência também é chamada de potência média, potência real, potência eficaz ou potência *r.m.s.* Ela é sempre medida em Watts (*W*).

A potência ativa *P* depende da tensão, da corrente e do ângulo de defasagem entre ambas. Ela é resultado do produto da tensão no resistor pela corrente no mesmo e por isso pode ser considerada como a potência resistiva dissipada em forma de calor (GUSSOW 2009, p.353).

Considera-se um resistor todos os dispositivos elétricos que convertem energia elétrica em calor por possuírem uma resistência. Geometricamente, quando a tensão e a corrente estão em fase, isto é, quando o ângulo de fase é zero, a potência ativa sempre será positiva (EDMINISTER e NAHVI 1997, p.265).

A potência ativa em um intervalo de tempo é dada pela seguinte relação:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} p(t) dt$$

Tendo em vista a equação (9) da potência e que o valor médio do $\cos(2\omega t - \theta)$ em um período completo é zero, obtém-se:

$$P = V_{ef} I_{ef} \cos \varphi \quad \dots(11)$$

Com a lei de Joule, sabe-se que uma corrente contínua *I* percorrendo um resistor *R*(Ω) dissipa a potência $P=RI^2$. Então, se uma corrente senoidal *i*(*t*) fluir pelo mesmo resistor *R*, a potência ativa dissipada será (ALMEIDA G. e FREITAS 1995, p.25):

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T Ri^2(t) dt = R \left[\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt \right]$$

$$P = RI_{ef}^2 \quad \dots(12)$$

A potência ativa é máxima quando a carga é puramente resistiva, ou seja, quando o ângulo de fase é zero. A potência ativa é normalmente designada apenas por “potência”, por ser o tipo de potência mais empregado. Ela é usada para especificar a capacidade da corrente e da tensão alternadas em produzir ou entregar trabalho útil (FITZGERALD, HIGGINBOTHAM e GRABEL 1981, p.173).

1.2.2.2. Potência reativa

A potência reativa também é chamada de “potência de quadratura”. A unidade da potência reativa é o Volt-Ampère reativo (VAr).

A potência reativa Q , assim como a potência ativa, depende também da tensão, da corrente e do ângulo de defasagem entre elas. Ela é resultado do produto da tensão pela corrente multiplicado por $\text{sen } \varphi$. Como a tensão e a corrente, ambas na reatância, estão sempre 90° fora de fase entre si, o produto delas é sempre negativo (GUSSOW 2009, p.353).

A reatância é a resistência oferecida à passagem de corrente alternada por um indutor ou capacitor num circuito. Tem-se, assim, reatância positiva quando é reatância indutiva (ou indutância), e reatância negativa quando é reatância capacitiva (ou capacitância). A indutância acontece quando se armazena energia em um campo magnético, o qual desaparece com a remoção da fonte. A capacitância ocorre quando se armazena energia em um campo elétrico. Nesse caso, o capacitor retém a carga e o campo elétrico pode permanecer depois da fonte ser removida. (EDMINISTER e NAHVI 1997, p.230, 13-14)

Geometricamente, a potência reativa acontece em duas situações: quando a corrente está atrasada em relação à tensão, devido à presença de carga indutiva (bobinas), e quando a corrente está adiantada em relação a ela, devido à presença de carga capacitiva (capacitores) (EDMINISTER e NAHVI 1997, p.266). Pela convenção de sinais introduzida para a defasagem φ , para cada caso a potência reativa pode assumir valores positivos (potência reativa indutiva) ou valores negativos (potência reativa capacitiva) (ORSINI 2004, p.590). A potência reativa Q é definida como:

$$Q = V_{ef} I_{ef} \text{sen } \varphi \quad \dots(13)$$

A potência reativa ocorre quando em um circuito passivo há indutores, capacitores ou ambos. Uma porção da energia, fornecida para o circuito durante um ciclo, é armazenada e

depois devolvida à fonte. Durante o período no qual a energia retorna, a potência é negativa. Embora o efeito resultante da potência reativa seja zero, ela degrada a operação dos sistemas elétricos de potência, pois exige a geração, transformação e fornecimento às cargas de valores de corrente que, em parte, não realizam trabalho útil. Quando a carga é puramente reativa, a potência reativa possui valor máximo, pois o ângulo de fase φ é 90° (EDMINISTER e NAHVI 1997, p.266).

1.2.2.3. Potência aparente

As potências, ativa e reativa, estão presentes em diferentes sistemas elétricos, mas pelo fato de possuírem significados diferentes, não podem ser somados aritmeticamente. No entanto podem ser somadas vetorialmente. A resultante dessa soma é a potência aparente ou potência complexa (EDMINISTER e NAHVI 1997, p.270).

Levadas à sua forma fasorial, a tensão e a corrente em regime permanente senoidal são representadas pelo fasor de corrente \hat{I} e o fasor de tensão \hat{V} . A potência aparente S pode ser representada apropriadamente por sua magnitude vetorial, onde \oplus representa adição vetorial:

$$S = P \oplus Q$$

As três magnitudes escalares S , P e Q se relacionam geometricamente, como se mostra na Figura 13, em um triângulo retângulo denominado triângulo de potências (Figura 13-a).

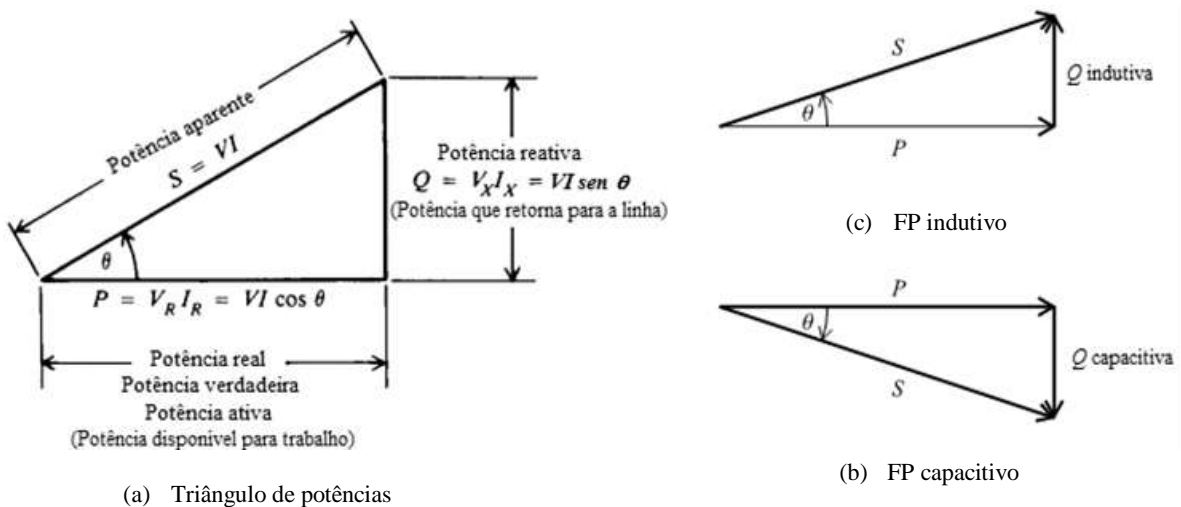


Figura 13: Relação entre as potências

Fonte – (GUSSOW 2009, p. 353)

O módulo da potência aparente segundo o teorema de Pitágoras é:

$$|S| = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad \dots(14)$$

E, considerando os valores da potência ativa e reativa assim como na Figura 13, o módulo da potência aparente também é equivalente a:

$$|S| = V_{ef} I_{ef} \quad \dots(15)$$

A potência aparente pode ser interpretada como o produto da tensão da linha pela corrente da linha (GUSSOW 2009, p.353) e se expressa em unidades de Volt-Ampère (VA).

1.2.2.4. Fator de potência

O fator de potência FP em regime permanente é definido pela razão entre a potência ativa, equação (11), e a potência aparente, equação (15). Logo, é o cosseno do ângulo entre a tensão e a corrente:

$$FP = \frac{P}{S}$$

$$FP = \cos \varphi \quad \dots(16)$$

O fator de potência determina qual parcela da potência aparente é potência ativa, e pode variar desde um, quando o ângulo de fase φ é 0° , até zero, quando φ for 90° . O fator de potência é expresso como um número decimal ou como uma porcentagem. O ângulo φ é normalmente o ângulo de impedância. Ora, a defasagem entre a tensão e a corrente origina dois tipos de fatores de potência:

- Fator de potência indutivo ou “FP de atraso”, quando a corrente está atrasada em relação à tensão (Figura 13-b).
- Fator de potência capacitivo ou “FP de avanço”, quando a corrente está adiantada em relação à tensão (Figura 13-c).

Para entregar uma grande quantidade de potência, um FP alto (próximo de 1,0) é desejável. Isso porque ao se ter um FP menor, a corrente para a carga se torna maior. Correntes maiores do que o necessário são indesejáveis, pois vêm acompanhadas de grandes perdas de tensão e de potência em linhas de alimentação. Um fator de potência baixo geralmente se de-

ve a grandes cargas indutivas, como motores de indução, que consomem corrente com atraso de fase. Para se corrigir o baixo fator de potência é necessário fazer com que a fase da corrente fique o mais próximo possível da fase da tensão. Então, a defasagem deve ser a menor possível, o que pode ser feito, às vezes, colocando uma carga capacitiva, que pode ser um banco de capacitores que produza uma corrente adiantada, em paralelo com a carga indutiva. Dessa forma, melhorar os VAR indutivos da potência reativa e corrigir o FP (GUSSOW 2009, p.353-355, 429-430, FITZGERALD, HIGGINBOTHAM e GRABEL 1981, p.182).

1.2.3. O sistema trifásico

A maior parte da geração, transmissão e utilização em alta potência de energia elétrica envolve sistemas polifásicos, isto é, sistemas constituídos por diversas tensões da mesma amplitude (ou seja, sistemas equilibrados), mas que diferem em fase uma da outra. Sua utilização mais comum ocorre na geração, na transmissão e utilização de energia elétrica de e para sistemas trifásicos ($3-\phi$), o qual resulta da combinação de três sistemas monofásicos ($1-\phi$). A quase totalidade da energia elétrica no mundo é gerada e transmitida por intermédio de sistemas de tensões trifásicos equilibrados. (ALMEIDA G. e FREITAS 1995, p.41-54, GUSSOW 2009).

Em circuitos $3-\phi$ os condutores podem possuir menor massa do que os circuitos $1-\phi$ de mesma especificação de potência. Além disso, permitem flexibilidade na escolha das tensões, e podem ser usados para cargas monofásicas. O equipamento $3-\phi$ tem menores dimensões e é mais eficiente comparado às máquinas $1-\phi$. Sob regime permanente, em circuitos equilibrados, o valor instantâneo da potência trifásica é constante ao passo que nos circuitos monofásicos a potência instantânea é pulsante. Além disso, sistemas trifásicos permitem dois tipos distintos de tensões (fase-fase ou tensão de linha, e fase-neutro ou tensão de fase). De modo geral, equipamentos e aparelhos trifásicos são mais eficientes que os monofásicos. Por possuir vantagens econômicas e operacionais definidas, o sistema trifásico é o mais difundido.

1.2.3.1. Geração de tensão trifásica

Um gerador trifásico pode ser modelado por três fontes de tensão senoidais com a mesma frequência. No caso de um estator balanceado, três bobinas estão igualmente distribuídas sobre a circunferência do estator, isto é, as bobinas estão deslocadas umas das outras por

um ângulo mecânico de 120° (Figura 14-a e 14-b), e as amplitudes das três fases são também iguais. (EDMINISTER e NAHVI 1997, p.297)

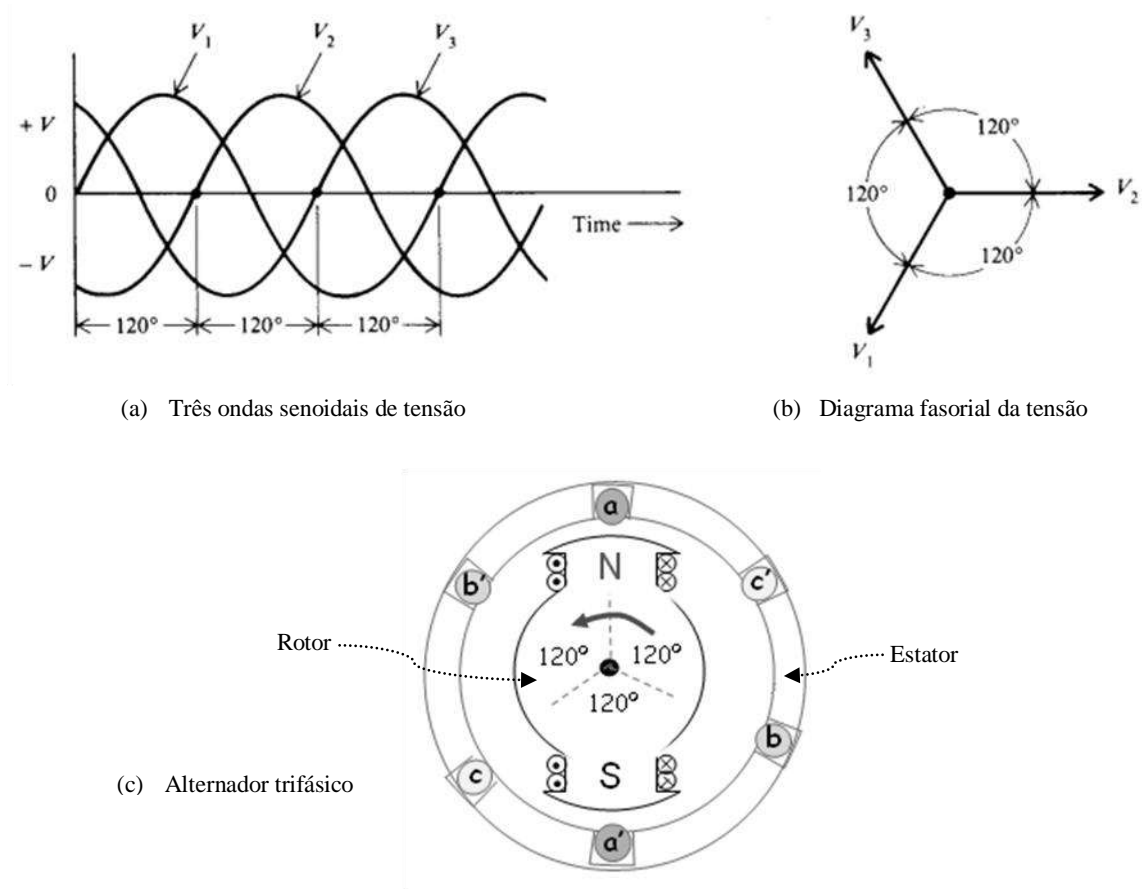


Figura 14: Tensão alternada trifásica

Fonte – (GUSSOW 2009, p.486, ALMEIDA G. e FREITAS 1995, p.43)

Considere-se o alternador elementar de CA trifásico da Figura 14-c. As bobinas a , b , c , de terminais identificados por aa' , bb' , cc' , são supostas idênticas, de N espiras cada uma, e estão dispostas no estator defasadas entre si em 120° . O rotor é constituído por um ímã ou por bobinas excitadas por corrente contínua, proporcionando um fluxo constante Φ e gira a velocidade angular constante ω (ALMEIDA G. e FREITAS 1995, p.42-43,54). Geradores de CA 3- ϕ são fabricados com potências que variam de 100 kW a 1 300 MW para operações em tensões que vão de 480 V a 25 kV.

Geralmente as tensões geradas de uma fonte 3- ϕ são interconectadas e usadas para alimentar cargas que possuem sistemas 3- ϕ (FITZGERALD, HIGGINBOTHAM e GRABEL 1981, p.555, GUSSOW 2009, p.486), como é o caso das máquinas-ferramentas.

1.2.3.2. Conexões em sistemas trifásicos equilibrados

As três fases de um sistema 3- ϕ podem ser conectadas de duas formas (Figura 15):

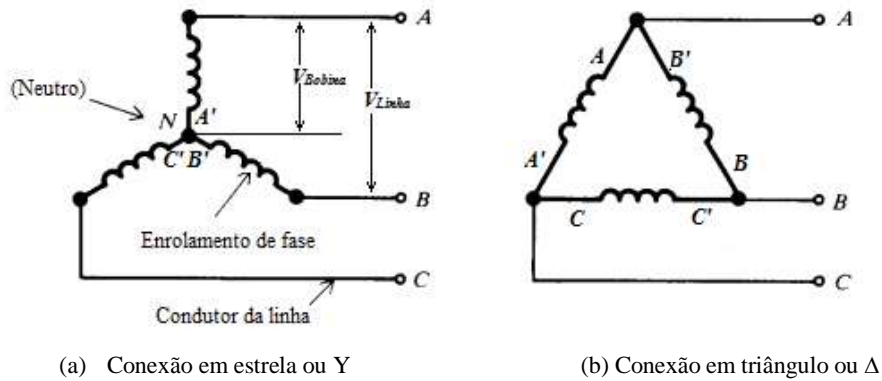


Figura 15: Conexões para fontes de alimentação CA 3- ϕ
(GUSSOW 2009, p.487)

- Ligação em estrela ou Y: esta corresponde à ligação dos terminais A' , B' , C' no ponto comum denominado “neutro” N (Figura 15-a). Nesse caso as correntes na linha I_L e de fase I_{ef} (na bobina) são iguais, e a corrente no neutro é nula, enquanto que a tensão de linha V_L é $\sqrt{3}$ vezes a tensão de fase V_{ef} . Se o ponto neutro também acessível externamente junto com as linhas, o sistema é trifásico a quatro fios.
- Ligação em triângulo ou Δ : Isso é a ligação de A em B' , de B em C' e de C em A' (Figura 15-b). São iguais as tensões de linha V_L e de fase V_{ef} , porém a corrente de linha I_L é $\sqrt{3}$ vezes a corrente de fase I_{ef} .

Seja qual for a ligação, as três linhas A , B , e C constituem um sistema trifásico de tensão (EDMINISTER e NAHVI 1997, p.297-303).

1.2.3.3. Potência em cargas trifásicas equilibradas

Uma característica geral de um sistema trifásico simétrico e equilibrado é que as tensões trifásicas são iguais e defasadas em 120° elétricos. Além disso, a impedância em qualquer das fases é igual à das outras duas, de maneira que as correntes de fases resultantes são iguais e defasadas de 120° elétricos. Desse modo, fluirão potências ativa e reativa iguais em cada fase. Um sistema trifásico desequilibrado não possui alguma destas igualdades ou defasagens de 120° elétricos (FITZGERALD, HIGGINBOTHAM e GRABEL 1981, p.555).

Em uma carga trifásica qualquer, ligada em estrela ou em triângulo, a potência instantânea recebida pela carga é:

$$\begin{aligned} p(t) &= v_a(t) \cdot i_a(t) + v_b(t) \cdot i_b(t) + v_c(t) \cdot i_c(t) \\ p_T(t) &= p_a(t) + p_b(t) + p_c(t) \end{aligned} \quad \dots(17)$$

Considerando carga equilibrada e a defasagem φ entre tensão e corrente e supondo sequência positiva, para cada fase se têm:

$$\begin{aligned} p_a(t) &= V_{ef} I_{ef} \cos \varphi + V_{ef} I_{ef} \cos(2\omega t - \varphi) \\ p_b(t) &= V_{ef} I_{ef} \cos \varphi + V_{ef} I_{ef} \cos(2\omega t - 240^\circ - \varphi) \\ p_c(t) &= V_{ef} I_{ef} \cos \varphi + V_{ef} I_{ef} \cos(2\omega t - 480^\circ - \varphi) \\ p_T(t) &= 3V_{ef} I_{ef} \cos \varphi \end{aligned} \quad \dots(18)$$

Em cargas equilibradas a potência instantânea, equação (18), pode ser escrita em termos da tensão de linha V_L e da corrente de linha I_L , pois os valores em linha também são valores eficazes. Resumindo, para cada fase têm-se:

– Potência ativa trifásica: $P = \sqrt{3} V_L I_L \cos \varphi \quad \dots(19)$

– Potência reativa trifásica: $Q = \sqrt{3} V_L I_L \sen \varphi \quad \dots(20)$

– Potência aparente trifásica: $S = \sqrt{3} V_L I_L \quad \dots(21)$

– Fator de potência: $FP = \frac{P}{S} \quad \dots(22)$

1.2.3.4. Medida da potência trifásica

A potência ativa entregue a uma carga é medida pelo wattímetro. Este dispositivo contém uma bobina de tensão de alta resistência, conectada em paralelo com a carga, e uma bobina de corrente de baixa resistência, que é conectada em série com a carga. O dispositivo tem quatro terminais, cada par dedicado a uma bobina, como demonstrado na Figura 16-a, na qual a bobina de corrente responde à corrente da carga, enquanto a bobina de tensão responde à tensão da carga. Idealmente, a tensão através da bobina de corrente e a corrente na bobina de tensão são ambas iguais a zero, de forma que a presença do medidor não influencia a potência que está sendo medida. O wattímetro de CA da Figura 16-a, representado por um retângulo e duas bobinas, está conectado para indicar a potência entregue à carga. Tal potência pode ser

representada com a equação (11), que corresponde ao produto da tensão eficaz pela corrente eficaz e pelo cosseno da defasagem entre ambos fasores, em que φ é o ângulo entre a tensão e a corrente ou o ângulo da impedância da carga.

Pode-se pensar em medir a potência entregue a uma carga trifásica qualquer usando um wattímetro para cada uma das três fases, como apresentado na Figura 16-b. Nesta se observa as tensões de linha a , b e c e as impedâncias de fase Z_1 , Z_2 e Z_3 , onde cada wattímetro teria sua bobina de corrente em série com uma fase da carga e cada bobina de tensão em paralelo com cada fase da carga apoiados no ponto neutro N . A ligação é teoricamente correta, mas na prática o ponto N pode estar inacessível, como no caso de uma carga conectada em Δ (JOHNSON, HILBURN e JOHNSON 2000, p.336).

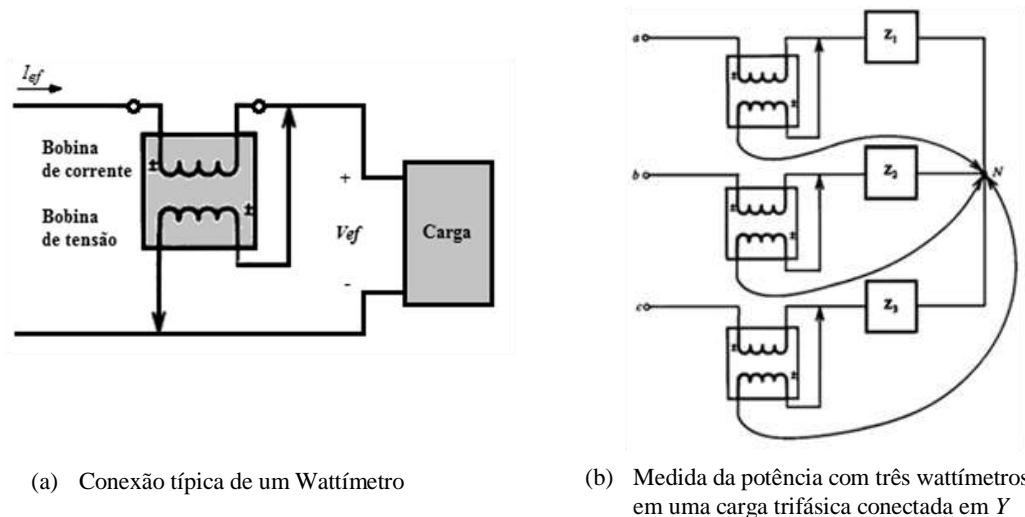
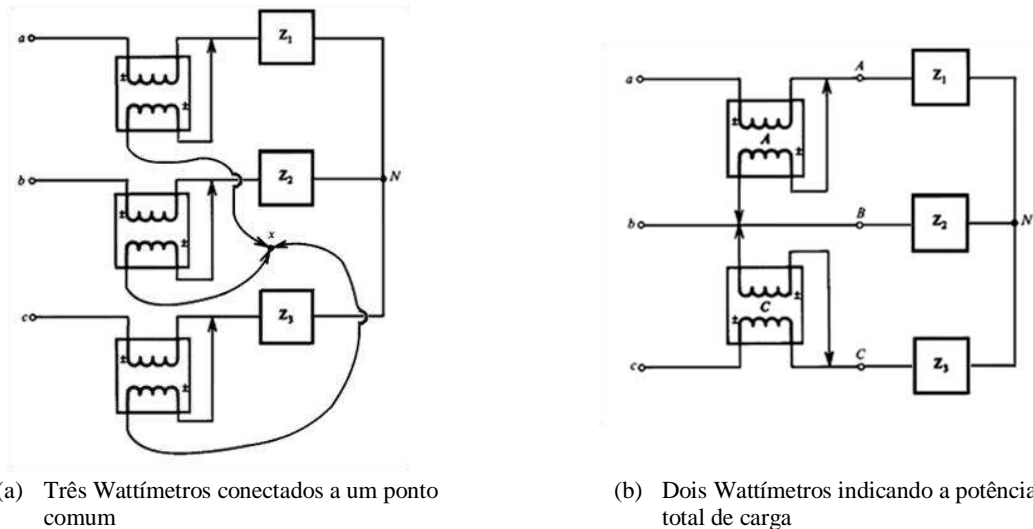


Figura 16: Conexão de um wattímetro e medida da potência com três wattímetros

Fonte – (JOHNSON, HILBURN e JOHNSON 2000, p.336)

A Figura 17-a tem três wattímetros conectados de forma que cada um tem sua bobina de corrente em uma linha e sua bobina de tensão entre aquela linha e o ponto comum x . A soma das leituras dos três wattímetros é exatamente a potência média entregue à carga trifásica, independentemente do ponto x que é completamente arbitrário (JOHNSON, HILBURN e JOHNSON 2000, pp.337-338).



(a) Três Wattímetros conectados a um ponto comum

(b) Dois Wattímetros indicando a potência total de carga

Figura 17: Medida da potência trifásica

Fonte – (JOHNSON, HILBURN e JOHNSON 2000, p.336-337)

Segundo o teorema de Blondel, dois wattímetros conectados em duas linhas quaisquer de um sistema trifásico de três fios indicarão corretamente a potência trifásica total através da soma das duas leituras. No caso de uma carga conectada em Y , se em lugar de se usar o ponto neutro utiliza-se um ponto x arbitrário colocado em uma das linhas (por exemplo, na linha b na Figura 17-b), então o wattímetro cuja bobina de corrente está nesta linha indicará zero, porque a tensão na sua bobina de potencial é zero. Portanto, a potência total entregue à carga é medida pelos outros dois wattímetros, e aquele indicando zero é desnecessário. Esse método é conhecido, também, como o método dos dois wattímetros e é empregado igualmente em cargas conectadas em Δ . (JOHNSON, HILBURN e JOHNSON 2000, p.336-338)

Outros tipos de medidores estão disponíveis para medição da potência aparente e da potência reativa. Um medidor de potência aparente simplesmente mede o produto da corrente eficaz pela tensão eficaz. A potência reativa é normalmente medida de forma indireta, medindo-se o fator de potência (JOHNSON, HILBURN e JOHNSON 2000, p.312, EDMINISTER e NAHVI 1997, p.308-309).

1.2.4. Legislação para o consumo de energia elétrica no Brasil

A Agência Nacional de Energia Elétrica, ANEEL, é a responsável por proporcionar condições favoráveis para que o mercado de energia elétrica do Brasil se desenvolva com equilíbrio entre os agentes e em benefício da sociedade. Ela determina que o fator de potência deve ser mantido o mais próximo possível da unidade; porém, permite um valor mínimo de

0,92, indutivo ou capacitivo (conforme art. 64 da Resolução 456, de 29 de novembro de 2000) correspondente a um certo valor de energia reativa consumida. À medida que o fator de potência decresce, temos valores maiores, correspondentes à energia reativa armazenada, ainda que a energia ativa consumida permaneça constante (ANEEL s.d.). A penalidade é obtida pela seguinte fórmula:

$$FER = CEA \times \left(\frac{FPr}{FPm} - 1 \right) \times TCA \quad \dots(23)$$

- FER** Valor do faturamento total correspondente ao consumo de energia reativa excedente à quantidade permitida pelo fator de potência de referência no período.
- CEA** Consumo de energia ativa medida durante o período de faturamento.
- FPr** Fator de potência de referência igual a 0,92.
- FPm** Fator de potência indutivo médio das instalações elétricas da Unidade Consumidora calculado para o período de faturamento.
- TCA** Tarifa de energia ativa aplicável ao fornecimento.

A penalidade é aplicada quando o fator de potência medido nas instalações do consumidor for inferior a 0,92, o qual representa o custo do consumo reativo excedente, decorrente da diferença entre o valor mínimo permitido e o valor calculado no ciclo.

Portanto, para a avaliação do consumo de energia em uma máquina-ferramenta deve-se levar em conta todos esses conceitos de potência, os quais deverão orientar o sistema proposto no presente trabalho.

1.3. O processo de usinagem

A usinagem é, geralmente, o processo de acabamento em peças fabricadas em metais e em outros materiais. Por outro lado, é reconhecidamente o processo de fabricação mais popular, transformando em cavacos uma quantidade em torno de 10% de toda a produção de metais, e empregando dezenas de milhões de pessoas ao redor do mundo. As tecnologias de remoção de material são especialmente importantes para o setor de máquinas-ferramentas e todos seus clientes: automotivo (motores, componentes, matrizes, moldes), aeronáutico (fuselagens, motores), mecânica de precisão (biomedicina, ortopedia, instrumentação), brinquedos (moldes, peças de magnésio), aeroespacial (satélites do projeto Galileu), óptica (lentes, componentes de ajuste), naval (propulsão), etc. (IZARO ; 2011).

Uma simples definição de usinagem é “processo de fabricação com remoção de cavaco”. Pode-se definir usinagem de forma mais abrangente como sendo “operação que ao conferir à peça a forma, as dimensões, o acabamento, ou ainda a combinação qualquer destes itens, produz cavacos”. E por cavaco entende-se “porção de material da peça, retirada pela ferramenta, caracterizando-se por apresentar uma forma geométrica irregular” (FERRARESI 1995).

1.3.1. O fenômeno de formação de cavaco

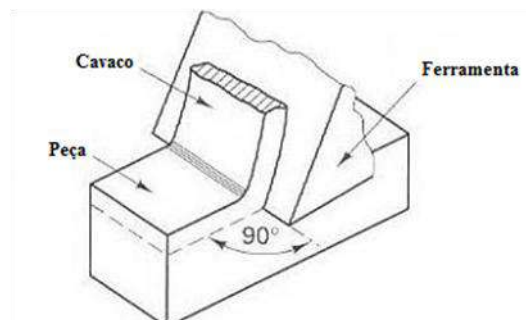
Esse fenômeno é periódico, como apresentado na Figura 18, e se explica de seguinte forma: uma pequena porção de material é recalcada contra a superfície de saída da ferramenta. Essa deformação aumenta progressivamente, até se iniciar um deslizamento (sem perda de coesão) entre a porção de material e a peça. Continuando a penetração da ferramenta haverá uma ruptura ou cisalhamento do cavaco. Prosseguindo, devido ao movimento relativo entre a ferramenta e a peça, inicia-se um escorregamento da porção do material deformado e cisalhado (cavaco) sobre a superfície de saída da ferramenta. Enquanto isso, uma nova porção de material está se formando e cisalhando (DINIZ, MARCONDES e COPPINI 2006, p.44, FERRARESI 1995, pp 89-90).



(a) Torneamento



(b) Fresamento



(c) Elementos na remoção de material

Figura 18: Fenômeno de remoção de material

Fonte – Fotos (Sandvik Coromant 2011)

A remoção de material é um processo de deformação que ainda hoje não possui um modelo exato que o explique e permita predizer, basicamente, a forma do cavaco, as forças existentes e as temperaturas de corte. (LÓPEZ DE L.M., SÁNCHEZ G. e LAMIKIZ M. 2004, p.28). Assim, é conveniente enfatizar que o processo de usinagem está definido por um conjunto de parâmetros, conhecido como “parâmetros do processo”, enquanto que outros parâmetros são úteis para programar as máquinas-ferramentas, chamados “parâmetros máquina”. A conversão do primeiro grupo para o segundo é imediata, empregando, para isso, os dados, como o diâmetro da peça, ou o diâmetro e número de dentes da ferramenta. Os parâmetros do processo são aqueles como a velocidade de corte e o avanço por aresta, entre outros. Os parâmetros máquina são aqueles como as revoluções por minuto do *spindle* e a velocidade de avanço. (LÓPEZ DE L.M., SÁNCHEZ G. e LAMIKIZ M. 2004, p.67)

A complexidade do processo de usinagem acontece pela ampla quantidade de variáveis de entrada que este necessita, pois, além dos “parâmetros do processo”, precisam-se definir os seguintes parâmetros (DEGARMO, BLACK e KOHSER 1997, p. 533-568):

- A seleção de uma máquina-ferramenta que vá definir a performance do processo.
- Os parâmetros das ferramentas de corte selecionadas que vão depender da geometria e do material que elas possuam.
- Os parâmetros e propriedades da peça de trabalho.
- Os parâmetros de corte selecionado (velocidade, avanço e profundidade de corte).
- Os parâmetros do dispositivo de fixação da peça de trabalho ou porta-peça.

Por isso, busca-se envolver o monitoramento e controle implantados nas máquinas-ferramentas com todas as variáveis acima mencionadas com o intuito de identificar as condições de usinagem e do estado da máquina-ferramenta.

1.3.2. Consumo de energia no processo de usinagem

Com o fenômeno de usinagem antes apresentado, se faz imprescindível conhecer a energia necessária e a potência demandada pelo sistema da máquina-ferramenta. A usinagem é um processo de deformação que consome energia, para o qual ainda hoje existem tentativas de criar um modelo adequado que o explique e que permita predizer com exatidão três aspectos fundamentais: a forma do cavaco, as forças existentes e as temperaturas de corte. Embora o processo de usinagem não possua um modelo matemático perfeito que possa representá-lo,

as várias tentativas mostram os elementos básicos que intervêm nele, como no esquema da Figura 19, pois os modelos permitem prever condições do processo de interesse (força, temperatura, etc.) e o entendimento intuitivo da relação entre as entradas e as saídas. Fenômenos complexos frequentemente exigem a combinação de modelos empíricos com bases teóricas.

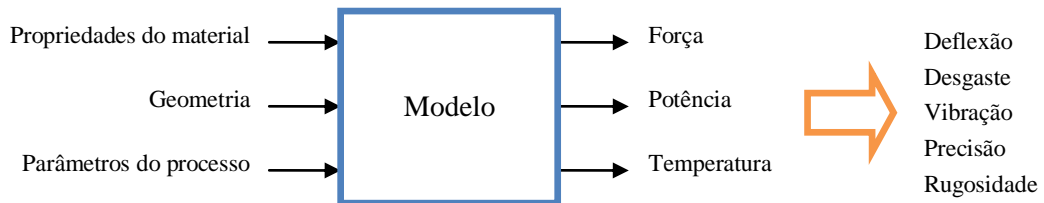


Figura 19: Entradas e saídas nos modelos de usinagem

Fonte – Autor

1.3.2.1. Modelo básico de formação de cavaco

O modelo a seguir começou a ser formulado no século XIX e hoje é conhecido como modelo de Merchant (1941). O modelo considera o cisalhamento do material localizado em um plano chamado plano de cisalhamento, o qual se acha inclinado de um ângulo ϕ da direção de corte, chamado ângulo de cisalhamento. Obviamente, não se trata de um plano, já que se o fosse, se produziria uma velocidade de cisalhamento infinita. No entanto, pode-se considerar uma zona muito estreita ou fina (ULLMAN 1997, LÓPEZ DE L.M., SÁNCHEZ G. e LAMIKIZ M. 2004, P. 25-33).

A Figura 20 mostra as principais construções gráficas do modelo, a decomposição das forças e das velocidades no círculo de Merchant.

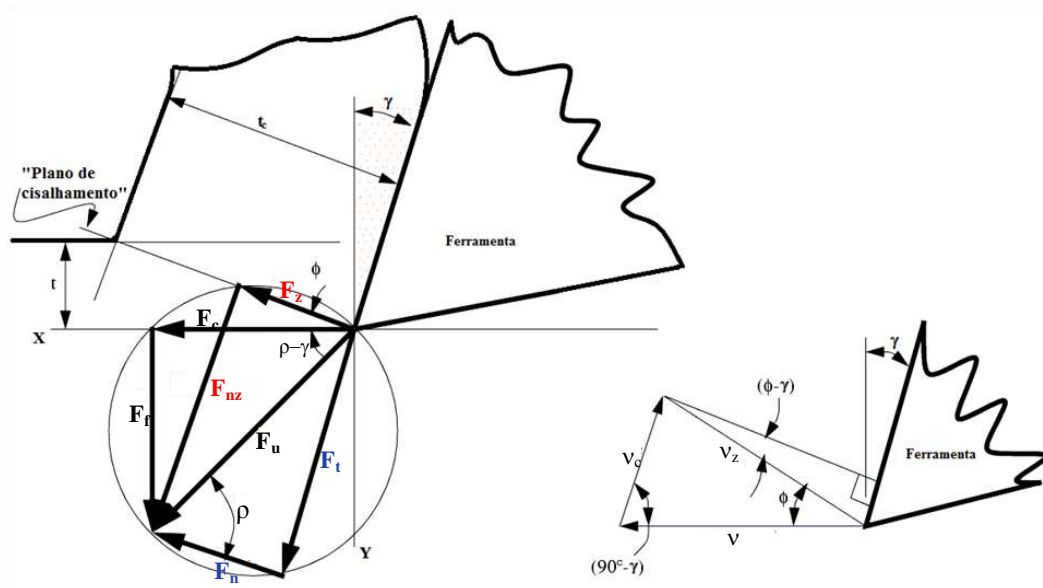


Figura 20: Modelo de formação de cavaco

Fonte – Adaptado de (LÓPEZ DE L.M., SÁNCHEZ G. e LAMIKIZ M. 2004, p. 28, COELHO, et al. 2009, pp. 79-80)

A força de usinagem $F_u[N]$, que é a força total exercida entre a ferramenta e a peça, decompõe-se em:

$F_c[N]$: Força de corte ou tangencial tem o mesmo sentido e direção da velocidade de corte v [m/min].

$F_f[N]$: Força de avanço tem o mesmo sentido da velocidade de avanço v_f [mm/min].

Se a força se decompõe na direção da face de desprendimento e na sua perpendicular, tem-se:

$F_n[N]$: Força normal à superfície de saída, que origina uma compressão na ferramenta.

$F_t[N]$: Força de atrito

Por último, se a força se decompõe no plano de cisalhamento e a sua normal, têm-se:

$F_z[N]$: Força de cisalhamento

$F_{nz}[N]$: Força normal ao plano de cisalhamento

Pode-se decompor a velocidade de corte v [mm/min] em velocidade de cavaco v_c [mm/min] e velocidade de cisalhamento v_z [mm/min].

$$v_c = \left(\frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \gamma)} \right) v \quad \dots(24)$$

$$\mathbf{v}_z = \left(\frac{\cos \gamma}{\cos(\phi - \gamma)} \right) \mathbf{v} \quad \dots(25)$$

Depois do modelo de Merchant, que mostrou algumas limitações quando da mudança de material, têm sido propostos muitos outros modelos, como o modelo de Lee e Shaffer (1951), de Shaw Cook e Finnie (1953), de Hill (1954), de Palmer e Oxley (1959), de Oxley e Welsh (1963) e a teoria de Dautzenberg, Veenstra e Wan Der Wolf (1981), entre outros. Contudo, esses modelos hoje se desenvolvem mediante métodos numéricos.

1.3.2.2. Modelo da potência consumida e da temperatura no processo

A maior parte da energia consumida torna-se calor no processo de usinagem. Deve-se trazer à memória que calor é distinto de elevação térmica. Por essa razão, em muitas aplicações, o aspecto a se considerar é a temperatura que atinge a ferramenta durante a usinagem (LÓPEZ DE L.M., SÁNCHEZ G. e LAMIKIZ M. 2004, p. 33-36). Por isso o interesse em predizê-lo e medi-lo.

A potência total consumida, isto é a energia por unidade de tempo, é a somatória da potência produzida pelo cisalhamento P_z e pelo atrito P_t , equação (26), onde o calor se distribui à zona de cisalhamento, à zona de contato ferramenta e peça, e à zona terciária como se mostra na Figura 21. Ou seja, o calor transporta-se no cavaco, transmite-se à ferramenta e conduz-se à peça. A obtenção da distribuição de calor ao longo de cada uma das zonas de cada forma é o objetivo de diversas pesquisas experimentais que nas suas conclusões observam que a maior parte do calor evacua com o cavaco. Para López de Lacalle e outros (2004, p. 25-26) as proporções da distribuição de calor na zona de cisalhamento, na zona de contato e na zona terciária são: 80%, 18% e 2%, respectivamente.

$$P = P_z + P_t \quad \dots(26)$$

Por outro lado, a potência total também equivale à expressão da equação (27), em que a potência fornecida pelo eixo-árvore é proporcional à força de corte F_c e a sua velocidade v , sendo que a força de corte é aquela força necessária para arrancar uma unidade de material. (LÓPEZ DE L.M., SÁNCHEZ G. e LAMIKIZ M. 2004, p. 32)

$$P = F_c \cdot v \quad \dots(27)$$

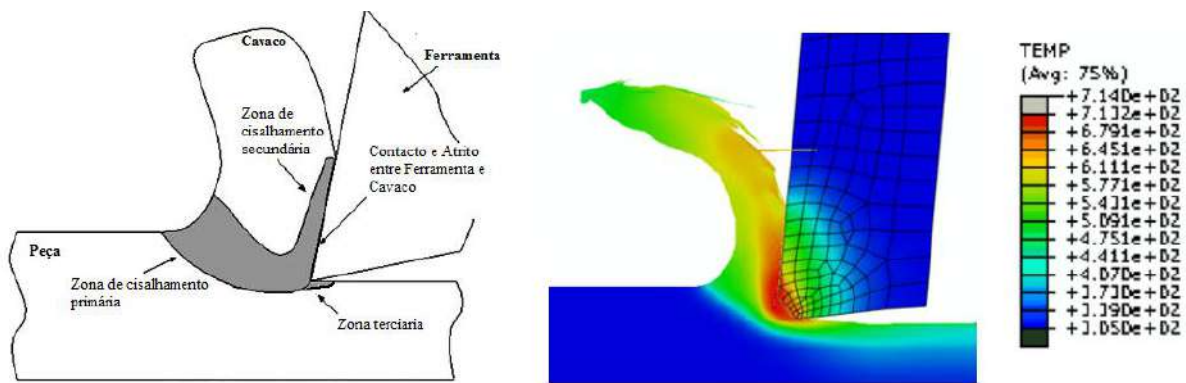


Figura 21: Zonas de cisalhamento no processo de usinagem

Fonte – (CERVELIN 2009, p.26 e 97)

1.3.2.3. Modelos atuais

Conforme Lopéz de Lacalle e outros (2004, p. 229-254), para o estudo dos distintos problemas de simulação existem atualmente dois grupos de modelos: os numéricos e os empíricos.

- Numéricos, em sua maioria baseados na técnica dos elementos finitos (*FEM, Finite Element Method*): sendo simulações longas e custosas computacionalmente, buscam obter as forças de usinagem e, principalmente, os mapas térmicos na ferramenta de corte (Figura 21), com o objetivo de melhorar o desenho das ferramentas e obter o maior número de informações possíveis do processo. O maior problema desses métodos reside na falta de exatidão por causa da dependência de suposições e simplificações ainda não amplamente aceitas. Esses modelos são conhecidos também como modelação da interação ferramenta e peça do tipo Oxley.
- Empíricos ou mecanísticos: Esses modelos caracterizam o binômio material-ferramenta mediante coeficientes específicos de corte que em expressões matemáticas os relacionam com a secção do cavaco e com o comprimento da aresta de corte. Executam-se em poucos segundos, porém somente obtêm as forças de corte sem as temperaturas. São úteis para o cálculo da potência consumida, para dimensionar o eixo-árvore e as máquinas, e para a definição de tipos de usinagem que diminuam erros dimensionais. A grande dificuldade é a necessidade de fazer ensaios de caracterização experimental longos, prévios a seu uso.

Em vista dos modelos apresentados, o processo de usinagem precisa de energia para alimentar a força exercida pela ferramenta para remover material, o que significa atingir as

velocidades de avanço, assim como também para responder ao atrito e lidar com a dissipação do calor que dependem do material, do volume e das condições de usinagem, visando a sustentabilidade.

1.3.3. Usinagem sustentável

A usinagem, como todo processo de fabricação, depende fortemente da sua tecnologia e naturalmente influi nas esferas da sustentabilidade. Pesquisadores identificaram fatores que lhes permitiram propor a usinagem sustentável. Esta proposta estaria conformada por seis elementos básicos que interatuam conforme a Figura 22, embora estes elementos sejam de natureza determinística e não determinística (GRANADOS, JAWAHIR e FERNANDEZ 2009, JAWAHIR e DILLON Jr 2007).

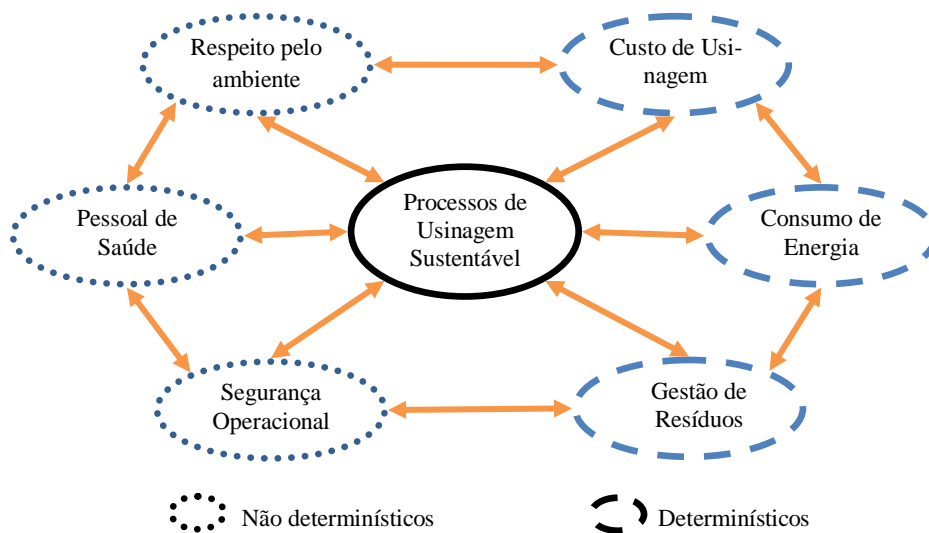


Figura 22: Elementos básicos da usinagem sustentável

Fonte – JAWAHIR e DILLON, 2007

De acordo com o fluxograma da Figura 22, é possível avaliar a sustentabilidade da usinagem, sendo que esta se baseia no aspecto econômico, ambiental e social:

- **No aspecto econômico.** O custo da usinagem de uma peça vai depender do seu projeto. Projetos complexos devem ser evitados para reduzir o tempo de usinagem e, consequentemente, aumentar a taxa de produção. Porém, a capacidade de operação, em termos da precisão e integridade da superfície, deve ser considerada para a escolha da melhor combinação de tecnologia, máquina-ferramenta e operação, tarefa que fica sob responsabilidade do projetista da peça (YOUSSEF e EL-HOFY 2008, p. 10). Por outro lado, um cres-

cente número de clientes da indústria de máquinas-ferramentas tem avaliado seu investimento através da comparação do custo-efetividade, ou seja, o “custo do ciclo de vida” (WAWERLA 2008). Todavia, o esforço por uma produção mais efetiva e econômica pode se enfraquecer caso o projeto da máquina-ferramenta não possua o mesmo foco, ponto chave para a abordagem da presente pesquisa.

- **No aspecto social.** As pesquisas atuais estão direcionadas às fontes de danos à saúde do trabalhador durante o processo de usinagem. Fontes como o ruído, as partículas que provêm do cavaco e principalmente daquelas que se originam do fluido refrigerante.

Aprofundando nos estudos feitos a respeito dos efeitos nocivos ao meio ambiente pelo fluido refrigerante, percebe-se que estes surgem pela degradação e geração de emissões durante seu uso e deposição final. Durante o tempo de vida, a composição do fluido refrigerante vai mudando com o acréscimo de bactérias (mistura de água 95% e fluidos 5%), partículas de metal e óleo do cárter (óleo hidráulico e de lubrificação da máquina). O fluido refrigerante em contato direto com a pele ou sua inalação, seja ao tocá-lo ou borrifá-lo, causa danos à saúde, podendo causar foliculite, *oil acne*^a, ceratose e dermatite de contato irritativa ou alérgica. Também, quando a máquina-ferramenta possui uma má ventilação, o trabalhador fica exposto à inalação do fluido refrigerante, o qual pode causar irritação aguda do trato respiratório, asma, bronquite crônica e disfunção pulmonar. (I. AVRAM 2010, p. 5-6, DAHMUS 2007, p. 28-30)

- **No aspecto ambiental.** A poluição e o aquecimento global são duas questões a se resolver, nas quais, com o intuito de medi-las, se normaliza em unidades de massa de CO_2eq o que pode ser calculado mediante a metodologia da ACV. Assim, durante a usinagem, fase de uso da máquina-ferramenta, têm-se sob consideração o consumo de energia e a geração de resíduos pela ação da usinagem.

Ferramentas que possam ajudar na medição da sustentabilidade em processos como a usinagem são difíceis de encontrar e/ou ajustar. No entanto, o impacto ambiental do processo da usinagem acaba tendo suas implicações também no aspecto social e financeiro. Por outro lado, os impactos no meio ambiente não se dão somente durante o uso da máquina-ferramenta, mas sim durante todo o seu ciclo de vida.

^a Acne originada pelos óleos minerais.

1.4. Tecnologia de usinagem

A tecnologia de usinagem abrange um amplo leque de aspectos que devem ser entendidos para a seleção de uma tecnologia existente. A máquina-ferramenta, as ferramentas e os acessórios determinam a natureza da operação de usinagem útil para um determinado material. Conforme a Figura 23, as peças devem ser trabalhadas com a tecnologia que no nível de exatidão, de textura e de integridade da superfície, satisfaçam o designer do produto e evitem a necessidade de tratamento pós-usinagem, que, por sua vez, essa tecnologia mantenha os custos de usinagem aceitáveis (YOUSSEF e EL-HOFY 2008, p. 5-8).

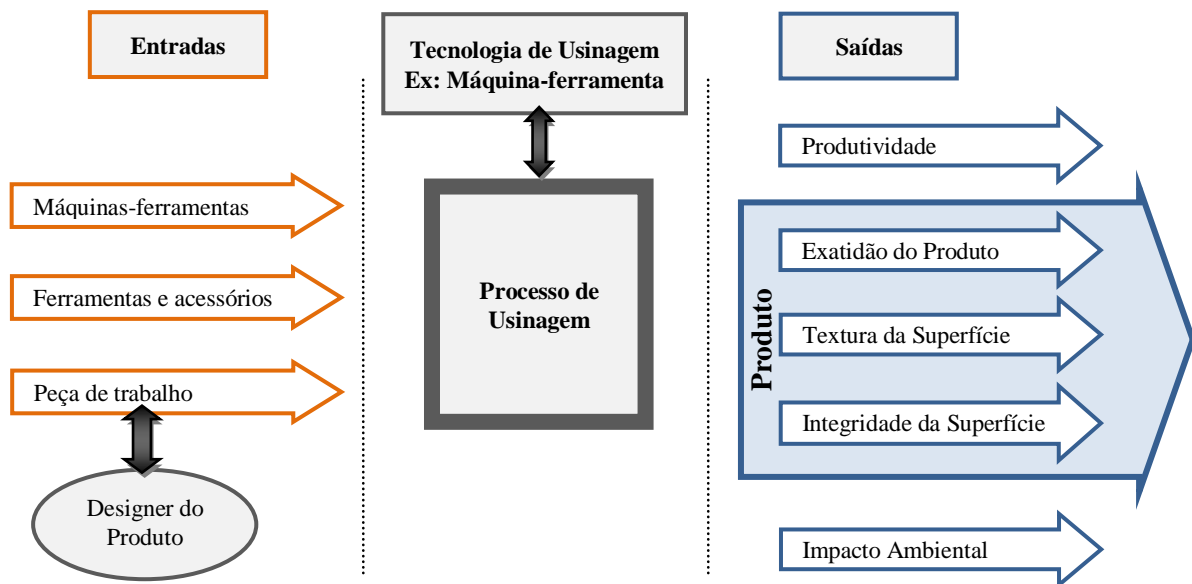


Figura 23: Aspectos gerais da tecnologia da usinagem

Fonte – Adaptado de YOUSSEF e EL-HOFY, 2008, p. 8

1.4.1. Máquina-ferramenta

O processo da usinagem é feito por meio da máquina-ferramenta, a qual causa o movimento da ferramenta e da peça de trabalho com o intuito de produzir uma forma ou superfície geométrica determinada (CHRYSSOLOURIS 2005, p. 128). Então, o que se vê no chão de fábrica são máquinas-ferramentas que servem à fabricação executando a usinagem de uma peça, basicamente o trio: peça, ferramenta e máquina-ferramenta; os quais são, em princípio, uma unidade em que o dispositivo tem um grande destaque (WITTE 1998, p. 48).

Historicamente, as máquinas-ferramentas, executoras dos processos de usinagem, evoluíram muito após a revolução industrial. Em 1797 Henry Maudslay desenvolveu um torno que contém os quatro principais conceitos das máquinas-ferramentas: uma armação ou estrutura de metal, guias alinhadas lisas para o movimento do carro porta-ferramenta, engrenagens intercambiáveis e um mecanismo roscado de alimentação. No decorrer dos anos muitas melhorias com respeito à automação do processo de usinagem foram desenvolvidas. Nos anos 1970s, o microprocessador chegou a ser a inteligência do mecanismo de controle e o CNC foi plenamente desenvolvido substituindo o mecanismo controlado mecanicamente. Nos anos 1980s, com o *Direct Numerical Control* (DNC) desenvolveu-se a fabricação de máquinas-ferramentas mais versáteis, como os centros de usinagem, os quais aumentaram a precisão e uniformidade do produto. Já com a introdução da arquitetura aberta dos anos 1990s, foi possível integrar máquinas-ferramentas em sistemas de fabricação inteligentes (LÓPEZ DE L. e LAMIKIZ 2009, p. 1-8, CHILDS, et al. 2000, p. 10, YOUSSEF e EL-HOFY 2008, p. 4). Em síntese, a máquina-ferramenta atual é o resultado da soma da máquina-ferramenta tradicional com o sistema de controle numérico.

Todavia novos avanços nos últimos dezesseis anos definem mais apropriadamente a máquina-ferramenta – exceto as para processo de conformação – como “um mecanismo espacial servo-controlado que orienta e dirige uma ferramenta de corte ao longo de uma trajetória complexa para a criação de uma nova forma na matéria-prima” (LÓPEZ DE L. e LAMIKIZ 2009, p. 1-2). Portanto, a função básica da máquina-ferramenta, tal como definido por Lopez de Lacalle e Lamikiz (2009, p. 8), é mover uma ferramenta na mencionada trajetória, porém com suficiente precisão e resistindo às forças do processo de remoção de material. Com isso, a máquina-ferramenta é capaz de fabricar diferentes tipos de componentes mecânicos de trabalho, em distintas faces da mesma peça.

1.4.2. Elementos da máquina-ferramenta

As máquinas-ferramentas são formadas basicamente por uma estrutura, acionamentos principais e secundários, e dispositivos auxiliares (CHRYSSOLOURIS 2005, p. 138). Tipicamente, a máquina-ferramenta é uma estrutura que dá suporte aos componentes da máquina fornecendo rigidez, aos mecanismos cinemáticos e atuadores os quais geram o movimento necessário das ferramentas e mesas, e aos vários sensores de retroalimentação (SHIN 2004). De forma mais detalhada ainda, os elementos que constituem as máquinas-ferramentas segun-

do Youssef e El-Hofy (2008, p. 12-13) e Horst Witte (1998, pp. 50-127) são agrupados da seguinte maneira:

- Estrutura, formada pelo leito ou base, a coluna e a armação
- Guias e sistemas de fixação de ferramentas
- Elementos de sujeição da peça de trabalho
- Eixo-árvore e seus rolamentos
- Mecanismos de acionamento da peça e das ferramentas
- Comandos de acionamento e de controle

A seguir a descrição dos componentes nos grupos mencionados:

1.4.2.1. A estrutura

As funções da estrutura da máquina-ferramenta são suportar os componentes, resistir às forças do processo e manter a rigidez para garantir a precisão, além de alcançar o máximo nível de amortecimento e a mínima distorção térmica (LÓPEZ DE L. e LAMIKIZ 2009, p. 16-23). Pode-se afirmar, alternativamente, que suas funções são resistir às cargas estáticas e dinâmicas, dar estabilidade e precisão aos componentes móveis, resistir ao uso das guias, dar liberdade às tensões residuais e ter amortecimento à vibração (YOUSSEF e EL-HOFY 2008, p. 13).

A estrutura, embora varie em forma e em tamanho, costuma possuir leito, coluna e armação (YOUSSEF e EL-HOFY 2008, p. 12). Tais componentes da estrutura constituem o corpo da máquina, podendo ser uma única peça ou a montagem de várias. Toda a armação é fixada no piso da oficina com suportes isolantes à vibração e a base é onde todos os outros os componentes se apoiam.

Além disso, esses componentes estruturais estão ligados uns aos outros com movimento relativo entre eles. Por isso a interface desses elementos tem de ser bastante rígida e amortecida na direção perpendicular, de forma que possam deslizar suavemente (LÓPEZ DE L. e LAMIKIZ 2009, p. 16)

Duas características são importantes na estrutura da máquina-ferramenta: as estáticas e as dinâmicas. As primeiras dizem respeito à flexão constante sob forças de corte operacionais constantes, ao peso dos componentes móveis, ao atrito e às forças de inércia, que afetam a

precisão; comumente medidas pela rigidez estática. As características dinâmicas surgem pela deflexão dinâmica e pelas frequências naturais que afetam a vibração da máquina-ferramenta e em consequência a estabilidade da operação (YOUSSEF e EL-HOFY 2008, p. 14).

O grau de rigidez é necessário para minimizar a flexão e, dessa forma, os níveis de tensão nos elementos estruturais são mantidos em valores insignificantes. Afortunadamente, o ferro fundido cinzento possui uma excelente propriedade de amortecimento de vibrações e as partículas de “grafite livre” proporcionam certa lubrificação inerente. O alumínio fundido, por sua vez, possui a vantagem de ter baixa densidade e inércia reduzida em elementos de suporte de equipamentos de alta velocidade (VALLANCE 1997, p. 320-322).

Para López de L. e Lamikiz (2009, p. 18-19) e Witte (1998, p. 50), a estrutura deve ser rígida, leve e fácil de fabricar. Rígida porque, por um lado precisa ter uma forma estática, enquanto, por outro, precisa ser dinâmica para ter um limite de vibrações. Através dessas características se consegue a precisão. Para tanto, quatro tipos de materiais são comumente usados:

- Ferro fundido cinzento, geralmente utilizado pela sua estabilidade, alto amortecimento e economia. O ferro fundido nodular apresenta maior rigidez. Já o aço fundido é usado no cabeçote fixo do torno.
- Estruturas soldadas são usadas em máquinas grandes devido a problemas de fundição ou tempos de produção pequenos. A falta de amortecimento e o comportamento não homogêneo nas junções soldadas são suas principais desvantagens.
- Concreto polimérico, também conhecido como “mineral fundido”, de grande amortecimento, porém de baixa condutividade térmica. Em alguns casos esse material pode reforçar o ferro fundido.
- Granito, usado pela sua rigidez, a qual assegura alta precisão na máquina e no acabamento, como o torneamento e polimento de vidro.

De acordo com a forma e tamanho da máquina-ferramenta são projetadas as mesas, colunas e suportes.

1.4.2.2. Guias e sistema de fixação de ferramentas

As guias lineares são unidades deslizantes cujo acionamento baseia-se na translocação, elas obviamente guiam, mas não se acionam. As guias lineares são geralmente fixas na base, de modo que o movimento de trabalho da mesa é guiado linearmente. As guias devem conduzir a mesa de avanço sobre a ação de uma força e detê-la em qualquer posição da guia. Para tanto deve ter um eventual desgaste equilibrado, um deslizamento suave livre de tensão e deve ter a atuação de uma lubrificação garantida. Podem se apresentar guias cilíndricas, planas, prismáticas, etc. sendo feitas geralmente de ferro cinzento fundido. (WITTE 1998, p. 321-322)

Para a fixação de ferramentas, esse sistema possui dispositivos utilizados no deslocamento linear, circular ou incremental de ferramenta. Podem se tomar como exemplos o carro transversal e longitudinal com guias lineares no torno, o porta-ferramenta e os dispositivos auxiliares como cones para fresas e pinças de aço, entre outros. (WITTE 1998, p. 51)

1.4.2.3. Elementos de sujeição da peça de trabalho

Para a fixação de peças, esse sistema possui também dispositivos utilizados no deslocamento linear, circular ou incremental de peças. Como exemplo, têm-se o fuso principal de um torno e dispositivos auxiliares, como a placa de três castanhas, a morsa e o porta-peça, entre outros, seja para a usinagem ou para a centragem da peça, como é no caso do torno. (WITTE 1998, p. 51)

1.4.2.4. Eixo-árvore, mancais e rolamentos

O eixo-árvore ou cabeçote está conformado geralmente pelo motor *spindle* e o fuso principal. O fuso principal possui uma guia giratória para rotar uma ferramenta ou peça. O acionamento desse conjunto baseia-se na rotação. A guia circular guia o movimento, mas não o aciona, assumindo o comportamento de um mancal, pois recebe a força que é transmitida do fuso para a carcaça. O fuso principal recebe a força da usinagem e precisa manter a precisão exigida na peça, deve, por isso, ser rígido, possuir a resistência suficiente às vibrações, à flexão e às forças axiais, e estar bem alojado, de modo que possa suportar altas rotações. (WITTE 1998, p. 315-317)

Esse grupo apresenta também mancais de deslizamento e rolamentos. Os mancais são feitos de metal branco ou bronze e servem para o amortecimento das vibrações através de uma película de óleo. Os rolamentos podem ser esféricos ou cilíndricos, segundo o modo de transmissão de força radial ou axial. (WITTE 1998, p. 318-319)

1.4.2.5. Mecanismos de acionamento da peça e das ferramentas

Em princípio, o acionamento na máquina-ferramenta, como apresentado na Figura 24, envolve motores, redutores, porta-ferramentas e porta-peça (Figura 24-a). A mesa de avanço e o fuso são o fim do acionamento da máquina (Figura 24-b, 24-c).

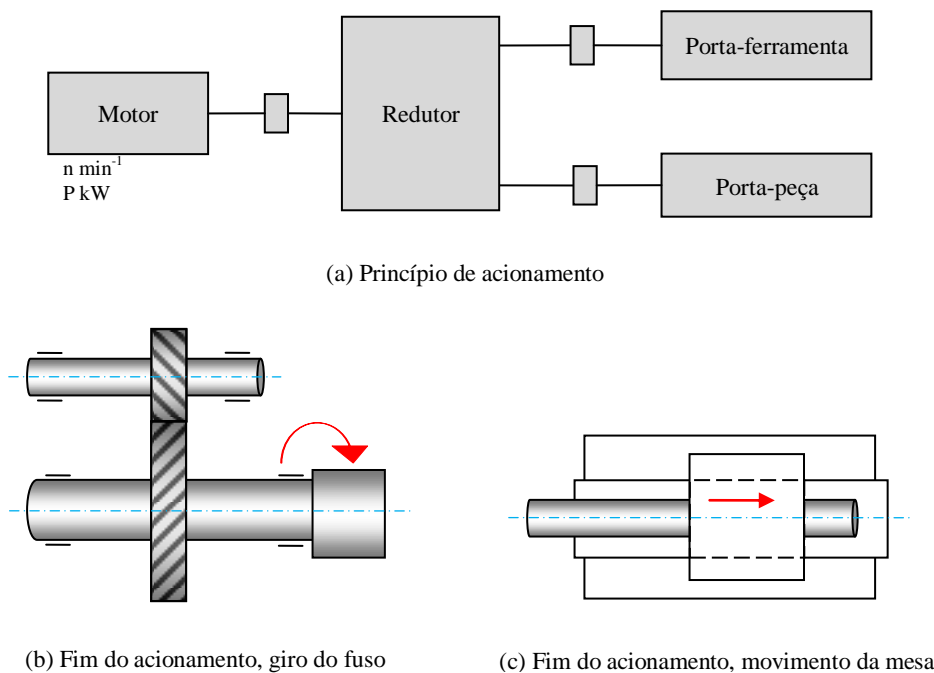


Figura 24: Acionamento na máquina-ferramenta

Fonte - (WITTE 1998, p. 53)

O motor é a origem ou a fonte dos acionamentos, que podem ser para movimentos de corte, movimentos de fixação, ou similares. Um motor em comum pode acionar todas as unidades de movimento. Mas também, quando todo movimento individual é produzido por motores independentes, é possível um entrelaçamento elétrico. Sabe-se, além disso, que a potência do motor e a sua relação de rotação são igualmente fornecidas para os demais elementos da máquina-ferramenta com o intuito de ser acionados. Necessários são também os acoplamentos

ou polias dentadas como elementos de conexão ou para a transmissão articulada. (WITTE 1998, p. 51-53)

O acionamento da máquina-ferramenta abrange essencialmente o acionamento da peça e o acionamento da ferramenta. Sabe-se que em um câmbio mediante o mecanismo de avanço, ambas as tarefas poderiam ter as mesmas dimensões ou não. Acionamentos lineares junto a câmbios comutadores (tipo alavanca) possibilitam os mecanismos de avanço. Pode-se citar como acionamento linear o mecanismo para fuso de roscado e o acionamento por cremalheira. A rotação do fuso de roscado é deslocada em um sentido de translação axial, através de fuso de esfera recirculante (*Spindelmutter*). O acionamento por cremalheira é ativado basicamente por um par de engrenagens, em que a roda maior trabalha finitamente sobre o corte de um eixo sem fim. Como câmbio comutativo têm-se as trocas de engrenagens, para a correção da transmissão, e tem-se também o câmbio com engrenagens corredeças. (WITTE 1998, p. 92-103)

No referente aos mecanismos de avanço, cabe citar alguns exemplos: no torno universal o mecanismo de avanço é complexo, pois precisa de um avanço progressivo aritmético exato sobre o fuso principal (eixo-árvore) para a usinagem da rosca, e precisa de um avanço progressivo geométrico sobre o fuso para o avanço no comprimento e faceamento; na fresadora, o movimento de translação da mesa é produzido por um fuso de esferas e o acionamento inicia-se com um motor elétrico. (WITTE 1998, p. 92-103)

Os câmbios são tarefas essenciais do conjunto de acionamentos para a correção do número de rotações. Eles podem ser acionados direta ou indiretamente por um motor e trabalham uma peça ou uma ferramenta de acordo a necessidade. Os câmbios mecânicos se baseiam no princípio do cone, já os câmbios hidráulicos a troca de transmissão é feita através do óleo hidráulico (aplicação de alta pressão no óleo), o que acontece nas diferentes bombas de fluidos. (WITTE 1998, p. 122-127)

1.4.2.6. Comandos de acionamentos e de controle

Os movimentos da peça e da ferramenta sucedidos através de acionamento estão apoiados em comandos de acordo com o objetivo pretendido, comandos esses que podem ser fixos ou numéricos. Os comandos de acionamento estão distribuídos em toda a máquina, permitindo comandá-la manual ou automaticamente, em aspectos como rotações de fusos ou movi-

mentos de mesas deslizantes. Um exemplo de comando fixo é a válvula direcional, que quando instalada na máquina-ferramenta só pode ser modificada com grande despesa. Em contrapartida, um comando numérico pode ser modificado, por exemplo, através de um apalpador. (WITTE 1998, p. 155)

Entre os comandos de acionamento sobressaem-se, devido à sua grande utilidade, os comandos mecânicos, hidráulicos, pneumáticos e elétricos. A proteção dos comandos dos curtos circuitos é feita através dos travamentos (WITTE 1998, p. 51-52,165). A seguir tem-se uma sucinta descrição de cada um deles:

- Comandos mecânicos: os de atuação manual são manivelas e barras articuladas, entre outros; enquanto que os de atuação automática sucedem-se através de aparelhos que enviam sinais, como curvas excêntricas, comes e também sinais programados. (WITTE 1998, p. 159-164)
- Comandos através da pressão dividem-se em comandos hidráulicos e comandos pneumáticos. Os comandos hidráulicos permitem a transmissão de força grande em pequenos acionamentos. Eles se autolubrificam através do óleo e atingem uma velocidade constante, embora as perdas decorridas no fluxo e nas considerações sobre a viscosidade do óleo. Comandos pneumáticos sobressaem-se pelas altas velocidades de trabalho apesar das baixas pressões, da alta compressibilidade e dos seus efeitos no ambiente de trabalho (umidade atmosférica e desconforto acústico). Com ambos os tipos de comandos, hidráulico e pneumático, consegue-se força e movimento sem modificações, fáceis de automatizar com ordens elétricas e válvulas direcionais nos comandos predecessores. (WITTE 1998, p. 165-174)
- Comandos elétricos: nesse grupo têm-se motores elétricos e dispositivos eletromagnéticos para acionamento e comandos de máquinas-ferramentas. Os comandos elétricos possuem proteção. Uma proteção atua de modo que com uma pequena tensão de comando pode-se ligar ou desligar uma grande tensão principal (WITTE 1998, p. 174-197).

Com todos esses comandos, com ajuda da programação e do conhecimento do operador o processo de usinagem fica controlado.

1.4.3. Tipos de máquinas-ferramentas

As máquinas-ferramentas possuem elementos comuns, mas de acordo com o processo de usinagem, a dimensão da peça de trabalho e outros fatores, surgem variados tipos de máquinas-ferramentas, que de acordo com alguns critérios podem ser classificados conforme o seu campo de aplicação e sob o ponto de vista construtivo.

- Conforme seu campo de aplicação:
 - Para Youssef e El-Hofy (2008, p. 12), o campo de aplicação seria segundo a especialização de fazer peças semelhantes (máquinas-ferramentas universais, especiais) e de fazer poucas operações (máquinas-ferramentas limitadas). Além disso, também poderiam ser classificadas segundo a sua precisão (normal, alta ou elevada).
 - Para Witte (1998, p. 48-50), o campo de aplicação seria por cada tipo de peça, um tipo de máquina-ferramenta, havendo assim: máquinas para múltiplas aplicações (máquina universal, como tornos, fresadora universal), máquinas para várias aplicações, para usinagens semelhantes (tornos automáticos, máquinas de furar e fresar, etc.), máquinas para aplicações específicas para trabalhos idênticos em peças de formatos iguais, e a máquina-ferramenta clássica que trabalha conforme o processo de usinagem e pode ser considerada universal ou especial (tornos, fresadoras, máquinas de plainar, etc.).
- Conforme as características construtivas (WITTE 1998, , p. 327-387) têm-se:
 - Máquinas padronizadas, como as máquinas de toronar, furadeiras e fresadoras, retificadoras e máquinas com movimento principal linear (plaina, máquina de escarear e máquina de serrar).
 - Máquinas especiais para a usinagem de engrenagens, para a fabricação de roscas, para a usinagem de precisão (máquina Honing, máquina de eletro-erosão, furadeira de precisão, etc.) e máquina especial para uma só aplicação (torno para árvore de manivelas, máquinas para usinagem de rodas, etc.).
 - Máquinas para produção. Muitas das máquinas mencionadas anteriormente se enquadram neste item. A característica das máquinas de produção é a automação, a qual possibilita comandar automaticamente o processo de usinagem para uma peça. Trata-se de máquinas semiautomáticas quando a peça precisa ser trocada manualmente e trata-se de uma máquina automática quando a troca da peça também é automática. Sob o enfoque da automação da produção, sobressaem-se os centros de usinagem, que serão

explanados mais adiante, as máquinas *transfers* (máquina-ferramenta que faz o trabalho em série, possuindo uma ferramenta para cada estágio do plano de trabalho consegue usinar várias peças ao mesmo tempo, cada peça em diferentes processos de forma simultânea, efetuando o transporte entre elas automaticamente) e os robôs industriais.

1.4.3.1. Centros de usinagem

Após 1980, com o intuito de resolver o longo tempo para trocar a ferramenta ou *set-up* e a quantidade de troca de ferramentas, no caso peculiar do fresamento, as fresadoras evoluíram para uma máquina mais versátil, a saber, os centros de usinagem (CHILDS, et al. 2000, p. 10-12). O centro de usinagem é uma fresadora CNC com troca automática de ferramentas prontas para furação, fresagem, mandrilamento e rosqueamento. Dado que essa função de troca é automática, são elevados os requisitos de precisão e controle (LÓPEZ DE L. e LAMIKIZ 2009). Atualmente é a máquina mais comum nas oficinas de usinagem.

As características do centro de usinagem podem se encaixar na seguinte definição, “na própria máquina as ferramentas são escolhidas e trocadas, ferramenta e peça são posicionadas, e escolhe-se rotação, avanço e comandos de funções auxiliares” (WITTE 1998, p. 363).

Todo centro de usinagem tem um dispositivo conhecido como magazine de ferramentas, cuja função é alojar certo número de ferramentas (dezenas ou até uma centena). O magazine constitui-se de um fuso ou cabeçote giratório (torre ou revólver) que comporta poucas ferramentas, e de esteiras que arrastam o porta-ferramentas, que contém uma grande quantidade de ferramentas. Mediante o trocador automático de ferramentas efetua-se a troca automática de uma ferramenta no cabeçote por uma no magazine (SILVA, CABRAL e CARVALHO 2001).

Assim, procurou-se reduzir o tempo de *set-up* ao desenvolverem-se máquinas com mais graus de liberdade em seus movimentos que anteriormente. As máquinas foram construídas para inclinar o fuso, trocar ferramentas do magazine automaticamente e intercambiar mesas de trabalho durante a usinagem (CHILDS, et al. 2000, p. 10-12).

A evolução da troca de ferramentas automática em relação às fresadoras faz dos centros de usinagem as máquinas mais importantes no momento de implantar sistemas de usinagem automatizados, tornando-os a pedra angular no sistema de fabricação flexível (CHRYSSOLOURIS 2005, p. 145). Contudo, recentes projetos de centros de usinagem foram

desenvolvidos como complexas máquinas multieixos, diferentemente dos tornos e fresadoras. Tudo isso os conceitua como “máquinas multitarefas”, sendo que eles precisam de altos requerimentos em velocidade e precisão para peças complexas, por um lado, e o controle da energia, por outro. (LÓPEZ DE L. e LAMIKIZ 2009)

Os requerimentos da máquina durante a sua operação são o foco de muitas pesquisas, mas sob a influência da manufatura sustentável, vale a pena analisar a influência do ciclo de vida da máquina-ferramenta em razão da sua operação.

1.4.4. Fases do ciclo de vida da máquina-ferramenta

As máquinas-ferramentas consomem energia desde a sua concepção. A seguir as fases do ciclo de vida na Figura 25.



Figura 25: Fases do Ciclo de Vida da Máquina-Ferramenta

Fonte – Autor

Algumas pesquisas a esse respeito são as seguintes:

- Zulaika e Campa (2009, p. 47-72) explicam que a eficiência de uma máquina-ferramenta é medida em termos de consumo (de energia e materiais) e geração (de lixo e poluição) durante o ciclo de vida. Os pesquisadores concluem que muitos dos impactos ambientais da máquina-ferramenta estão associados ao movimento dos seus componentes móveis. Então, a diminuição de cada grama de material nesses componentes estruturais móveis tem um papel decisivo no impacto ambiental final da máquina. Consequentemente, a estrutura da máquina tem um papel chave na produtividade, na precisão e na ecoeficiência da mesma. Assim, um objetivo para os fabricantes de máquinas-ferramentas é reduzir os impactos ambientais associados às máquinas-ferramentas através do seu ciclo de vida.
- Dahmus (2007) faz um estudo mais abrangente. Ele aborda uma análise ambiental da usinagem, a reciclagem de material fora de uso ou no fim de vida e a efetividade na produção buscando redução nos impactos ambientais, sendo suas conclusões as seguintes: primeiro, na análise ambiental, a energia requerida para a remoção de material pode ser pequena

quando comparada com a energia total requerida. Segundo, na reciclagem consideram-se dois parâmetros: o valor do material usado e a mistura de materiais presentes no produto. E terceiro, os aperfeiçoamentos, ainda que efetivos para redução de impactos ambientais, nem sempre melhoram a produtividade.

- A avaliação na fase de uso do sistema máquina-ferramenta, junto a considerações técnicas, econômicas e ambientais, foi desenvolvido por I. O. Avram (2010), quem propõe estudar os efeitos da área de corte e das principais atividades do sistema máquina-ferramenta, dando toda a consideração à minimização do consumo de fluido de corte e de consumo de energia. O autor propõe também um modelo para a estimação dos requerimentos da energia mecânica do subsistema de corte da máquina-ferramenta, baseado em dados locais de corte, parâmetros de corte e especificações técnicas do eixo-árvore e do avanço. Dita metodologia a programou em *Visual Basic for Applications* e os dados foram trabalhados numa plataforma em ambiente *LabVIEW*.

1.4.4.1. Fase de aquisição de matéria-prima

Os materiais básicos para as máquinas-ferramentas são: ferro fundido cinzento (estrutura, isto é, base e elementos estruturais), ferro fundido cinzento perlítico (guias), concreto polimérico (estrutura, isto é, base e elementos estruturais), aço fundido (elementos estruturais) e aço soldado (elementos estruturais). Já os mecanismos de acionamento (motores de tração, motores lineares e acoplamentos) são fabricados com alguns tipos de aços e outros metais (LÓPEZ DE L. e LAMIKIZ 2009, p. 8).

Para Vallance (1997, p. 320-322) os equipamentos controlados numericamente usam teflon^b e os rolamentos de rolos lineares são feitos em aço endurecido para diminuir o atrito. Fusos, eixos, engrenagens e outros elementos de transmissão de energia geralmente são feitos de aço tratado termicamente. Aços cimentados e temperados são frequentemente usados em cames, guias, trilhos e outros membros sujeitos ao desgaste extremo. Finalmente, com a finalidade de aumentar a resistência ao desgaste ou à corrosão, os revestimentos típicos para melhorar as características de atrito incluem a anodização, o cromo duro, a fosfatização e os revestimentos à base de níquel.

^b Politetrafluoretileno-PTFE

Então, em termos de matérias-primas para a fabricação de máquinas-ferramentas, segundo o projeto dessas, são necessários alguns tipos de aço e ferro fundido, bronze, chapas metálicas e arames de cobre nas conexões elétricas, entre outros metais, ligas e polímeros. Além desses também se encontram os óleos de lubrificação, óleos de refrigeração, assim como os diferentes isolantes derivados do polietileno. A partir disso tudo se pode compreender a grande variedade de matérias-primas que precisam ser tomadas do mercado após sua extração da natureza e/ou sua fabricação na respectiva indústria. Porém, para efetuar a ACV é necessário que se observe todos os detalhes (quantidades e condições de extração e, se for o caso, de fabricação) para chegar aos compostos ou elementos requeridos pela seguinte fase, a fabricação de máquinas-ferramentas.

1.4.4.2. Fase de fabricação

Esta fase se inicia com o projeto e planejamento da máquina-ferramenta, isto é, com o esboço inicial. Nele é representado o esboço dos conjuntos, representando a máquina completa e montada, e o esboço de detalhes. Depois disso é executado o desenho com partes de conjunto e de detalhes. Nesse tipo de desenho se encontra explícita a sequência que será desenvolvida durante o processo de fabricação das peças, levando em consideração os elementos e matérias-primas disponíveis no mercado. Depois são elaborados os planos de fundição, soldagem, medição, usinagem, montagem, etc. Estes planos traçam um roteiro, baseado no desenho de conjunto e de detalhes, que norteia o processo de fabricação aos operadores das máquinas e do controle de qualidade.

Finalmente, com os planos concluídos, executa-se a fabricação. Em empresas grandes, as atividades de fabricação geralmente estão distribuídas em diferentes áreas: área de fundição, forjamento e tratamento térmico, área de conformação mecânica de peças, usinagem e soldagem, área de montagem do painel de comando e área de montagem da máquina-ferramenta, além de outras áreas para a programação do CNC e para o controle da qualidade.

Logo após ter fabricado a máquina-ferramenta, essa está disponível para ser transportada ao cliente. O deslocamento é feito em caminhões de carga com embalagens protetoras. Quando a máquina-ferramenta é grande, é transportada por partes e montada no local do cliente. Em caso de máquinas-ferramentas menores, elas são transportadas completamente montadas.

1.4.4.3. Fase de uso

Diversas pesquisas têm sido desenvolvidas nesta fase da vida da máquina-ferramenta, essencialmente na área do controle e do monitoramento. Os sensores muito têm ajudado na calibração da máquina e no monitoramento do estado da ferramenta. A seguir algumas peculiaridades desta fase:

- Durante a usinagem, pelo efeito rotacional das ferramentas ou da peça de trabalho, as máquinas-ferramentas tendem a se deformar devido à carga estática (pelo peso próprio da máquina e de seus componentes), à carga dinâmica (provocada pela rotação) e às forças de corte geradas na remoção do material (YOUSSEF e EL-HOFY 2008, p. 13).
- Todavia a qualidade é inevitavelmente julgada pela velocidade e pela precisão. O controle e o monitoramento da “usinagem em altas velocidades” são promovidos através de sistemas de medição sem contato (CARTER, et al. 2009, p. 11-12). A respeito da precisão, para garantir que o produto atenda às tolerâncias geométricas, convém diminuir os efeitos de atrito. Para isso, diferentes tipos de fluidos durante a usinagem são utilizados (VALLANCE 1997, p. 320). Porém, a mistura de óleos lubrificantes com o fluido refrigerante diminui a sua qualidade durante a usinagem, levando à sua substituição e descarte, ponto que gera preocupação entre os pesquisadores.
- Durante a fase de uso, a máquina-ferramenta consome constantemente diversos recursos, os quais se agrupam em quatro tipos: energia elétrica, óleos de corte e lubrificação, água e ar comprimido. Cada um contribui para a boa qualidade do produto final quando é distribuído com efetividade durante o processo de usinagem. A obtenção, uso e principalmente o descarte de tais recursos geram diversos impactos ambientais. Como exemplos podem ser citados, durante o uso, a possível poluição pela geração de névoa e a inevitável poluição pelo descarte do óleo. Dessa forma, quantificar esses recursos permitiria saber o que melhorar no projeto, no processo e no uso do recurso. (DIAZ, HELU, et al. 2010). Particularmente saber quanto foi consumido durante o uso da máquina-ferramenta explicaria o impacto ambiental que é gerado por quilograma de material removido.

1.4.4.4. Fase de fim de vida

Devido à grande quantidade de aços e outros metais, as máquinas-ferramentas dificilmente têm sido descartadas na sua totalidade. Atualmente têm sido aproveitadas, mediante a sua reciclagem, as ferramentas e algumas partes da máquina.

Para evitar o descarte, uma proposta é criar máquinas-ferramentas reconfiguráveis, através da metodologia do projeto modular. Isto é, o projeto orientado ao aspecto da funcionalidade e ao aspecto da construção, embora esses aspectos não atinjam todo o propósito da reconfiguração das máquinas-ferramentas por não serem integrados. No aspecto funcional, os módulos são projetados em termos das funções que vão satisfazer ao usuário pela simples adição ou subtração de módulos. No aspecto da construção, o projeto procura facilitar a fabricação, ensablagem e transporte da máquina-ferramenta durante o seu ciclo de vida. Contudo, a reconfiguração modular refere-se à maneira de que os módulos são padronizados, permitindo assim modificações na configuração funcional e estrutural (PÉREZ, et al. 2004). Essa proposta apresenta dois problemas, a saber, não tem um procedimento claro para a definição das subfunções segundo alguns requerimentos e o método não garante a decomposição coerente das funções dentro das subfunções.

1.4.5. Avaliação do ciclo de vida da máquina-ferramenta

Com o conhecimento do ciclo de vida da máquina-ferramenta, viabiliza-se a aplicação da metodologia da ACV. Essa identifica os materiais, a energia e os resíduos associados ao ciclo de vida de um produto, processo ou serviço, podendo, assim, determinar o seu impacto ambiental (I. AVRAM 2010). Delimitar e quantificar os recursos consumidos e os resíduos e emissões gerados durante cada fase do ciclo de vida da máquina-ferramenta permitem melhorar seu projeto, seu processo e o uso dos seus recursos (DIAZ, HELU, et al. 2010).

Tal como mostrado na Figura 26, a avaliação de impactos ambientais é possível desde que sejam conhecidas as fases do ciclo de vida, em que devem ser quantificadas em um inventário as suas entradas (recursos) e as suas saídas (emissões e resíduos), e logo em seguida, devem ser analisados o inventário e, finalmente, os impactos no meio ambiente.

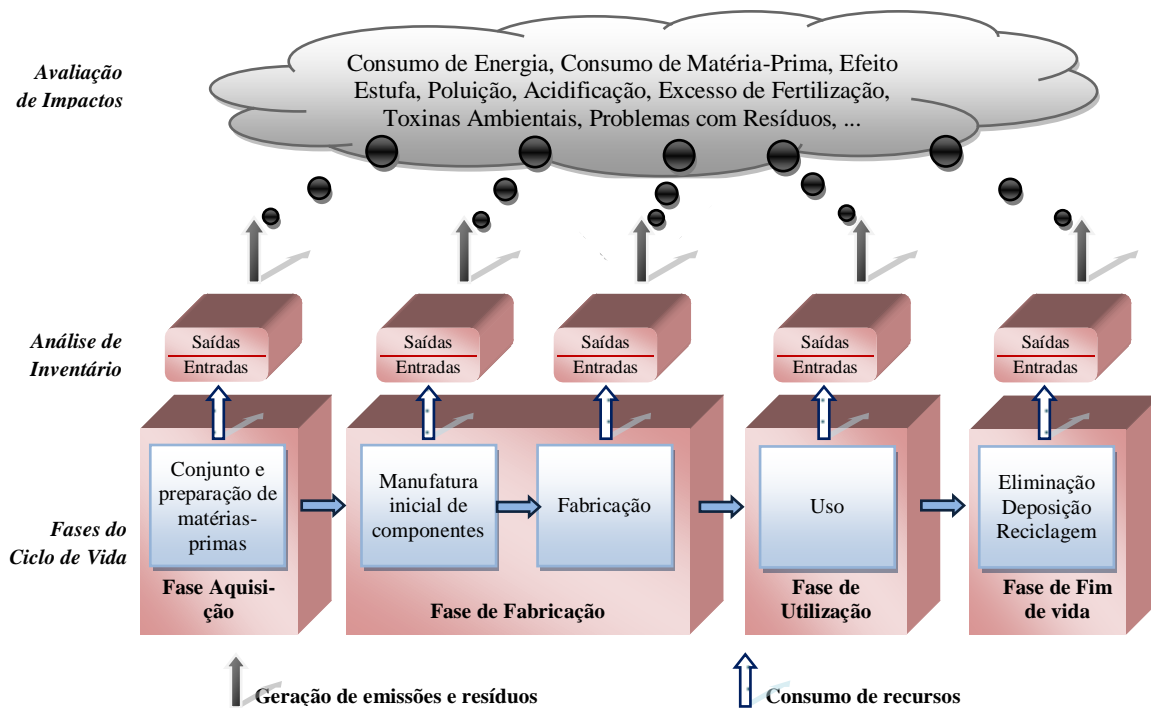


Figura 26: Avaliação do Ciclo de Vida

Fonte – STOFFREGEN, 2008

O objetivo da ACV é comparar o alcance de danos ambientais associados aos produtos e assim definir suas cargas ambientais (GARG e DORNFELD 2008). Para isso, as entradas e saídas do ciclo de vida agrupadas em categorias permitem ter uma ideia clara da dimensão do impacto do ciclo de vida de um produto no meio ambiente. Os impactos são normalmente agrupados em consumo de recursos renováveis, recursos não renováveis e energia. Os potenciais impactos, sob a normalização, são classificados em: aquecimento global (CO_2eq), formação fotoquímica de ozônio troposférico (C_2H_4), acidificação (SO_2eq), eutrofização ($\text{NO}_3^- \text{eq}$), ecotoxicidade e toxicidade humana (WENZEL, HAUSCHILD e ALTING 1997) *apud* (OMETTO 2005).

A ACV pode levar a uma análise inexata dos impactos e a conclusões errôneas devido ao fato de que a metodologia faz uso de um inventário já realizado, o qual não leva em conta as diferenças temporais entre os dados registrados naquele inventário e o tempo de aplicação da ACV de um produto específico. No entanto, caso se integre o aspecto temporal aos dados usados na ACV, se forneceria um suporte mais sólido em termos de gestão, precisão e meio-ambiente (YUAN e DORNFELD 2009), já que suas conclusões dependem da transparência da origem dos dados do inventário do ciclo de vida (BOYD, KRISHNAN e DORNFELD 2006).

Um exemplo de *eco-design* com clara aplicação da ACV foi desenvolvido pelo fabricante de máquinas-ferramentas Nicolás Correa® (2007). Com a identificação dos aspectos ambientais da máquina, conseguiu analisar o uso dos recursos e da energia e posteriormente analisou também a geração de resíduos e emissões. Ambas as análises foram feitas nas diferentes fases do ciclo de vida da máquina-ferramenta, uma fresadora de leito fixo e mesa móvel, marca Anayak e modelo VH-PLUS. Para a análise precisou-se de quantidades certas e da composição química dos componentes dessa máquina. Segundo o escopo da avaliação ambiental o detalhe dos dados é maior ou menor. No caso Nicolás Correa®, para conseguir os impactos ambientais principais causados pela máquina, o nível de detalhe foi meio. A simulação feita com os dados obtidos resultou nas seguintes observações: o principal impacto ambiental está na fase de uso da máquina, por causa do fluido refrigerante, dos óleos de lubrificação e principalmente pelo consumo de energia. Algumas conclusões foram:

- O consumo de energia depende diretamente da aplicação (o material que se usina, ferramentas de corte utilizadas, etc.) e das inércias dos elementos móveis que a máquina possui (carros, eixos, etc.).
- O impacto do fluido refrigerante começa quando este se polui durante o processo de usinagem, poluição que prossegue até que o fluido fique tóxico.
- 90% dos impactos ambientais pertencem à fase de uso da máquina-ferramenta.

Como consequência da análise, os pesquisadores do caso Nicolás Correa®, colocaram alguns objetivos de melhora, ações e indicadores com o intuito de aperfeiçoar a máquina em estudo (Tabela 1).

Tabela 1: Exemplo da otimização de uma fresadora

Objetivo de melhora	Ação	Indicador
Redução da massa	Redesenho da coluna	Kg de massa reduzida
	Fabricação de um protótipo da máquina	
Eliminação do fluido refrigerante como lubrificante	Fabricação de um sistema de lubrificação no interior do cabeçote	Nº Testes satisfatórios
Eliminação do óleo hidráulico	Projeto de um sistema para impulsionar o óleo	Nº Testes satisfatórios
Diminuir o consumo de ar comprimido	Instalar um compressor com variador de frequência (de inversor)	kWh consumido/semana

Fonte – NICOLÁS CORREA, 2007

Os benefícios alcançados após a aplicação dos objetivos de melhora durante a vida útil da máquina-ferramenta (de 20 a 25 anos) foram os seguintes:

- No aspecto ambiental houve uma redução do consumo de recursos naturais em 37,4%: de fluido refrigerante em 4000 litros, de óleo hidráulico em 200 litros e de energia elétrica em 145 600 kWh. Houve também redução da emissão de CO₂ em 458 ton. e resíduos perigosos em 16 ton.
- No aspecto econômico conseguiu-se uma economia de €126 606,00.
- No aspecto técnico aumentou-se o rendimento em 25%, diminuiu-se o tempo de manutenção e aperfeiçoou-se o funcionamento do compressor.

O objetivo da ACV é dar uma medida ambiental aos efeitos do ciclo de vida do produto em que tempo e localização geográfica dos dados sejam considerados, como no caso Nicolás Correa ®. Caso contrário, a ACV não é um método apropriado para calcular o impacto ambiental em um lugar e momento determinados, o que se aplica à máquina-ferramenta em estudo. Além disso, enquanto a manufatura e o fim de vida ficam sob o controle direto do fabricante de máquinas-ferramentas, o uso e a manutenção passam ao controle do usuário, o que faz o impacto ambiental muito mais difícil de avaliar.

1.5. Aperfeiçoamento das máquinas-ferramentas

1.5.1. Sistema da Máquina-Ferramenta (SMF)

Se a função básica da máquina-ferramenta é mover uma ferramenta com suficiente precisão e resistindo às forças do processo, em consequência a máquina-ferramenta também deve atender a duas funções de forma simultânea: à de remover o material e à de controlar a remoção deste (AVRAM, STROUD e XIROUCHAKIS 2010). Então, partindo de um olhar sistêmico deve-se observar o Sistema Máquina-Ferramenta (SMF), de acordo com I. Avram (2010, p. 29-31), como um conjunto de entidades, em que cada entidade interage com – ou está relacionada à – outra entidade. Se considerarmos as interações relevantes, as várias partes do sistema têm tanto uma relação estrutural quanto uma relação funcional entre si, apresentando-se tais relações na Figura 27.

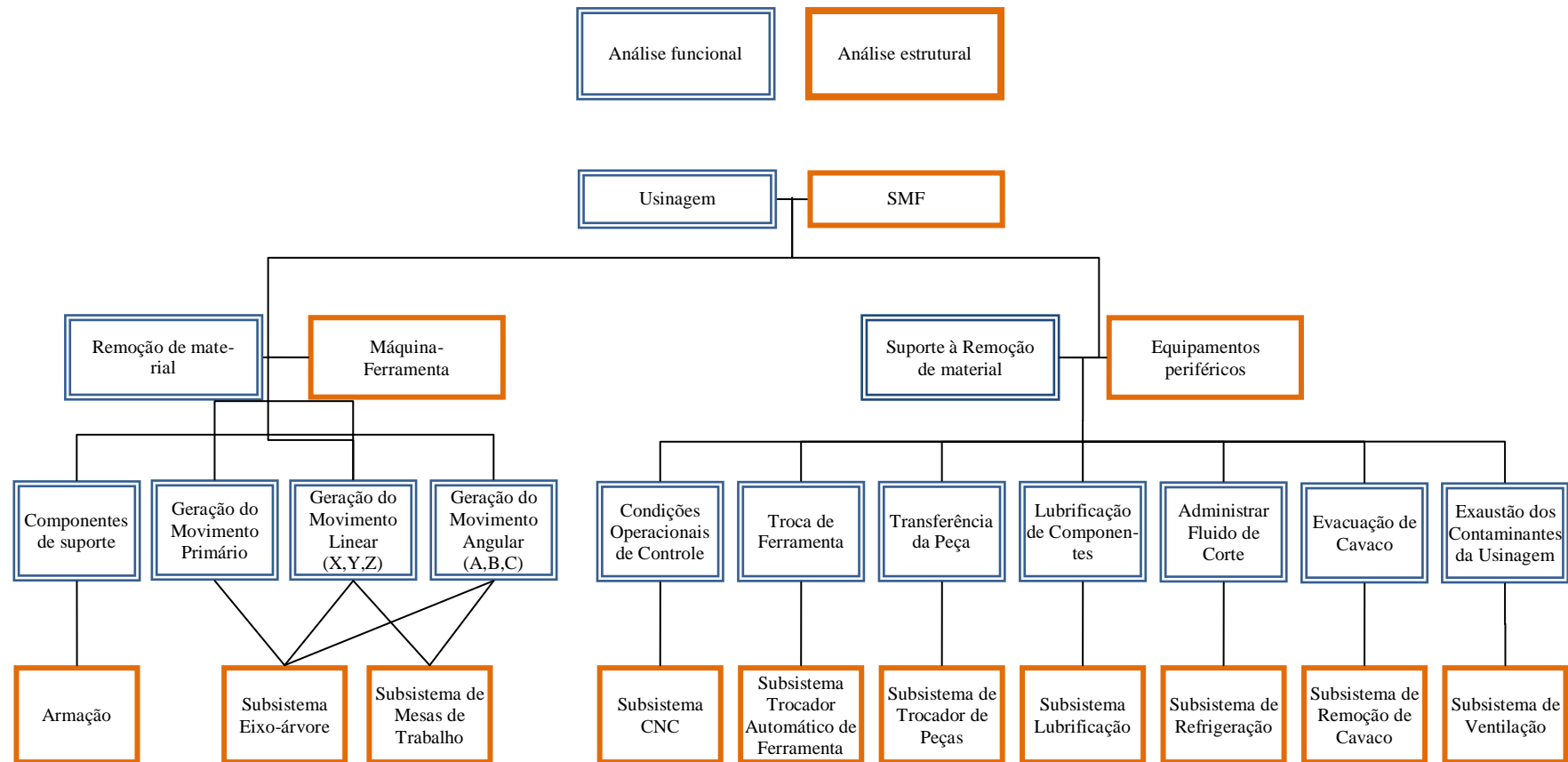


Figura 27: Mapeamento Estrutural-Funcional do SMF

Fonte – I. AVRAM, 2010, p. 29

Nessa Figura, mostra-se que a remoção de material é basicamente efetuada pela interação da armação, do eixo-árvore e das mesas de trabalho X e Y. Porém precisa-se de outros mecanismos, denominados aqui subsistemas, que auxiliem o processo de usinagem. Esses mecanismos periféricos dão suporte à usinagem. As máquinas-ferramentas apresentam vários subsistemas periféricos, geralmente: CNC, de troca de ferramentas, de troca de peças (elemento importante em produção à escala), de lubrificação, de refrigeração, de remoção de cavaco e de ventilação.

No uso cotidiano, toda a complexidade reunida no SMF é valorizada mediante a sua produtividade global, ou seja, pelo seu volume de produção, que é determinada por diversas abordagens que serão apresentadas no item subsequente.

1.5.2. Produtividade das máquinas-ferramentas

Segundo Youssef e El-Hofy (2008, p. 11) e o esquema da Figura 28, a produtividade da máquina-ferramenta é avaliada pelo número de peças produzidas em uma unidade de tempo, pela taxa de remoção volumétrica ou pela taxa específica de remoção em cada unidade de energia consumida.

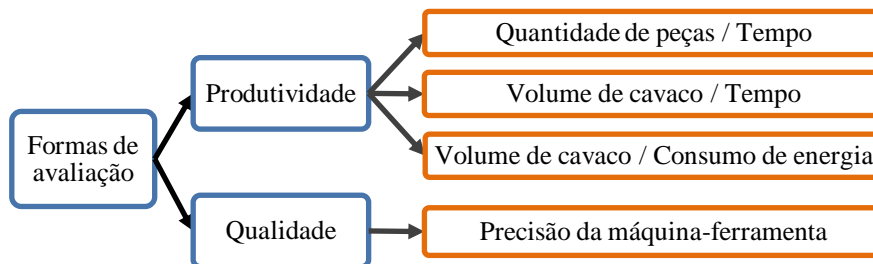


Figura 28: Formas de avaliação da máquina-ferramenta

Fonte – Autor

Isso sugere trabalhar em altas velocidades e ser necessária a remoção de pouco material. A saber, a “taxa de remoção de metal” depende da sua capacidade cinética e dinâmica e especialmente da sua rigidez. Alta rigidez envolve grandes massas, as quais em combinação com altas velocidades e com o suporte às forças inerciais geradas pelos motores permitem alcançar uma maior produtividade, embora algumas vezes demande muita energia e alto consumo de recursos para conservar a precisão desejada (LÓPEZ DE L. e LAMIKIZ 2009, p.

48). Cotidianamente na oficina, o objetivo principal da máquina-ferramenta pode-se resumir em um ditado:

“Contamos quantas peças uma máquina faz por hora e não quantos quilos de cavaco”.

Isso leva a pensar na velocidade de corte otimizada e então conhecer as consequências sobre a qualidade. (WITTE 1998, p. 310)

Em essência, a produtividade da máquina é uma medida da eficiência com que recursos de entrada ao sistema de agregação de valor (como o SMF) são transformados em saídas (principalmente peças sem defeitos). Joseph Juran, bem chamado “Guru da Qualidade” adota duas definições de qualidade: (1) Qualidade são aquelas características dos produtos que atendem às necessidades dos clientes, e por tanto, promovem a satisfação com o produto. (2) Qualidade consiste na ausência de deficiências. (CORRÊA e CORRÊA 2006, p. 171-177, 183). Durante o processo de usinagem a segunda definição é amplamente aplicada, dado que são fabricados nesse processo produtos discretos.

Consoante às definições de Juran, a qualidade é formada durante o processo, que, para o caso da máquina-ferramenta, destaca-se conforme a precisão conseguida na usinagem. A qualidade é mensurável mediante a precisão de medidas, precisão de formas e precisão de superfícies acabadas. Então a qualidade da usinagem depende diretamente da precisão da máquina-ferramenta no decorrer do tempo, a qual é influenciada por quatro diferentes fatores.

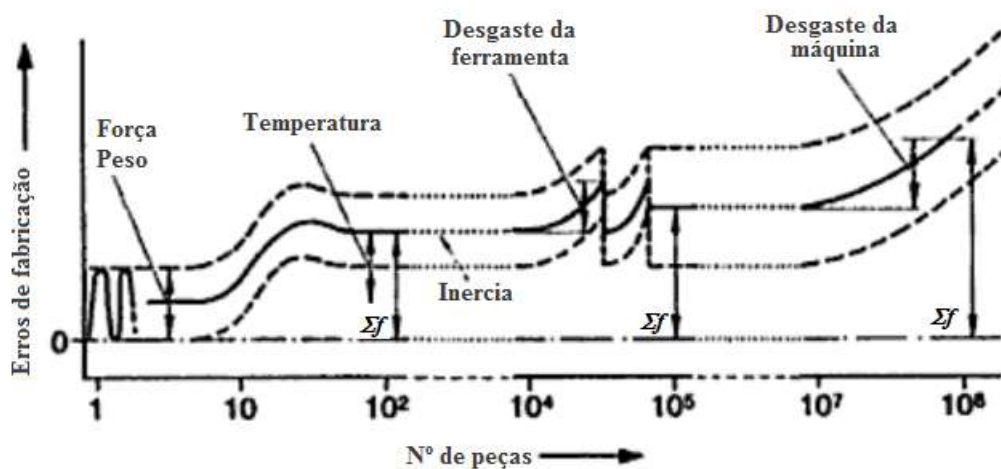


Figura 29: Influência do tempo

Fonte - (WITTE 1998, p. 311)

Como mostrado na Figura 29, esses quatro fatores explicam-se da seguinte forma: inicialmente, o conhecimento da resistência às forças inerciais por causa das forças da usinagem e da interação entre os pesos dos elementos da máquina e a peça de trabalho, permite ao operador estabilizar a máquina. Após aproximadamente duas horas, a temperatura de trabalho alcança um estado permanente, permitindo eliminar alguns erros. Mais tarde, a precisão fica influenciada pelo desgaste da ferramenta, o qual pode ser corrigido pela troca da mesma. Concluindo, para uma continuada dimensão do tempo, percebe-se claramente o desgaste da máquina. Em consequência, no fim de vida da máquina, após aproximadamente 10 ou 20 anos, não existe mais renovação da qualidade. (WITTE 1998, p. 309-311)

1.5.3. Variáveis a considerar no aperfeiçoamento da máquina-ferramenta

A usinagem é aplicada em diversos materiais para criar uma grande variedade de geometrias e superfícies, praticamente sem restrições na complexidade. Sendo assim, como apresentado na Figura 30, a velocidade de corte, a refrigeração e a precisão, são as variáveis que afetam a qualidade do processo e, conseqüentemente, do produto, que é a peça usinada. Embora existam diferentes tipos de máquinas-ferramentas, todas possuem certos elementos básicos que atendem a precisão necessária para a obtenção de peças dentro dos parâmetros projetados, isto é, sem defeitos. Além disso, dependendo do nível de automação da máquina-ferramenta, o monitoramento e o controle das variáveis acima mencionadas podem ser garantidos.

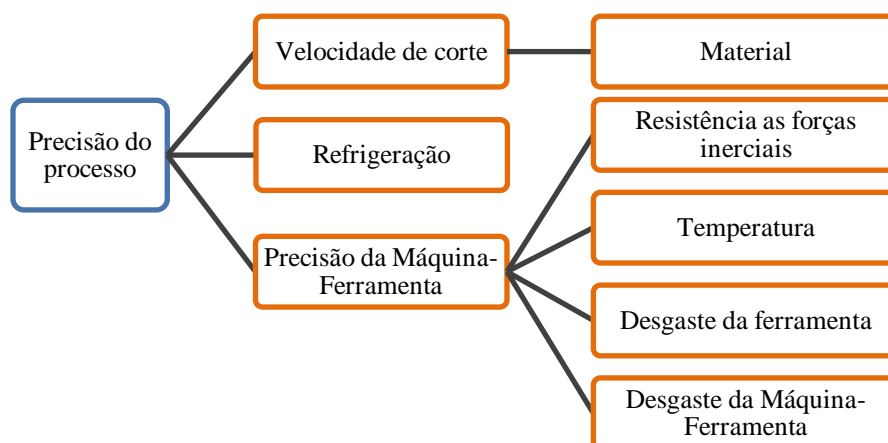


Figura 30: Variáveis que afetam à precisão do processo de usinagem

Fonte – Autor

Previsivelmente no aperfeiçoamento das máquinas-ferramentas, os diferentes pesquisadores abordam três temas importantes: o monitoramento, a modelagem e o design dos dife-

rentes componentes da máquina, junto ao leque de variáveis que afeta a precisão, fim último da máquina-ferramenta.

1.5.4. Aperfeiçoamento do SMF com enfoque no consumo de energia

Quantificar o consumo de energia e identificar os elementos autores de tal consumo, quiçá permitiria determinar as ações disponíveis para melhorar o SMF. A simulação pode ser uma alternativa adequada para a melhoria do consumo de energia durante o processo de usinagem. No entanto, muitos dos métodos de simulação disponíveis não são adequados para essa tarefa. Uma metodologia comum são os “eventos discretos”, caracterizados pelo fato de o tempo da simulação ser descontínuo. Aplicar-se-ia ao caso, se adaptado, o modelo para as operações de usinagem que geram perfis e consumos de energia específicos. O planejamento flexível do consumo de energia com base em simulações numéricas tem por objetivo gerar produtos com o máximo valor acrescentado ao consumo de energia mínimo. Sua flexibilidade depende do desenho e da adaptação de processos.

Um trabalho focado em monitorar o consumo de energia da máquina-ferramenta durante a usinagem conseguiu identificar a energia que é usada, e onde e quando ela é consumida no processo (LODHIA e DRAKE 2008). Porém esta metodologia ainda não tem sido aplicada na indústria. De modo semelhante, foi desenvolvido outro trabalho com a finalidade de diminuir os custos, mas sob o enfoque do Custeio Baseado em Atividades (ABC), no qual foi criado um modelo orientado a objetos para simular, com o intuito de quantificá-los, os fatores de impacto ambiental que ajudem aos *stakeholders*^a na fabricação sustentável. Tal modelo computa as emissões de dióxido de carbono, a energia consumida e a geração de resíduos para um cenário de fabricação específico, no caso a usinagem (ROMANIW 2010).

Por outro lado, longe da simulação, Vijayaraghavan e Dornfeld (2010) propõem a automatização e o monitoramento da energia nas máquinas-ferramentas, o que pode apoiar a tomada de decisão do usuário, por meio dos múltiplos níveis temporais, para o uso racional da energia. Esse processo ocorre através de MTConnect® e do processamento de fluxo de eventos, cuja principal dificuldade foi gerir o grande número de fontes de dados e a complexidade dos sistemas de produção.

^a O termo inglês *stakeholder* designa uma pessoa, grupo ou entidade com legítimos interesses nas ações e no desempenho de uma organização. Em outras palavras, é todo ou qualquer indivíduo, ou grupo, que possa afetar o negócio, por meio de suas opiniões ou ações, ou ser por ele afetado.

O consumo de energia total do SMF, em muitos casos, é muito maior do que o consumo de energia da usinagem em si própria. Sabe-se que a máquina-ferramenta consome energia elétrica para gerar a força e potência necessárias para executar a usinagem. A maior parte dessa potência consumida na usinagem dos metais é convertida em calor próximo à aresta cortante da ferramenta e o restante vira energia mecânica. A respeito da energia consumida para o funcionamento da máquina, também uma grande parte da energia se transforma em calor.

O calor, uma forma de energia de difícil manipulação, distribui-se na máquina-ferramenta mediante as três classes de transferência de calor (condução, convecção e radiação). O acréscimo de temperatura afeta a precisão do processo de usinagem, acréscimo que não é desprezível para processos de alta precisão como esse. Por exemplo, a dilatação do eixo empurra a ferramenta para mais perto da peça, mudando as coordenadas desejadas da superfície de trabalho. Esse efeito mostra-se na Figura 31, em que, fotos infravermelhas foram tomadas a cada 30 minutos de um *spindle* em alta velocidade durante 3,5 horas. Nesse período a temperatura do eixo-árvore foi incrementando de 20°C até 41°C aproximadamente. Essa variação de temperatura trouxe como resultado uma variação de profundidade de 0,1mm. Compensar essa variação no eixo-árvore precisaria da medida da deformação térmica induzida. Mazak® tem desenvolvido e comercializado essa solução, como uma função de controle da condução do calor no seu controle Mazatrol Matrix™ CNC. (LÓPEZ DE L. e LAMIKIZ 2009, pp.115-117)

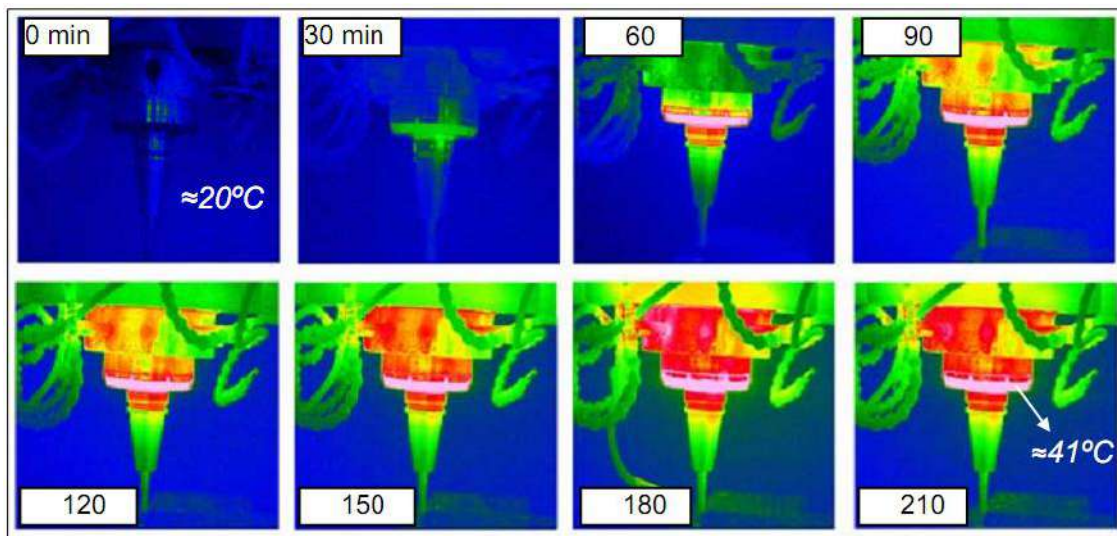


Figura 31: Temperatura do Eixo-árvore durante 3.5 horas de trabalho

Fonte – (LÓPEZ DE L. e LAMIKIZ 2009, p.116)

1.6. Limitações da pesquisa

- A sustentabilidade da máquina-ferramenta (aspecto econômico, ambiental e social) pode ser medida desde a análise do seu ciclo de vida, cujas fases da fabricação, uso e descarte devem ser pesquisadas. O presente trabalho se limita a pesquisar o consumo de energia da máquina-ferramenta na fase de uso visando a sustentabilidade, devido à disponibilidade de informação, deixando para pesquisas futuras as fases da fabricação e o descarte.
- A ampla variedade de máquinas-ferramentas limita a pesquisa a ter como referência experimental aquele tipo de máquina comum na indústria brasileira. Neste caso o centro de usinagem vertical.
- Dado que esta pesquisa se aprofunda nos componentes e funcionamento da máquina-ferramenta, foi necessária a parceria com o fabricante, gerando certa dependência de informação técnica acerca dos componentes e acerca do funcionamento dos subsistemas da máquina-ferramenta.
- ACV não é um método adequado para avaliar o consumo de energia das máquinas-ferramentas, devido a que tempo e lugar são duas características dos dados que afetam diretamente o consumo de energia durante o ciclo de vida da máquina-ferramenta. Dessa forma, a ausência de uma base de dados local que forneça informações referentes aos impactos ambientais de cada fase impossibilita a aplicação da ACV nesta pesquisa.

2. Proposta de Avaliação do Consumo de Energia Elétrica da Máquina-Ferramenta

O SMF estudado no capítulo anterior apresenta diferentes tipos de energia por causa de seus elementos de acionamento envolvidos nos diferentes processos de usinagem, ainda diferenciados pelas condições de operação. Utópico seria tentar identificar todos os tipos de energia que a máquina absorve ou gera em cada elemento, mecanismo ou subsistema. Pode-se afirmar que a máquina-ferramenta em grande parte usa energia mecânica (energia cinética, potencial, em forma de torque por causa da combinação das forças de tração), mas pela ação do atrito, também se identifica energia calórica, acústica, etc.

Assume-se, nesta proposta que a fonte inicial de todos os tipos de energia distinguidos na máquina-ferramenta em operação é a energia elétrica.

2.1. Método para calcular o consumo de energia da máquina-ferramenta

O funcionamento da máquina-ferramenta desde o ponto de visão dos circuitos elétricos viria a ser uma rede complexa de diversos circuitos. A máquina-ferramenta em si apresenta diversos elementos de acionamento, e com isso diversos tipos de proteções, acionados segundo a rotina de trabalho que corresponde ao projeto da peça, também apresenta a mudança de tarefas que levam a esperar que o consumo de energia seja muito variável.

Além disso, as máquinas-ferramentas são projetadas para executar um tipo ou vários tipos de operações de usinagem. Em termos experimentais, entende-se que uma operação é a usinagem efetuada pela máquina-ferramenta com uma ferramenta e dentro de um conjunto de parâmetros de corte predefinidos. Com ajuda do CNC é factível programar, além das operações de usinagem, as tarefas da máquina como: mudar de operação, trocar de ferramenta ou cuidar das condições de usinagem de forma automatizada (refrigeração, ventilação, remoção de cavacos, etc.).

2.1.1. Hipótese

Com o intuito de explicar o consumo de energia da máquina-ferramenta na hora de executar alguma tarefa em específico, optou-se por dividir o SMF em vários subsistemas, sob o critério funcional-estrutural e formularam-se as seguintes hipóteses:

- Altas velocidades no *spindle* contribuem diretamente com o consumo de energia total da máquina-ferramenta.
- O volume removido ou as taxas de remoção de material são diretamente proporcionais ao consumo de energia da usinagem.
- O consumo de energia por causa da usinagem é inferior ao consumo total de energia da máquina-ferramenta.

As hipóteses foram levantadas a respeito da máquina, quando esta está realizando a usinagem, razão pela qual serão provadas somente quando for avaliado de forma específica esse consumo de energia.

2.1.2. Tarefas básicas da máquina-ferramenta

Com a peça pré-desenhada, os parâmetros do(s) processo(s) de corte – faceamento, fresamento a 90°, interpolação helicoidal e interpolação circular, entre outros – e as especificações de cada ferramenta (diâmetro da ferramenta, número de dentes, etc.) que corresponde a cada processo de corte, define-se a sequência de atividades da máquina-ferramenta e então a programação do CNC, no chamado “plano de trabalho da máquina”. Apesar de a máquina-ferramenta conseguir efetuar a usinagem de peças muito diferentes entre si, entre um projeto de peça e outro, o plano de trabalho básico da máquina segue um esquema padrão de tarefas, apresentado na Figura 32. Essas tarefas são: o preparo da máquina, o carregamento de ferramenta(s), o(s) processo(s) de corte e a troca de ferramenta(s). Além disso, tarefas de programação e inspeção intervêm no meio do processo, segundo a sua complexidade e requerimento.

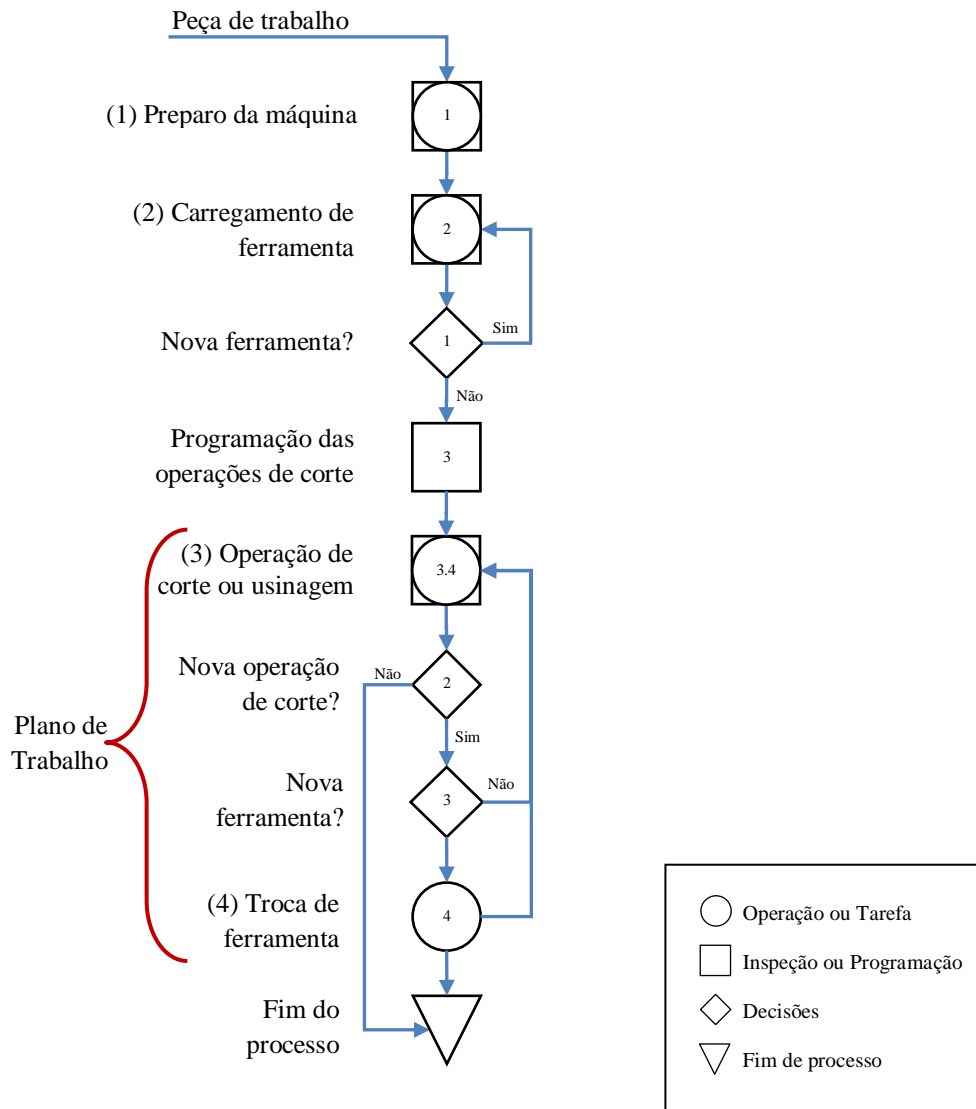


Figura 32: Diagrama do fluxo de trabalho da máquina-ferramenta

Fonte – Própria

Tarefa 1: Preparo da máquina

Tecnicamente o preparo consiste em ligar a máquina e logo depois efetuar o aquecimento, que consiste em ligar manualmente o *spindle* (servomotor do cabeçote) em velocidades graduadas a cada 40 minutos, com 25%, 50% e 75% da sua capacidade. Este “aquecimento” serve para anular erros na usinagem, pois conforme mostrado por Witte (1998, p. 311) na Figura 29, a temperatura inicialmente provoca erros na precisão da máquina, e após aproximadamente duas horas de operação da máquina-ferramenta a temperatura atinge um estado permanente. Essa tarefa, além do aquecimento, inclui atividades como a programação e inspeção das condições da máquina para efetuar o plano de trabalho. O consumo de energia da tare-

fa 1 fica por conta do mecanismo de acionamento do eixo-árvore e dos dispositivos eletrônicos.

Tarefa 2: Carregamento de ferramentas

Consiste em que o operador coloque as ferramentas no magazine e, à medida que são colocadas, ele precisa identificá-las para a máquina saber a posição de cada uma no magazine. Essa atividade entende-se como “referenciamento do magazine”. Outra atividade no carregamento das ferramentas é o “referenciamento das ferramentas”, o qual consiste em informar à máquina as dimensões de raio e altura de cada ferramenta, em seus respectivos corretores geométricos. Tecnicamente, como mostrado na Figura 33, consiste em que o operador coloca a ferramenta no porta-ferramentas, fecha a porta, situa o magazine com copo vazio na frente do porta-ferramentas e, ambos posicionados no mesmo plano, com ajuda do braço do TAF (Trocaador Automático de Ferramenta), coloca a ferramenta no copo do magazine e a guarda dentro da máquina. Após isso, o operador efetua o referenciamento do magazine e da ferramenta. Os mecanismos de acionamento responsáveis pelo consumo de energia na tarefa 2 são o trocador automático de ferramentas, o motor do magazine e os mecanismos eletrônicos que suportam todas essas atividades.

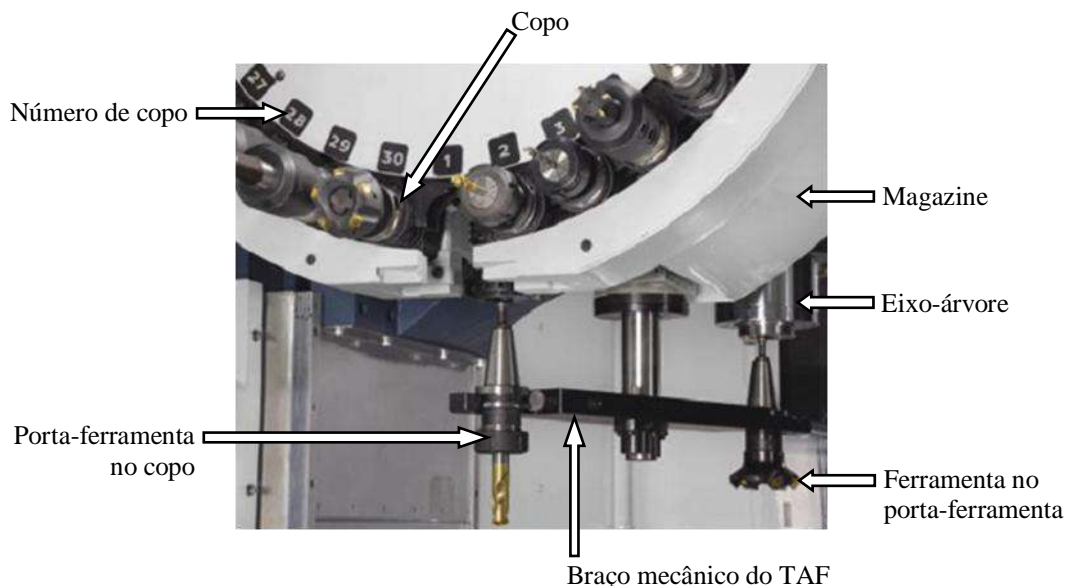


Figura 33: Troca de ferramenta

Fonte – Romi S.A.

Tarefa 3: Usinagem

O processo de usinagem é muito diversificado, pois dependendo das condições iniciais, do tipo de operação (fresamento, torneamento, etc.), do tipo de ferramenta e do projeto da peça, corresponderá a uma rotina de trabalho na programação. Cada operação começa com o posicionamento da ferramenta no zero das coordenadas da peça, onde é ligado o *spindle* e quando é atingida a velocidade angular pré-definida da operação, executa-se a usinagem propriamente dita. Quando esta é terminada, o eixo-árvore afasta-se e posiciona-se no plano de troca de ferramenta, freando simultaneamente. Se a ferramenta é a mesma para a operação seguinte, a máquina somente efetua as mudanças correspondentes ao plano de trabalho, velocidades, e demais parâmetros da operação. Se se trata de outra ferramenta, a máquina efetua a tarefa seguinte, isto é, a troca de ferramentas com o TAF. Durante a usinagem, essas duas tarefas (operações e trocas de ferramentas) se repetem, sendo modificados os parâmetros das operações e, se necessário, sendo realizada a troca de ferramenta, até que a usinagem tenha finalizado o desenho da peça. Os elementos que consomem energia, então, são os motores responsáveis pelo movimento rotacional e translacional das mesas, eixos e o cabeçote. Durante a operação, são os servomotores e os subsistemas auxiliares à usinagem e durante a troca de ferramentas, o TAF e o magazine.

Tarefa 4: Troca de ferramentas

Esta tarefa é programada para ser efetuada pelo magazine e pelo TAF. Tecnicamente, acontece quando o eixo-árvore está detido no plano de troca de ferramenta, chama a ferramenta pelo código dado durante a Tarefa 1, logo posiciona o braço mecânico do TAF, segura as ferramentas a serem trocadas do copo e do porta-ferramentas, e, em um instante, o braço mecânico intercambia as ferramentas (Figura 33).

Cabe mencionar que nesta tarefa, ao parar o eixo-árvore, ao posicionar o porta-ferramenta e o magazine no plano de troca, e ao efetuar a troca com um movimento angular, se espera que seus mecanismos de acionamento, em essência motores, a saber, os motores do magazine e do TAF, mostrem consumos de energia altos em poucos segundos.

2.1.3. Formulação proposta do consumo de energia quando a máquina está ocupada

A energia total E consumida pela máquina-ferramenta durante a sua operação pode ser avaliada a partir da energia consumida durante o preparo da máquina $E_1 [Wh]$, durante o carregamento da(s) ferramenta(s) $E_2[Wh]$, durante a usinagem $E_3[Wh]$, e durante a troca de ferramenta $E_4[Wh]$ (CAMPATELLI 2009, MORI, et al. 2011). Então o consumo de energia seria como apresentado na equação a seguir.

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \mathbf{E}_3 + \mathbf{E}_4 \quad \dots(28)$$

Em todo momento que a máquina está energizada, uma quantidade de energia básica E_0 é consumida, devido ao fato de circuitos e luminárias, entre outros elementos da máquina, estarem ligados. Razão pela qual está presente em cada tarefa e ainda em tempos sem atividade (esperas). Essa energia E_0 encontra-se de forma implícita em cada fator do modelo. E_0 equivale à potência básica P_0 durante t_n , em que n representa a duração de cada atividade e momentos de espera. A $\sum_{i=0}^n t_i$ equivale ao tempo de uso da máquina-ferramenta em uma jornada de trabalho.

$$E_0 = P_0 t_n \quad \dots(29)$$

A potência P_0 é avaliada, para a definição de seu valor, como a energia mínima consumida pela máquina quando está em espera ou em etapas de programação. Supõe-se que as duas atividades acontecem quando o *spindle* ainda não foi ativado e sua rotação é zero.

- A energia E_1 equivale à potência básica da máquina-ferramenta P_0 somado ao consumo pelo preparo da máquina P_1 , no tempo t_1 .

$$\mathbf{E}_1 = (P_0 + P_1)t_1 \quad \dots(30)$$

- O parâmetro E_2 é avaliado como o consumo de energia quando se carrega uma nova ferramenta. Essa energia depende muito da caracterização da ferramenta e da sua alocação no magazine, e da programação relacionada ao referenciamento do magazine e da(s) ferramenta(s). O consumo desse tipo de energia é definido pela potência básica P_0 quando a máquina está em espera, em condições de operar, somado ao consumo pelo carregamento das ferramentas P_2 , no decorrer do tempo t_2 .

$$\mathbf{E}_2 = (P_0 + P_2)t_2 \quad \dots(31)$$

- A energia durante a usinagem E_3 é avaliada a partir da energia consumida para alimentar os elementos básicos e auxiliares da máquina, e da energia consumida para a remoção de material. Gutowski (2006) propôs que a potência total $P[W]$ equivale à potência consumida para deixar a máquina-ferramenta “pronta” para usinar $P_0 [W]$ e a uma potência adicional que é proporcional à quantidade de material a ser processado, isto é, uma constante $k [Ws/mm^3]$ vezes a taxa de processamento de material $\dot{v} [mm^3/s]$. A seguir a proposta de Gutowski:

$$P = P_0 + k\dot{v}$$

Na máquina-ferramenta em estudo, observaram-se subsistemas, como refrigeração, remoção de cavacos e até os movimentos dos eixos, que não são constantes como o formulado por Gutowski, porque esses elementos são ativados quando acontece a usinagem e desativados em tarefas intermediárias, como a troca de ferramenta e tempos de programação. A formulação proposta na presente pesquisa para a energia durante a usinagem E_3 , então, é a seguinte:

$$E_3 = (P_0 + P_3 + k\dot{v})t_3 \quad \dots(32)$$

Em que $P_0 [W]$ é a potência básica consumida pela máquina quando está em espera e em condições de operar, $P_3 [W]$ é a potência consumida pelos elementos auxiliares à usinagem, os quais muitas vezes acompanham o acionamento dos eixos, $k\dot{v} [W]$ é a potência consumida por causa das forças de corte, sendo então a potência para a usinagem propriamente dita. Em que $k [Ws/mm^3]$ é o requerimento de energia específica em operações de corte, valor que depende da dureza do material, $\dot{v} [mm^3/s]$ é a taxa de remoção de material e $t_3 [s]$ é o tempo tomado para o corte. Esta energia depende muito da ferramenta e, portanto, do tipo de processo.

- A energia consumida durante a troca de ferramenta E_4 é avaliada a partir da potência da máquina vezes o tempo para trocar de ferramenta. A ferramenta é substituída enquanto o eixo-árvore está desligado. Este pressuposto faz com que a energia durante a troca de ferramenta seja igual a quando a máquina está em condição inativa P_0 somada à potência consumida pelo trocador de ferramentas P_4 .

$$E_4 = (P_0 + P_4)t_4 \quad \dots(33)$$

Da discussão acima exposta, um novo modelo para a energia consumida é mostrado na equação (34):

$$E = (P_0 + P_1)t_1 + (P_0 + P_2)t_2 + (P_0 + P_3 + kv)t_3 + (P_0 + P_4)t_4 \quad \dots(34)$$

Em que $t_1 [s]$ é o tempo de aquecimento, configuração, programação e/ou em estado de espera da máquina, $t_2 [s]$ é o tempo do carregamento das ferramentas, $t_3 [s]$ é o tempo para o corte, $t_4 [s]$ é o tempo de troca de ferramenta. A equação (34) representa o ponto inicial da formulação do consumo de energia pelas máquinas-ferramentas.

2.2. Modelo para estimar o consumo de energia do processo de usinagem

A energia consumida pelo processo de usinagem poderia ser calculada como mostrado na equação (27), $P = F_t \cdot v$. Empiricamente, o ensaio apropriado para esse tipo de cálculo são os sistemas de medição dinamométricos e de forma alternativa pode-se efetuar uma medição “por diferença”.

2.2.1. Medição dinamométrica

Esse tipo de medição adaptado em uma máquina-ferramenta se aplica assim como apresentado na Figura 34.

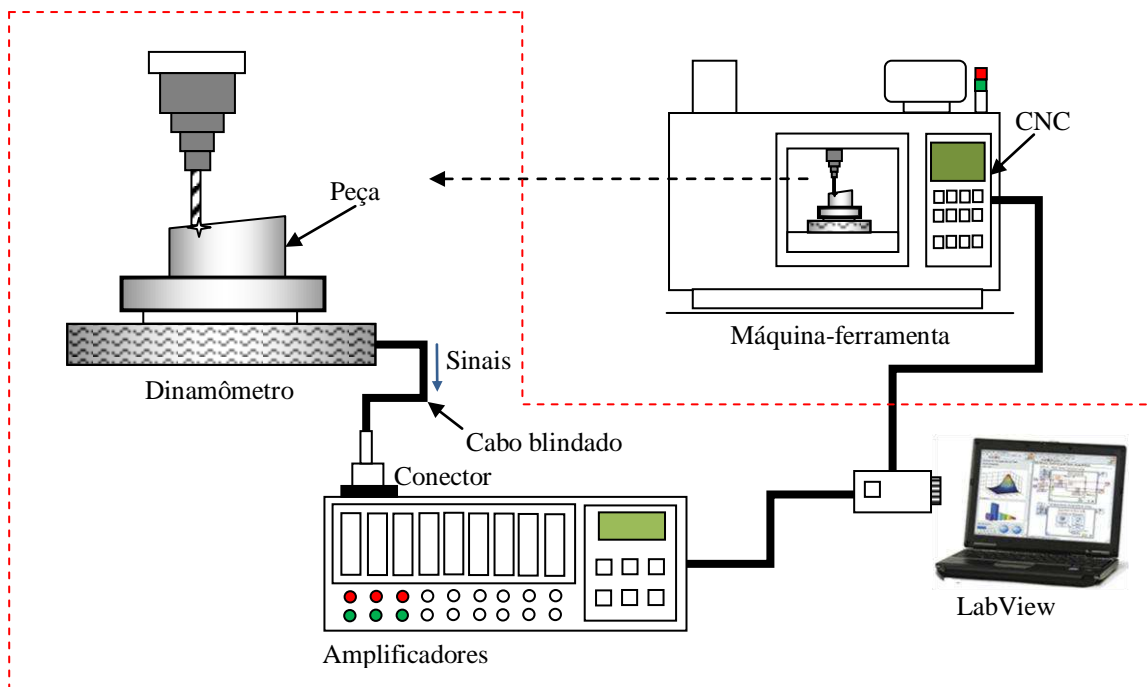


Figura 34: Sistema de medição de forças de usinagem

Fonte – Autor

O dinamômetro é colocado entre a peça e a mesa de trabalho a fim de medir a força exercida pela ferramenta na peça. Tal força no tempo percorre uma distância que é o comprimento da peça, o que representa a energia gasta no processo. Os sinais do dinamômetro no amplificador são lidos e convertidos a dados, que junto aos dados do CNC, como a profundidade, são coletados e tratados mediante *LabView* para calcular a energia consumida durante a usinagem. Esta forma indireta de medir o consumo de energia na usinagem tem sido praticada em muitos laboratórios de pesquisa.

2.2.2. Medição “por diferença”

Com o intuito de definir o consumo de energia da máquina-ferramenta, da usinagem e dos elementos auxiliares, formularam-se três cenários diferentes: em vazio, “a seco” e com fluido. Usinagem em vazio significa que o plano de trabalho da ferramenta para a usinagem foi afastado da peça, de forma que possa efetuar a usinagem sem encostar na peça, isto é, sem remover material. Usinagem significa que a ferramenta está localizada no plano de trabalho onde se encontra também a peça, permitindo que se efetue a remoção de material programada. Quando há efetivamente usinagem, esta pode efetuar-se em dois cenários distintos, a seco e com fluido. Neste trabalho, “a seco” significa que na programação da máquina foram desati-

vados os comandos que instruem a máquina a ativar o líquido lubri-refrigerante na peça e na ferramenta, a exaustão e o transportador de cavacos. “Com fluido” significa que todos os subsistemas auxiliares desativados na usinagem “a seco” devem estar ativados, assim como apresentado na Figura 35.

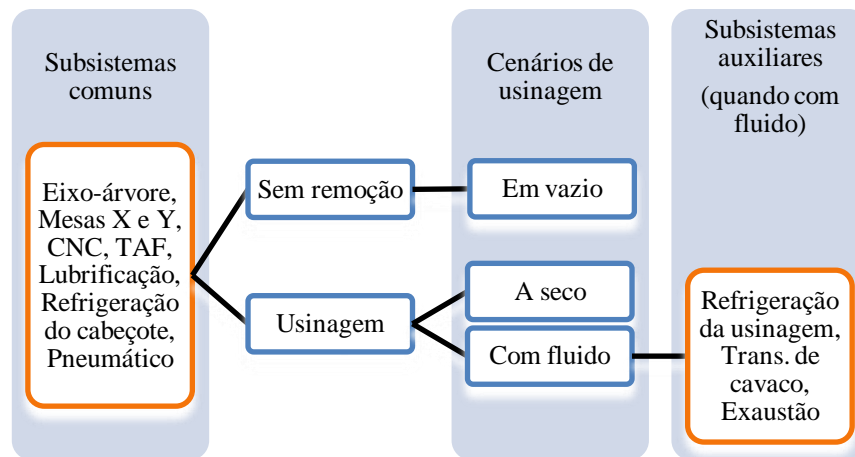


Figura 35: Cenários de usinagem e subsistemas

Fonte – Autor

A medição “por diferença” aplica-se na comparação dos cenários apresentados na Figura 35, quando efetuam o mesmo plano de trabalho em cada cenário. A variação entre a usinagem a seco e a usinagem em vazio representaria o consumo pela remoção de material. A variação entre a usinagem a seco e com fluido representaria o consumo pelos elementos auxiliares à usinagem, os quais são os subsistemas de refrigeração da usinagem, o de transporte de cavaco e o de exaustão.

A medição é feita diretamente na entrada da energia elétrica da máquina. Sabe-se que a potência de saída equivale à potência fornecida pelo eixo-árvore, equação (27), a qual equivale à energia gasta no processo de usinagem. Sabe-se também que o rendimento η do eixo-árvore é a relação entre a potência de saída $P_s[W]$ e a potência de entrada $P_e[W]$, equação (35), a qual é sempre inferior a 100%.

$$\eta = \frac{P_s}{P_e} \quad \dots(35)$$

Além disso, sabe-se que o servomotor é constituído de um motor, de uma caixa redutora e de um mecanismo de controle, que também consomem energia. O motor elétrico tem como função transformar a energia elétrica em energia mecânica no rotor. Porém, nem toda energia elétrica que entra é convertida em energia mecânica. Devido à resistência dos condu-

tores da armadura, do rotor e do atrito mecânico, ocorrem perdas que se transformam em calor.

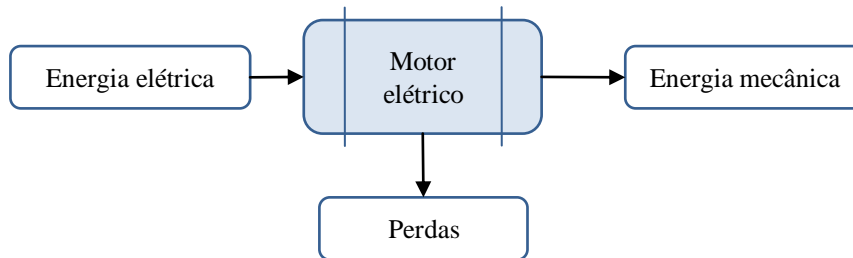


Figura 36: Balanço energético simples de um motor elétrico

Fonte – Autor

As perdas são expressas pelo rendimento do motor e, como mostrado na Figura 36, correspondem à energia que não é convertida em trabalho útil. Então a potência de entrada é a soma da potência de saída ou potência mecânica mais as perdas, como apresentado na equação seguinte:

$$P_e = P_s + Perdas \quad \dots(36)$$

Para o conhecimento do leitor e para antecipar a solução de dúvidas futuras e sem maiores aprofundamentos, as perdas num motor podem ser: perdas térmicas, perdas magnéticas, perdas mecânicas e perdas extraviadas (MAGUEIJO, et al. 2010, p. 24-25).

- As perdas térmicas acontecem nos enrolamentos de cobre do estator e da gaiola do rotor, devido ao efeito Joule por causa da passagem da corrente. Elas provocam o acréscimo da temperatura em detrimento da vida útil do motor. Tais perdas são proporcionais ao quadrado da corrente e ao valor da resistência.
- As perdas magnéticas acontecem no ferro por causa da variação do fluxo magnético que provoca correntes induzidas (correntes de Foucault) e perdas por histerese associadas aos ciclos de magnetização do ferro. As perdas magnéticas são proporcionais ao quadrado da densidade do fluxo magnético.
- As perdas mecânicas surgem pelo atrito nos rolamentos e pela ventilação do motor.
- As perdas extraviadas ou perdas suplementares estão associadas às imperfeições de fabricação, como as distorções do entreferro e a distribuição não uniforme da corrente dos condutores.

O fator de potência do motor de indução varia com a carga mecânica ou potência de saída no seu eixo. Abaixo da potência nominal o fator de potência começa a ter seu valor reduzido até ficar próximo de zero, quando o motor está sem carga e a potência de saída é suficiente para vencer o atrito. Da mesma forma, o motor *spindle*, semelhante a outras cargas indutivas, consome para o seu funcionamento potência aparente, que é a soma das potências ativa e reativa. Somente a potência ativa é transformada em potência mecânica e a potência reativa serve apenas para a manutenção dos campos magnéticos no interior do motor. A razão entre a potência ativa e a potência aparente é o que se define como fator de potência. Deste modo, quando o fator de potência é, por exemplo, 0,80; significa que 80% da potência aparente é transformada em potência ativa. Assim, conhecendo-se o rendimento, o fator de potência e a potência aparente, é possível calcular a potência ativa que se torna energia mecânica e então é consumida pelo processo de usinagem.

Ainda com relação às considerações feitas acerca do consumo de energia do servomotor, a medição “por diferença” vai considerar como semelhantes a eficiência do motor *Spindle* do eixo-árvore na usinagem e na usinagem em vazio. Isto porque essa medição “por diferença” aplica-se comparando o consumo de energia entre cenários.

3. Materiais e Métodos

Os materiais requeridos para a avaliação do consumo de energia pela máquina-ferramenta durante sua operação são: uma máquina-ferramenta, um equipamento chamado “analisador de qualidade de energia”, ferramentas de corte, uma peça de trabalho e um suporte informático (o software e o hardware) para gerir a coleta e registro dos dados. Os métodos utilizados definiram o planejamento experimental e a metodologia para sua execução com o intuito de verificar a influência das variáveis que intervêm no consumo de energia elétrica, de acordo com o exposto no capítulo anterior.

Os trabalhos experimentais aqui descritos foram desenvolvidos nas dependências do laboratório de Otimização de Processos de Fabricação, OPF, no Departamento de Engenharia de Produção, com apoio do laboratório de Sistemas de Energia Elétrica, LSEE, do Departamento de Engenharia Elétrica, além de contar com o apoio do laboratório de Engenharia de Superfícies do Departamento de Engenharia de Materiais, todos pertencentes à Escola de Engenharia de São Carlos, EESC, da Universidade de São Paulo, USP.

3.1. Materiais

3.1.1. SMF da máquina-ferramenta em estudo

Os ensaios experimentais foram realizados em um centro de usinagem vertical ROMI modelo D800. A Figura 37 mostra a estrutura dessa máquina-ferramenta.



Figura 37: Estrutura do Centro de Usinagem, modelo D 800

Fonte – INDÚSTRIAS ROMI S.A.

A seguir as especificações estabelecidas pelo fabricante no centro de usinagem D800:

- Dimensões da máquina: altura de 2700 mm e área ocupada (frente x lateral) sem o transportador de cavacos de 2600 mm x 2680 mm, sendo o peso líquido de 5500 kg.
- A referida máquina-ferramenta possui cursores máximos diferentes para cada eixo: curso da mesa superior (eixo X) 800 mm, curso da mesa inferior (eixo Y) 530 mm, curso do cabeçote (eixo Z) 580 mm. A mesa possui uma superfície de 914 mm x 500 mm e o peso admissível (uniformemente distribuído) é de 900 kg.
- Possui também um trocador de ferramentas com braço automático, cuja capacidade é de 30 ferramentas, sendo o diâmetro e comprimento máximo da ferramenta de 80 mm e 300

mm, respectivamente. O tempo de troca ferramenta a ferramenta (no ponto de troca) se situa entre 1,4 s (mínimo) e 3,9 s (máximo), sendo que o peso máximo da ferramenta é 8 kg e do magazine é de 102 kg.

- A potência instalada do motor principal (*Spindle*) é de 20cv/15kW (regime 15 min.), e a potência total instalada é de 30 kVA.
- O modelo do CNC é *GE Fanuc 0i-MC*.

Dado que a avaliação do consumo de energia na fase de uso da máquina-ferramenta é o enfoque do trabalho experimental, segue a descrição do centro de usinagem segundo a definição do SMF apresentada no item 1.5.1. do Capítulo 1. Conforme a Figura 27, a D800 possui todos os subsistemas lá apresentados com exceção do subsistema de trocador de peças.

3.1.1.1. Subsistema do eixo-árvore

O subsistema é composto pelo cabeçote e o eixo Z. Assim como apresentados na Figura 38, o cabeçote é composto por um cartucho ou eixo-árvore acionado pelo “*motor spindle*”.

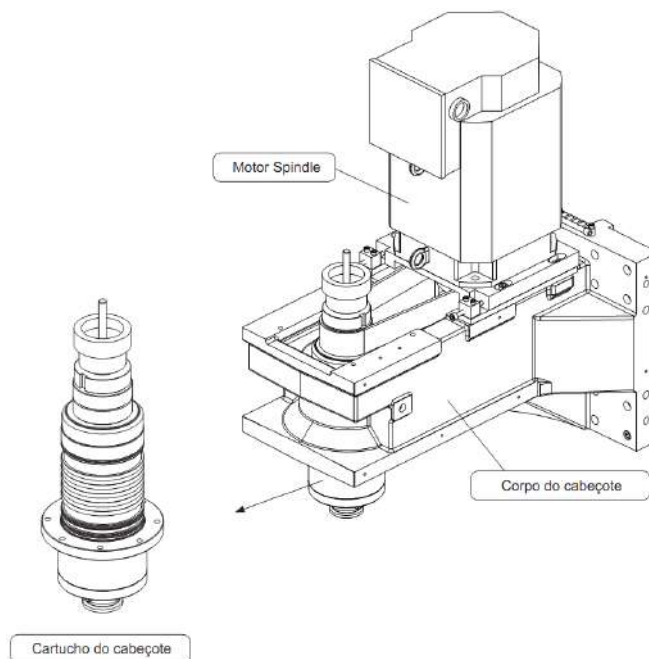


Figura 38: Conjunto do Cabeçote

Fonte – INDÚSTRIAS ROMI S.A

O eixo Z, apresentado na Figura 39, possibilita o deslocamento do eixo-árvore na direção do eixo “Z” e é acionado pelo servomotor (1) acoplado diretamente ao fuso de esferas (2). O fuso é suportado por dois mancais, sendo que no lado do servomotor (1) existem dois rolamentos de contato angular (3) e, do lado oposto, um rolamento de esferas (4).

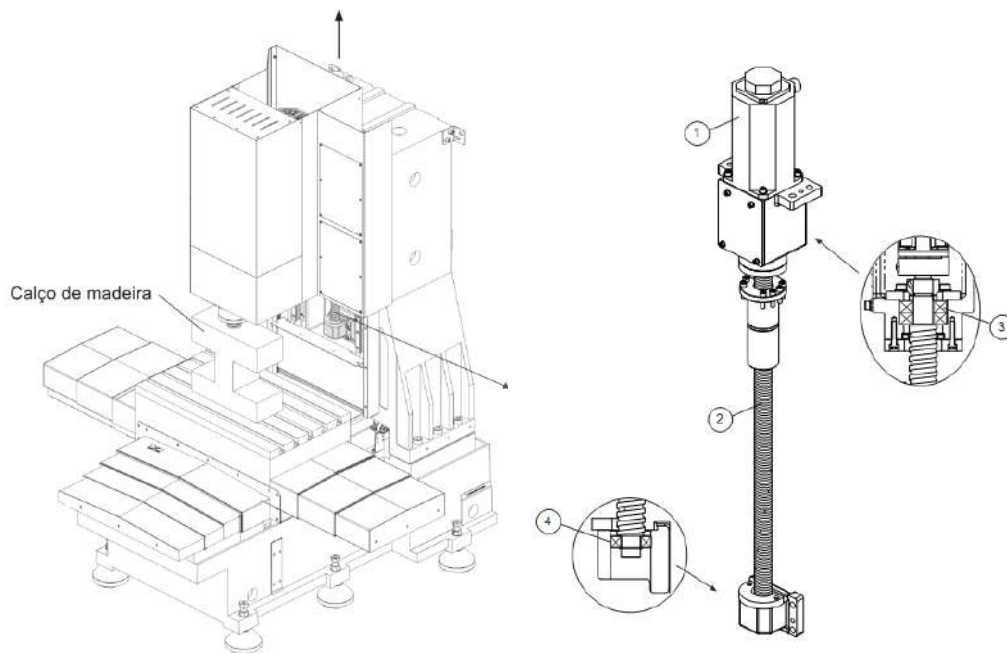


Figura 39: Eixo "Z"

Fonte – INDÚSTRIAS ROMI S.A

3.1.1.2. Subsistema de mesas de trabalho “X” e “Y”

Mesa superior (Eixo X). O deslocamento da mesa na direção do eixo “X”, como se mostra na Figura 40, é acionado pelo servomotor (1) acoplado diretamente ao fuso de esferas (2). O fuso é suportado por dois mancais, sendo que no lado do servomotor (1) existem dois rolamentos de contato angular (3) e, do lado oposto, um rolamento de esferas (4). O peso do conjunto mais o do fuso é de aproximadamente 38 kg.

Mesa inferior (Eixo Y). O deslocamento da mesa na direção do eixo “Y”, apresentada na Figura 41 e de forma semelhante à mesa superior, é acionado pelo servomotor (1) acoplado diretamente ao fuso de esferas (2). O fuso é suportado por dois mancais, sendo que no lado do servomotor (1) existem dois rolamentos de contato angular (3) e do lado oposto um rolamento de esferas (4).

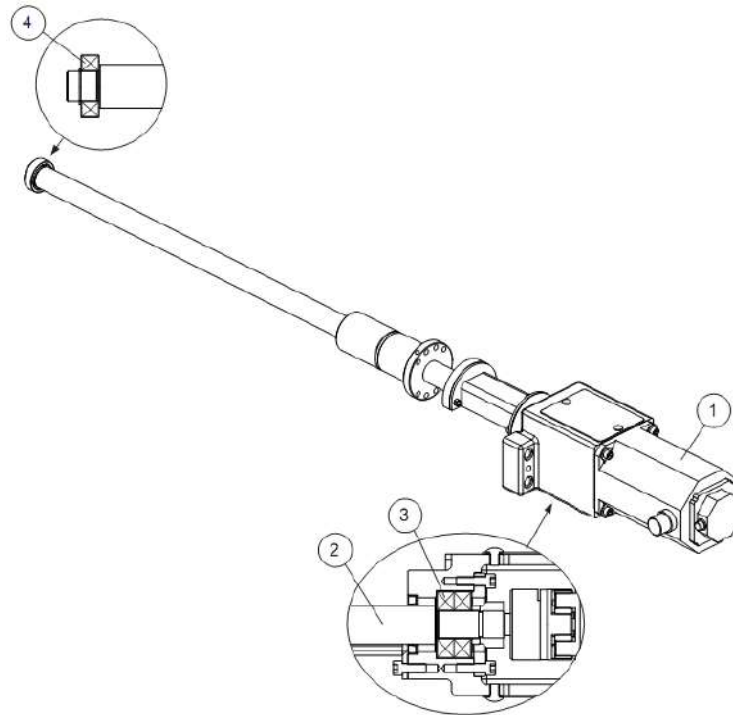


Figura 40: Eixo "X"

Fonte – INDÚSTRIAS ROMI S.A

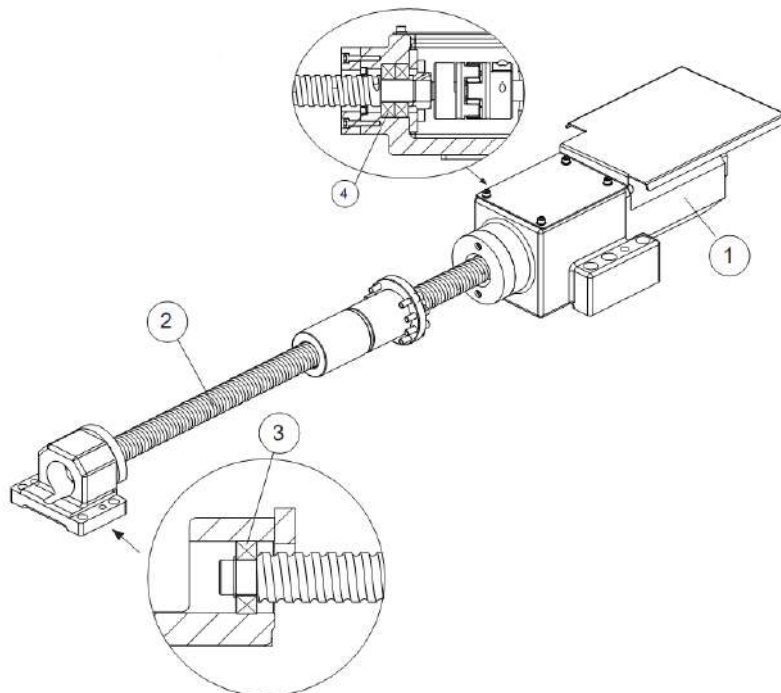


Figura 41: Eixo "Y"

Fonte – INDÚSTRIAS ROMI S.A

3.1.1.3. Subsistema do CNC

O controle numérico está baseado na introdução de números para o comando da máquina, sendo fisicamente formado pelo painel de comando (Figura 42), o qual preenche diferentes grupos de elementos: um grupo para o manejo da máquina, comparável às alavancas manuais da máquina universal; um segundo grupo de elementos para a programação e o modo de programação do acionamento (manual ou automático); e um terceiro grupo são os elementos mostradores como monitor e lâmpadas. O monitor serve como diálogo com o usuário da máquina. Os elementos que consomem energia são os circuitos eletrônicos e elétricos espalhados na máquina para permitir a comunicação do operador com cada elemento ou subsistema da máquina que seja controlável.



Figura 42: CNC GE Fanuc 0i-MC aplicado na Romi D800

Fonte – INDÚSTRIAS ROMI S.A

3.1.1.4. Subsistema do trocador automático de ferramenta

O trocador automático de ferramentas, TAF (Figura 43), é constituído por um sistema de giro e um sistema de deslocamento linear para a movimentação do disco porta-ferramentas. O mecanismo de acionamento é um motor-reductor acoplado a um braço mecânico que realiza o movimento de deslocamento linear. Existem dois sensores de proximidade para indicar as posições de disco recuado e disco avançado.

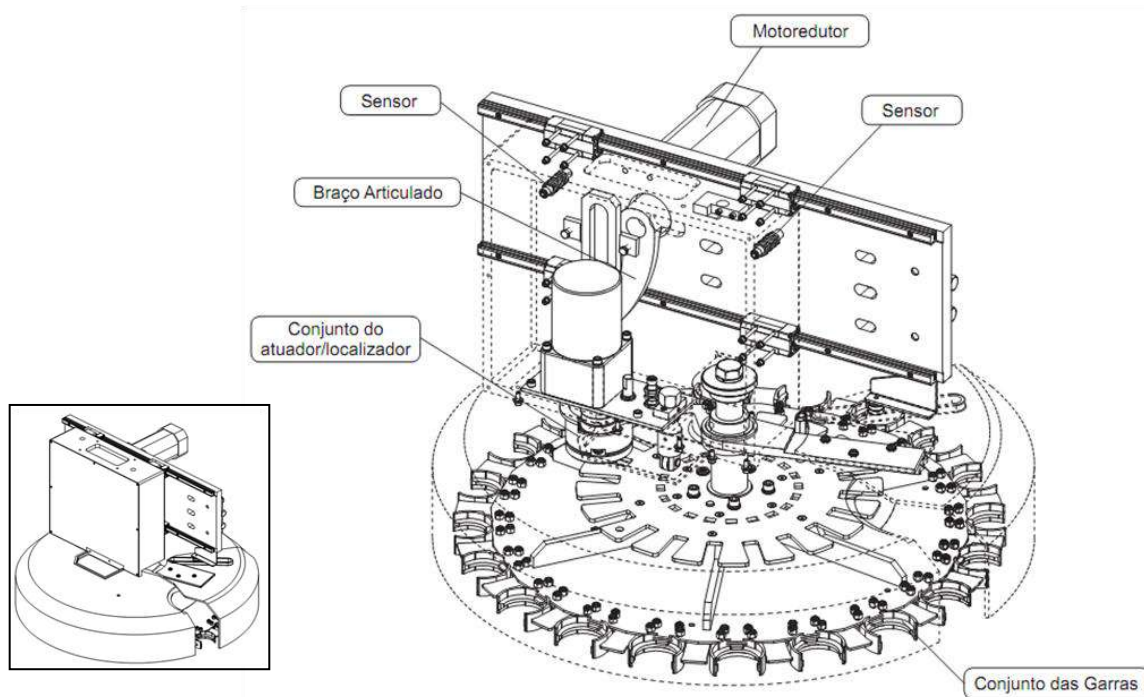


Figura 43: Trocador de Ferramenta

Fonte – INDÚSTRIAS ROMI S.A

3.1.1.5. Subsistema de lubrificação

Todas as guias lineares e fusos de esferas são lubrificadas pelo sistema de lubrificação automática, o qual utiliza uma bomba (marca LUBE, modelo MMXL - III CE). O funcionamento desse subsistema, cuja composição é apresentada na Figura 44, se explica da seguinte forma: a bomba (1) dispõe de energia elétrica quando a máquina é ligada e ocorre o movimento de um dos eixos. A bomba possui internamente um cilindro e um pistão (6). O motor da bomba movimenta um came^a, o qual faz com que o pistão suba, saindo do cilindro e sugando óleo lentamente para dentro do cilindro até um volume pré-ajustado. No final do ciclo da bomba, o came libera o pistão, que é empurrado para baixo por uma mola e envia o óleo acumulado no cilindro para os distribuidores (4) passando pelos dosadores (5). Quando a linha de lubrificação está cheia, uma pressão interna é gerada e aciona o pressostato (2). O óleo lubrificante escorre pelas guias e fusos e a pressão da linha cai, desligando o pressostato e o ciclo se inicia novamente. Todo o óleo passa pelo (3) filtro de linha para evitar a passagem de impurezas através do sistema de lubrificação. O mecanismo de acionamento é o motor da bomba, um motor síncrono de 220 V (50/60 Hz) e 3 W.

^a Parte de uma roda, ou eixo giratório, ressaltada e projetada para transmitir um movimento alternado ou variável a outro mecanismo.

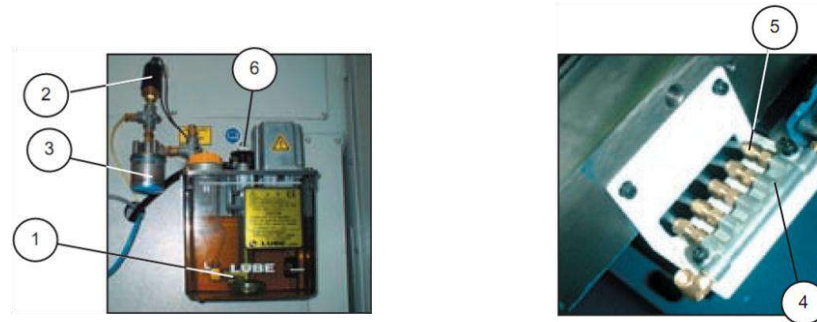


Figura 44: Composição do Sistema de Lubrificação

Fonte – INDÚSTRIAS ROMI S.A

3.1.1.6. Subsistema de refrigeração

O subsistema de refrigeração promove à circulação de fluido refrigerante, tendo esse fluido a função de refrigerar a ferramenta e a peça quando em operações de usinagem, além de executar a limpeza de cavacos gerados durante a referida operação. No caso da D800, o subsistema de refrigeração utiliza dois tipos de fluidos, a saber, o fluido refrigerante à base de óleo e o fluido refrigerante do cabeçote. Tais fluidos são movimentados por um conjunto de bombas, apresentadas na Figura 45, responsáveis pelo acionamento desse subsistema.

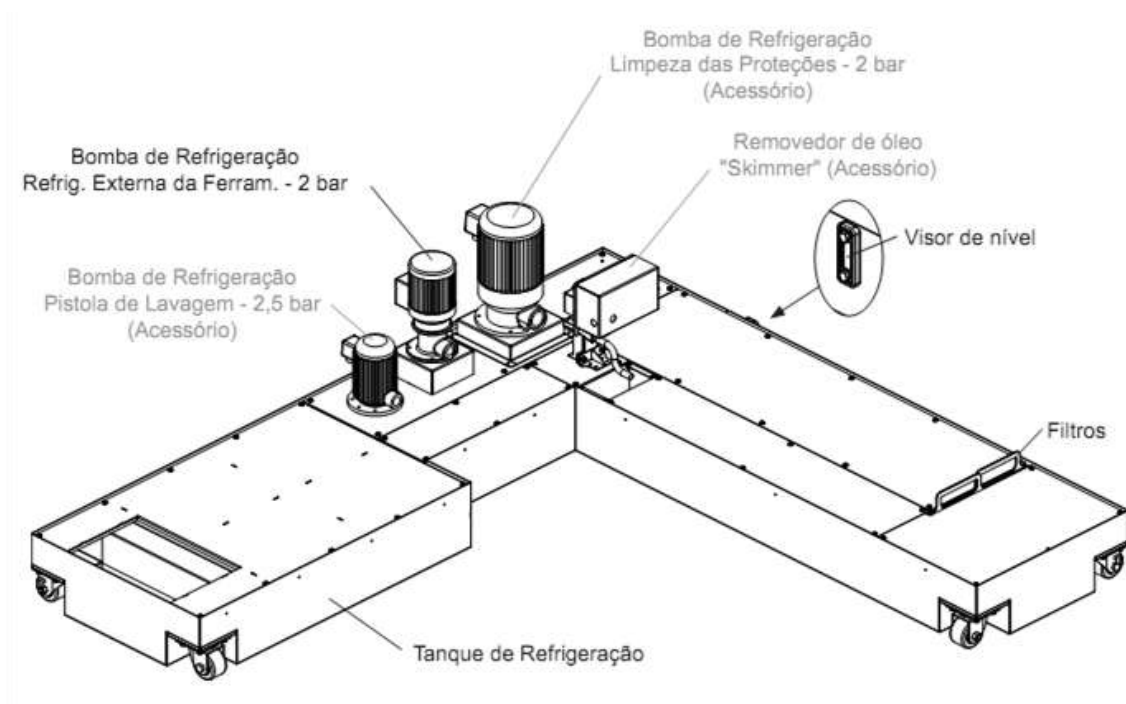


Figura 45: Subsistema de Refrigeração

Fonte – INDÚSTRIAS ROMI S.A

As funções do fluido refrigerante à base de óleo são: limpeza das proteções, acionamento da pistola de lavagem e a refrigeração externa e interna da ferramenta. Este sistema é composto basicamente por um reservatório e uma motobomba, a qual aciona o mecanismo e fica localizada na parte traseira da máquina. O volume de fluido refrigerante nos reservatórios é controlado através dos visores de nível.

Já o fluido refrigerante do cabeçote fica em um microsistema diferente, chamado “unidade de refrigeração”, o qual possui uma motobomba que direciona o fluido para resfriar o cabeçote periodicamente, de acordo com a temperatura dele, e de forma independente à atividade da máquina-ferramenta. Por essa razão, neste trabalho, a referência ao subsistema de refrigeração não inclui a “unidade de refrigeração”, exceto quando assim for especificado, e essa será citada como tal ou como “refrigeração do cabeçote”.

3.1.1.7. Subsistema pneumático

Tanto o sistema de travamento de ferramentas no eixo-árvore como o sistema de limpeza do cone e do labirinto do rolamento interior do eixo são realizados por meio de ar comprimido fornecido pelo subsistema pneumático. O controle desse subsistema é efetuado pelos elementos apresentados na Figura 46. Nesses elementos a pressão do ar fica no limite de 6 bar e a regulagem é feita através da válvula do filtro regulador.

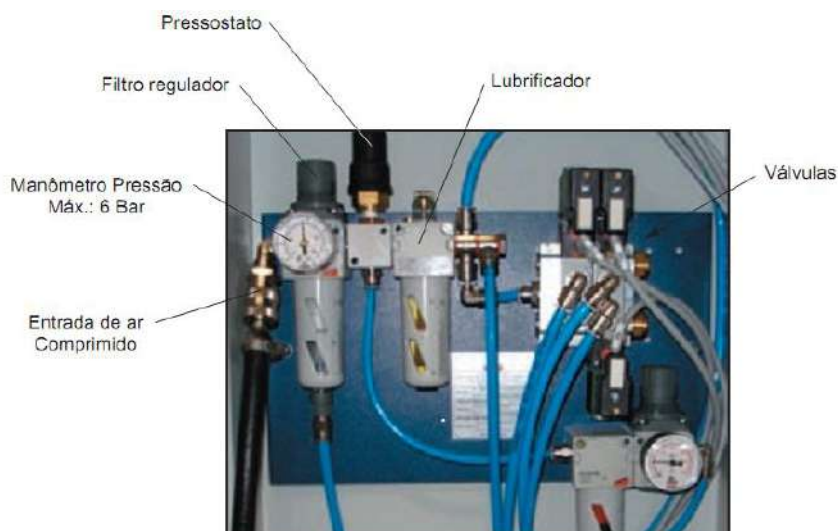


Figura 46: Controle do Sistema Pneumático

Fonte – INDÚSTRIAS ROMI S.A

3.1.1.8. Subsistema de remoção de cavacos

O cavaco e o líquido de refrigeração que saem da área de trabalho da máquina são recolhidos e separados pelo transportador de cavaco helicoidal através da sua área de captação, sendo transportados para o local de saída do mesmo para serem recolhidos numa caçamba. O sistema é acionado por um motor-reductor e um motor elétrico, Figura 47.

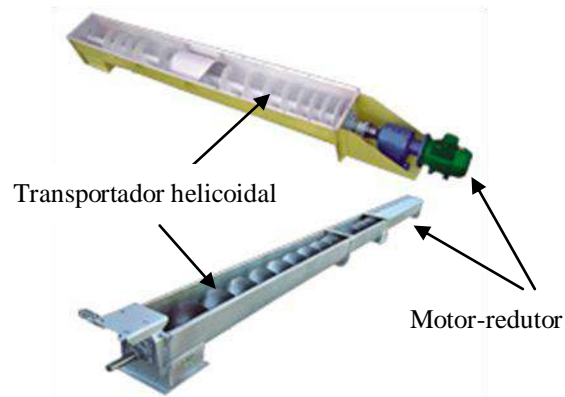


Figura 47: Transportador de cavaco

Fonte – Aliança Hema

3.1.1.9. Subsistema de exaustão

O aquecimento do fluido refrigerante durante a usinagem gera uma névoa que se acumula no espaço de trabalho da máquina. Como sua concentração pode ser muito prejudicial para o operador na hora de abrir a porta da máquina, conta-se, para sua evacuação, com um exaustor de gases, apresentado na Figura 48, acionado por um pequeno motor.



Figura 48: Exaustor de Névoa

Fonte – INDÚSTRIAS ROMI S.A

3.1.1.10. Acessórios

- O ar condicionado do painel elétrico dissipa o calor ou refrigera o ar interno do painel, mantendo-o no máximo a 40°C, protegendo, assim, os elementos sensíveis às variações de temperaturas. O acionamento deste sistema é feito por um motor monofásico.
- O sistema da porta automática, mostrado na Figura 49, é composto por um motor-reductor (1) que transmite o deslocamento linear da porta. Esse motor-reductor possui na ponta do eixo um limitador de torque (2) que tem a função de permitir que o operador evite o movimento da porta caso necessário, segurando-a com as mãos sem danificar o motor-reductor. A forma de transmissão do sistema é feita através de engrenagens (3) e de uma corrente (4). Existem dois sensores (5) PNP que monitoram os finais de curso da porta.

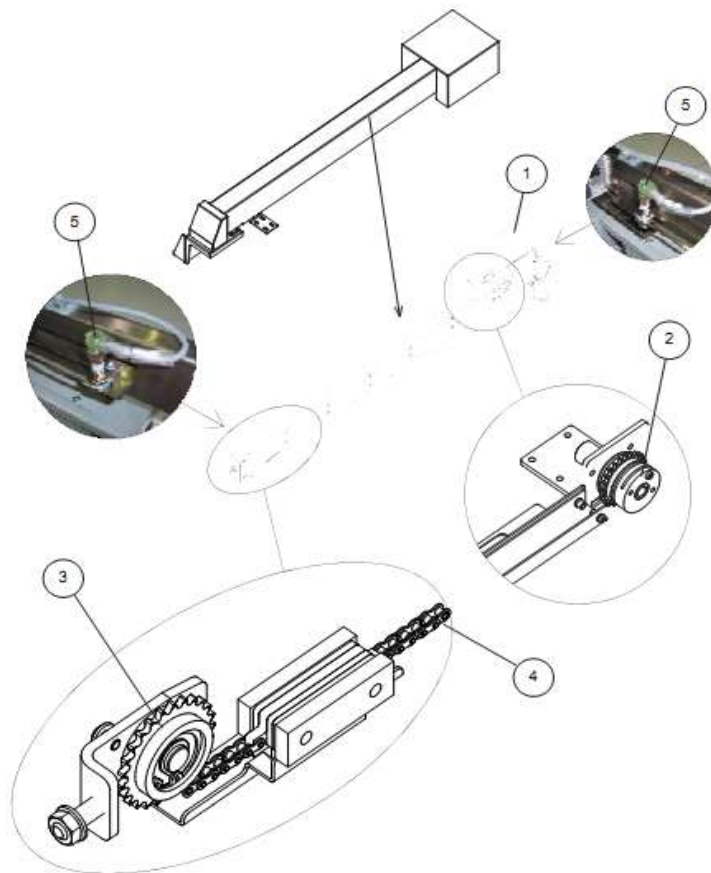


Figura 49: Porta Automática

Fonte – INDÚSTRIAS ROMI S.A

- Outros acessórios não menos importantes na sua funcionalidade são as luminárias, o horímetro, o alarme sonoro e a régua ótica, sistemas que não foram detalhados pela sua pouca influência no consumo de energia durante o uso da máquina-ferramenta. No entanto, o

consumo de energia de todos esses acessórios está de forma implícita na potência básica da máquina-fermenta.

3.1.2. Equipamento de medição do consumo de energia

O consumo de energia elétrica no centro de usinagem foi avaliado por meio de duas de suas principais grandezas relacionadas, a tensão e a corrente. Optou-se por um analisador de qualidade da energia trifásica (marca Metrel, modelo MI-2292), apresentado na Figura 50. O equipamento efetua a medição e o registro de diferentes parâmetros dos sistemas de energia, como por exemplo, a tensão, a corrente, a frequência, a potência ativa, a potência reativa, a energia, o desequilíbrio de tensão, as oscilações e os harmônicos. O equipamento segue os padrões internacionais e é projetado dentro das normas de segurança IEC 6010-1 e IEC 50081-1 e IEC 61000-6-1 para compatibilidade eletromagnética. Também dispõe de uma precisão de tensão de 0,5%, o que o coloca em conformidade com a norma IEC 61000-4-30, Classe B^b, e possui uma resolução de 0,1 V. O equipamento captura os dados em tempo real, sendo alimentado por tensão AC ou bateria com autonomia de até 5 horas.



Figura 50: Analisador de Qualidade da energia trifásico

Fonte – Metrel®

Para a realização das medições foram utilizados, em conjunto com o analisador de qualidade de energia, os acessórios listados a seguir (Figura 50). Três alicates de corrente 1000A/1A, cujo princípio de funcionamento é a indução magnética.

- Três cabos para pontas de prova vermelhas.

^b A norma IEC 61000-4 fornece métodos de medição, descreve fórmulas de medição, estabelece níveis de precisão e define períodos de agregação. Essa lei descreve principalmente os requisitos gerais para os instrumentos de medição, de forma a garantir que os analisadores dos diferentes fabricantes obtenham os mesmos resultados.

- Três cabos para pontas de prova pretas
- Três conectores garra de jacaré

O equipamento foi configurado para realizar o registro das informações com uma taxa amostral de 128 amostras por ciclo para cada uma das fases, de tensão e de corrente. O período desses ciclos de entrada depende da frequência da sincronização (uma entrada de tensão com uma entrada de corrente). Como exemplo^c, a 60 Hz o período de ciclo de entrada é de 16,67 ms. Assim, os valores básicos medidos são calculados no final de cada período de amostragem e os valores baseados na “transformada rápida de Fourier” só são calculados a cada ciclo de entrada de oito períodos (a 60 Hz cada ciclo é de 133,33 ms)^d. As equações usadas para cálculos básicos são apresentadas na Tabela 2:

Tabela 2: Valores básicos calculados pelo analisador de qualidade de energia elétrica

Parâmetro	Equação para calcular	Unidades	Equação
Tensão da fase	$U_x = \sqrt{\frac{1}{128} \sum_{i=1}^{128} u_{x_i}^2}$	V	(37)
Corrente da fase	$I_x = \sqrt{\frac{1}{128} \sum_{i=1}^{128} i_{x_i}^2}$	A	(38)
Potência ativa da fase	$P_x = \frac{1}{128} \sum_{i=1}^{128} u_{x_i} * i_{x_i}$	W	(39)
Tensão fase a fase	$U_{xy} = \sqrt{\frac{1}{128} \sum_{i=1}^{128} (u_{x_i} - u_{y_i})^2}$	V	(40)
Corrente do condutor neutro	$I_0 = \sqrt{\frac{1}{128} \sum_{i=1}^{128} (i_{1_i} + i_{2_i} + i_{3_i})^2}$	A	(41)

Fonte – Metrel S.A.

Com as equações básicas se consegue calcular os parâmetros da energia elétrica, apresentados na Tabela 3, que foram utilizados no presente trabalho, sendo que “x” é a variável que representa a fase em questão:

^c A 50 Hz o período de ciclo de entrada é de 20ms.

^d A 50 Hz cada ciclo é de 160 ms.

Tabela 3: Parâmetros adicionais de energia elétrica

Parâmetro	Equação para calcular	Unidades	
Ângulo de fase corrente-tensão	$\varphi = \varphi_i - \varphi_u$	-	(42) ^e
Valores por fase			
Potência aparente de fase	$S_x = U_x * I_x$	VA	(43)
Potência reativa de fase	$Q_x = \sqrt{S_x^2 - P_x^2}$	VAr	(44)
Fator de Potência da fase	$PF_x = \frac{P_x}{S_x}$		(45)
Valores totais			
Potência ativa total	$P_t = P_1 + P_2 + P_3$	W	(46)
Potência reativa total	$Q_t = Q_1 + Q_2 + Q_3$	VAr	(47)
Potência aparente total	$S_t = \sqrt{P_t^2 - P_x^2}$	VA	(48)
Fator de potência total	$PF_t = \frac{P_t}{S_t}$	-	(49)

Fonte – Metrel S.A.

O analisador calcula os valores, máximo, mínimo e médio das potências ativa e reativa em cada fase, sendo que a potência ativa total é a soma algébrica das fases. Trata-se de um medidor de quatro quadrantes, podendo, portanto, registrar potência ativa e reativa (indutiva e capacitiva) em qualquer sentido do fluxo de energia. Isso é possível pois o analisador tem a capacidade de registrar tanto o consumo (fluxo de importação) quanto a geração (fluxo de exportação) de energia elétrica.


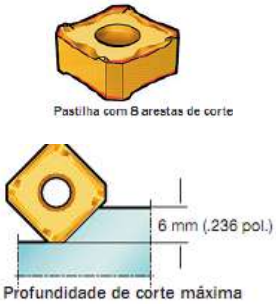

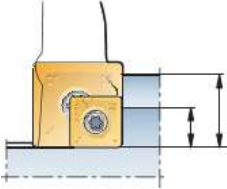

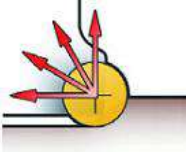



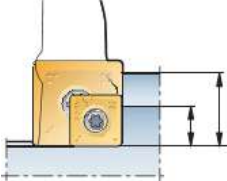


Os parâmetros utilizados no presente trabalho são: a potência ativa (P), a potência reativa (Q), a potência aparente ou real (S) e o fator de potência (FP). A precisão básica para os três tipos de potência é de $\pm 1\%$ de leitura.













3.1.3. Ferramentas de corte para a usinagem com a máquina-ferramenta



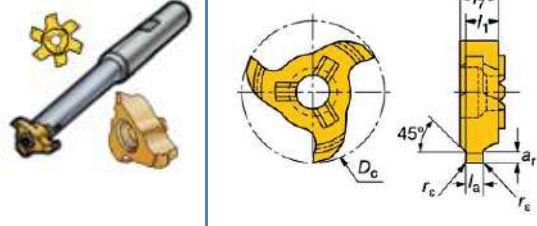
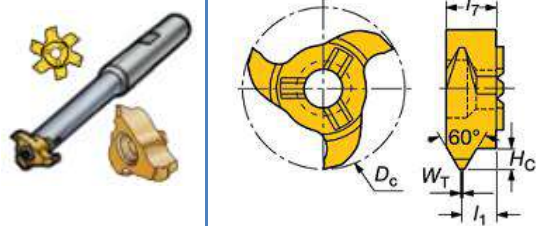
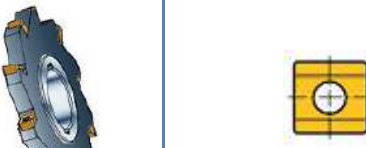
As ferramentas foram escolhidas com o intuito de apresentar as mais variadas operações em processos de usinagem semelhantes, sendo uma ferramenta para cada operação. Todas as ferramentas foram adquiridas da Sandvik Coromant, empresa parceira do laboratório OPF, e são adequadas para operar peças de aço. Na Tabela 4 são apresentadas as ferramentas utilizadas em cada operação, com alguns detalhes técnicos.

^e φ_i e φ_u são calculados pela Transformação Rápida de Fourier.

Tabela 4: Ferramentas do ensaio

Fornecedor	Operação	Ferramenta	Pastilha	Descrição (diâmetro e arestas)
CoroMill 345 Facemill 345-063Q22-13H	1. Faceamento (Superfície) Entrada em corte por rolagem e contato constante		 Pastilha com 8 arestas de corte 6 mm (.236 pol.) Profundidade de corte máxima	<ul style="list-style-type: none"> - Fresa de facear a 45 graus - Diâmetro 40 - 250 mm - Refrigeração em todos os alojamentos (até ϕ 1275 mm)
CoroMill 490 Facemill 490-044C4-14H	2. Faceamento e fresamento a 90° (Superfície) Entrada em rampa e fresar a 90° com contato constante	 $K_r = 90^\circ$ Tamanho da pastilha, mm 8, 14		<ul style="list-style-type: none"> - Fresa de facear e usinar cantos a 90° - Diâmetro 44 mm - Refrigeração interna: Tamanho da pastilha 14, 40-125 mm
CoroMill 300 Facemill R300-035C3-12M	3. Interpolação helicoidal (Furo cego)			<ul style="list-style-type: none"> - Fresas para perfilamento e faceamento de corte leve. - Para desbaste ao semiacabamento com altos avanços - Diâmetro da pastilha: 12 mm - Diâmetro da ferramenta: 35mm - Refrigeração pelo centro
CoroMill 210 Facemill R210-036C3-09H	4. Interpolação helicoidal (Furo cego)	 $K_r = 10^\circ$		<ul style="list-style-type: none"> - Fresa para faceamento com altos avanços e fresamento em mergulho - Fresa para desbaste altamente produtiva - Diâmetro 36 mm - Largura da pastilha 9 mm - Refrigeração pelo centro
CoroMill 490 Head 490-044C4-14H	5. Interpolação circular/helicoidal (Acabar furo)	 $K_r = 90^\circ$ Tamanho da pastilha, mm 8, 14		<ul style="list-style-type: none"> - Fresa de facear e usinar cantos a 90° - Diâmetro 44 mm - Refrigeração interna: Tamanho da pastilha 14, 40-125 mm
CoroMill 316 Head 316-16SM450-16010P1030	6. Interpolação circular/helicoidal (Furo cego)			<ul style="list-style-type: none"> - Fresamento com cabeça intercambiável - Fresa de topo com raio de canto - Rosca autocentrante - Diâmetro 16 mm - Ângulo de hélice: 50° - 4 arestas de corte

Fornecedor	Operação	Ferramenta	Pastilha	Descrição (diâmetro e arestas)
Continua...				
CoroMill 316 Head	316-10SM450-10005P 1030 7. Fresamento em mergulho (Primeiro nível, recorte)			<ul style="list-style-type: none"> - Fresa de topo com raio de canto - Corte central - Diâmetro 10 mm - Ângulo de hélice: 50° - 4 arestas de corte
CoroMill 316 Head	316-12HM450-12015P 1030 8. Fresamento trocooidal raso (Segundo nível, recorte)			<ul style="list-style-type: none"> - Fresamento com cabeça intercambiável - Fresa de topo para altos avanços - Fresamento em desbaste - Corte não central - Diâmetro 12 mm - Ângulo de hélice: 50° - 4 arestas de corte
CoroMill 316 Head	316-12BM440-12060G 1030 9. Fresamento trocooidal largo (nível final, recorte)			<ul style="list-style-type: none"> - Fresa de topo Ball Nose - Fresamento de perfis - Corte central - Diâmetro 12 mm - Ângulo de hélice: 40° - 4 arestas de corte
CoroMill 316 Head	316-10CM400-10045G 1030 10. Fatiamento (Canto com raio) Com avanço otimizado			<ul style="list-style-type: none"> - Fresa de topo para chanframento - Fresamento de chanfros - Corte central e não central - Diâmetro 10 mm - Ângulo de hélice: 0° - 4 arestas de corte
CoroMill 316 Head	316-10SM450-10005P 1030 11. Abertura de rasgo (Rasgo) Técnica de rampa linear			<ul style="list-style-type: none"> - Fresa de topo com raio de canto - Corte central - Diâmetro 10 mm - Ângulo de hélice: 50° - 4 arestas de corte
CoroMill 316 Head	316-12HM450-12015P 12. Fresamento de cavidade 2D (Cavidade rasa) Fresamento com cavidade com alto avanço			<ul style="list-style-type: none"> - Fresa de topo para altos avanços - Fresamento em desbaste - Corte não central - Diâmetro 12 mm - Ângulo de hélice: 50° - 4 arestas de corte

Forneecedor	Operação	Ferramenta	Pastilha	Descrição (diâmetro e arestas)
Conclusão				
CoroMill 316 Head	316-12BM440-12060G 1030	13. Fresamento de cavidade 2D (Ballnose, cavidade rasa) Fresamento de cavidade com Ball-nose		<ul style="list-style-type: none"> - Fresa de topo Ball Nose - Fresamento de perfis - Corte central - Diâmetro 12 mm - Ângulo de hélice: 40° - 4 arestas de corte
CoroMill 316 Head	316-10CM400-10045G	14. Chanframento Fresamento contorno		<ul style="list-style-type: none"> - Fresa de topo para chanframento - Fresamento de chanfros - Corte central e não central - Diâmetro 12 mm - Ângulo de hélice: 40° - 4 arestas de corte
CoroMill 327 Chamfer Insert	327R12-22 18545-GC 1025	15. Canal com chanfro Fresamento de canal com - contorno		<ul style="list-style-type: none"> - Fresamento de canais e roscas para furos acima de 10 mm de diâmetro. - Canais Circlip com chanfro - Larguras dos canais 0.7-5.15 mm - 3 dentes - $D_c=21.7\text{mm}$; $a_r=1.25\text{mm}$; - $I_a=1.85\text{mm}$; $I_l=5.19\text{mm}$; - $I_7=5.85\text{mm}$
CoroMill 327 Threading Insert	327R12-22 300MM-TH 1025	16. Fresamento de rosca - M63 x 3 (Rosca interna)		<ul style="list-style-type: none"> - Rosqueamento - Largura da pastilha 12 mm - 3 dentes - $D_c=21.7\text{mm}$; $I_l=4.3\text{mm}$; - $I_7=5.85\text{mm}$; $W_T=0.37\text{mm}$; - $H_C=1.62\text{mm}$
CoroMill 331 Side and Facemill	R331.35-040A16CM060	17. Canal Fresamento contorno		<ul style="list-style-type: none"> - Largura do canal (a_p) 6 mm - 4 arestas de corte, 2 arestas efetivas de corte. - Diâmetro da fresa (D_c) 40 mm - Profundidade de corte máxima aproximada (a_r) 11mm.

3.1.4. Peça de trabalho

A peça foi pré-desenhada com a finalidade de facilitar a sua fixação na máquina como apresentada na Figura 51. As propriedades da peça, por esta ser feita de aço, basicamente dependem de dois fatores: a sua composição química e a sua estrutura. A composição química pode ser medida através do espectrômetro de emissão óptica, e a estrutura pode ser medida através do exame metalográfico. Ambas as medições foram aplicadas na peça de trabalho, como é mostrado no Apêndice B e C respectivamente, para definir as características da peça.

Características da peça:

- Aço SAE 1045, medido através da análise da composição química e do exame metalográfico (Apêndice B e C). De acordo com a norma SAE trata-se de um aço sem liga (1XXX), de um aço carbono comum (10XX) que contém 0,45% (XX45) em peso de carbono em sua composição química.
- Dureza de 141 HB, medido através de um durômetro (Apêndice D).
- Massa inicial de 13,35 Kg aproximadamente.

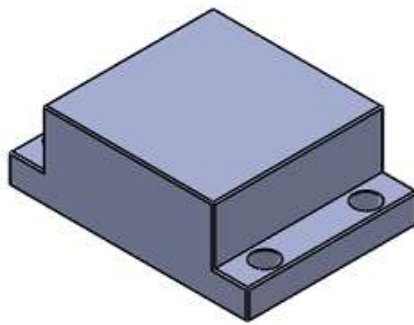


Figura 51: Peça do ensaio

3.1.5. Banco de ensaios

O banco de ensaios foi projetado para obter medidas da potência elétrica consumida e registrar as ordens que a máquina executa segundo o que foi programado no CNC (Figura 52).

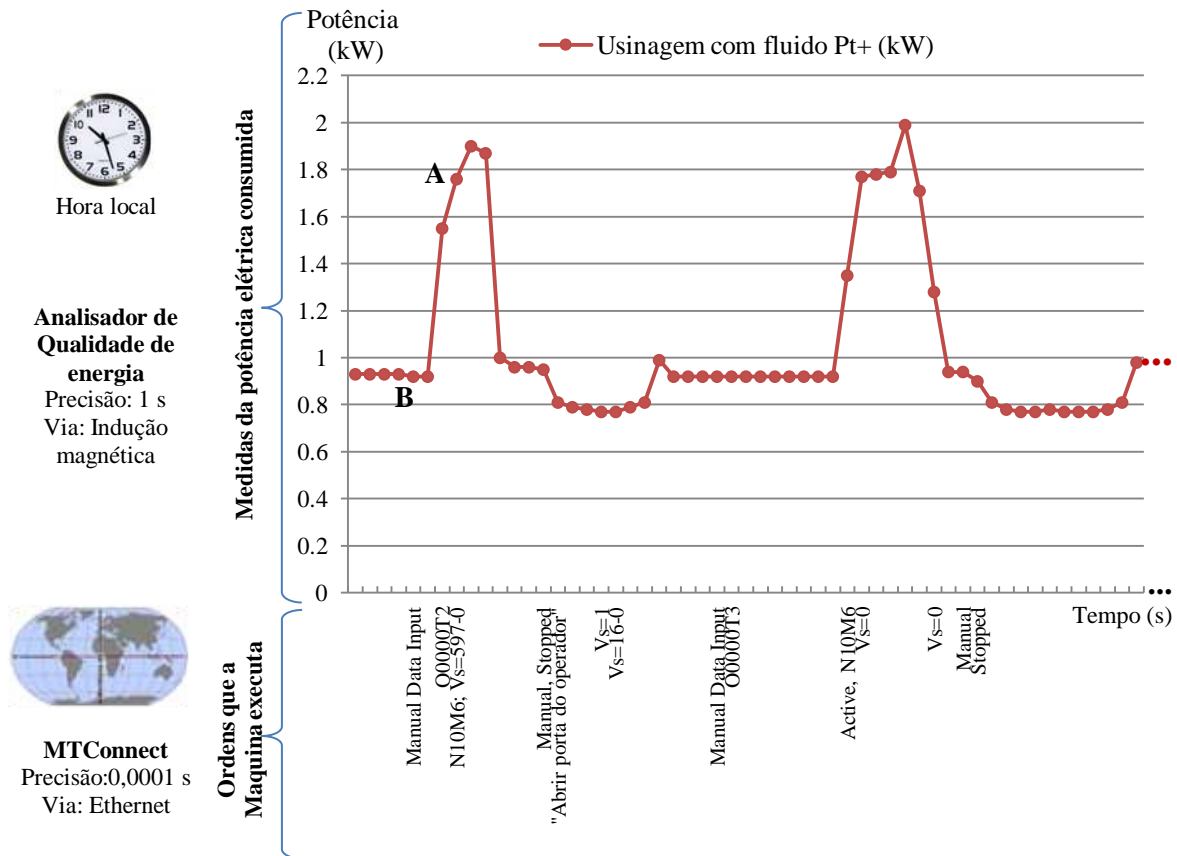


Figura 52: Aquisição simultânea de dados

Fonte – Autor

O banco de ensaios está equipado de um analisador de qualidade de energia trifásico e o sistema de aquisição de dados MTConnect®. O seu princípio de funcionamento está baseado na captura de dados por indução magnética e via ethernet de forma simultânea durante o funcionamento da máquina-ferramenta, assim como apresentado no esquema da Figura 53.

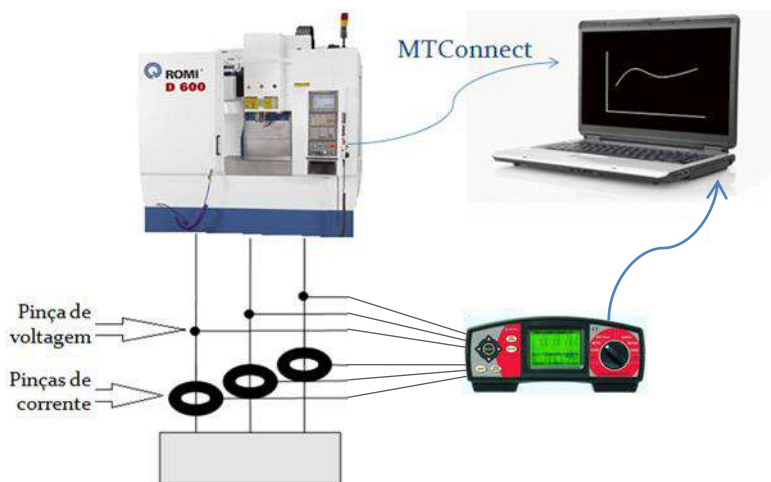


Figura 53: Esquema da coleta dos dados

Fonte – Autor

Por um lado, o analisador de qualidade permite que o usuário defina o intervalo de entrada (de 1s a 15min) entre os dados, e no final do período de integração, esses valores são armazenados na memória do equipamento juntamente com a data e hora de entrada, em que a precisão é de um segundo. Por outro lado, os dados colhidos via ethernet possuem maior precisão (0,0001 s) e são armazenados no servidor do MTConnect®. Dessa forma, o banco de ensaios está limitado pela quantidade de dados que o analisador de qualidade de energia trifásico consegue armazenar. A aquisição simultânea de dados permite identificar as causas das variações no consumo de energia elétrica.

A seguir, detalhes do equipamento de medição e do algoritmo de armazenamento de dados são apresentados.

3.1.5.1. Aquisição dos dados de energia elétrica

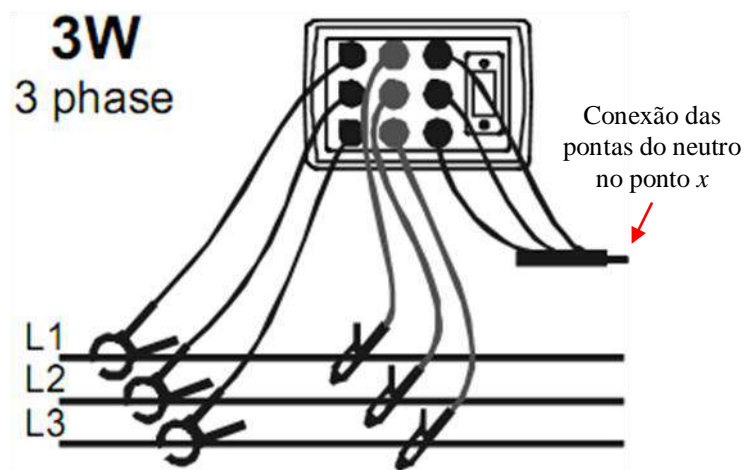
Como já mencionado, os dados registrados pelo analisador de qualidade de energia se baseiam no princípio da indução magnética e do contato, os quais permitem a conexão do analisador no painel elétrico da máquina-ferramenta, que no caso, trata-se de um sistema de três fios 3 ϕ ($L_1, L_2, L_3, I_1, I_2, I_3$).

O analisador é montado no painel elétrico, como mostrado na foto da Figura 54-a, quando a máquina está desconectada da rede elétrica. Um alicate de corrente é colocado em cada fase da alimentação principal e da mesma forma cada ponta de prova. As conexões à corrente e à voltagem têm que ser corretas, como mostrado no esquema da Figura 54-b. Para tanto, observou-se que a seta marcada no alicate de corrente tem que apontar para o fluxo de corrente fornecida à carga. Caso sejam ligados ao contrário, a potência medida na fase deve aparecer negativa.

De acordo com a Figura 16-b do primeiro capítulo, as três pontas (cabos para pontas de prova pretas) do analisador trifásico devem conectar-se em um ponto neutro comum N , porém, o SMF carece de acesso a esse ponto. Desta forma, as pontas estão desconectadas do ponto neutro que fica flutuando e, por isso, poderão existir valores aleatórios (pequenos) para cada uma das fases. Assim, quando se conectam as três pontas uma após outra entre elas, no ponto arbitrário x , como apresentado na Figura 17-a e a Figura 54-b, elas irão possuir o mesmo valor e serão uma referência para que o equipamento faça as medições de maneira absoluta.



(a)



(b)

Figura 54: Sistema trifásico de três fios (sem condutor neutro)

Fonte – Metrel S.A.

Tabela 5: Parâmetros de entrada no analisador de qualidade de energia trifásico

Parâmetros	Valor
Marca	Metrel
Modelo	MI 2292
Número de série	14095362
Conexão	3 fios
Subperíodo de integração de potência ^f	1 ciclo
Sinais selecionados	56
Frequência	60 Hz
Período de integração principal	2 s
Memória do tipo	Linear
Range da tensão	600 V
Fator de tensão (relação do transformador de tensão)	1
Tensão nominal	127 V
Escala I (fator de escala para os transformadores de corrente)	1000 (A)
Velocidade de transmissão do equipamento	9600 bps
Entrada de sincronização de frequência	Automático

Fonte - Power Link 4.0 - Metrel

Os parâmetros de entrada do equipamento são mostrados na Tabela 5 e se constituem em parâmetros básicos para calcular e registrar os valores das variáveis distinguidas. O registro das variáveis acontece da seguinte forma:

- Potência ativa registra dois fluxos, de importação ($P+$) e de exportação ($P-$).
- A potência reativa e o fator de potência são classificados em: indutivo de importação ($i+$), capacitivo de importação ($c+$), indutivo de exportação ($i-$) e capacitivo de exportação ($c-$).
- Para cada ciclo de entrada foram armazenados os valores de energia, de tensão e de corrente.
- Para o cálculo da tensão média, tensões menores que 2% da escala completa ($0,02 \times U_n$) são tratadas como interrupções de tensão e são excluídos de qualquer cálculo. Isto pode dar a aparência de quedas de tensão.
- Os valores máximos e mínimos armazenados baseiam-se em valores calculados durante cada ciclo de entrada, enquanto os valores médios (exceto potência e tensão) são calculados ao final de cada período de integração e são fundamentados no número de ciclos de entrada no período.

^f Se o equipamento está registrando uma potência, calcula e registra automaticamente a energia da potência selecionada em um período de integração.

- Os valores médios de potência e tensão ignoram os ciclos de entrada quando a tensão é menor que $0,02 \times U_n$. Além disso, se acontecer uma queda de tensão ou falta de energia durante o período de integração, o equipamento começa um novo período.

3.1.5.2. Sistema de aquisição de dados

A necessidade da comunicação aberta e padronizada que permita a conectividade da Internet com os equipamentos de fabricação está sendo hoje atendida pelo MTConnect® (JABLONOWSKI 2007). O MTConnect® facilita a recuperação organizada de informações do processo de máquinas-ferramentas controladas numericamente. Na sua forma atual, o MTConnect® é referido como um padrão "de leitura", o que significa que apenas define a extração (leitura) de dados a partir de dispositivos de controle e não o processo de escrevê-los. Por isso ele é utilizado para análise de monitoramento e de dados.

O MTConnect® é um protocolo leve, aberto e extensível projetado para a troca de dados entre equipamentos de chão de fábrica e aplicações de software. Está disponível gratuitamente e os padrões abertos são usados por todos os aspectos do MTConnect®. O formato de dados a partir de dispositivos de chão de fábrica é apresentado em XML e é recuperado a partir de provedores de informação, chamados agentes, usando *Hypertext Transfer Protocol* (HTTP) como protocolo de transporte subjacente (acessório) (MTConnect Institute, 2011).

A arquitetura para a implementação do padrão MTConnect® neste experimento segue o esquema da Figura 55.

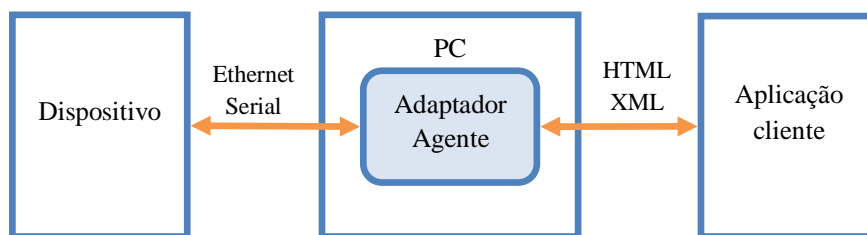


Figura 55: Arquitetura para a implementação do padrão MTConnect®

Fonte – Laboratório OPF

Primeiramente, devido ao fato de que o dispositivo, neste caso a máquina-ferramenta, não é compatível com o padrão MTConnect®, precisa-se implementar o adaptador e o agente no servidor. No caso, o adaptador foi implantado na mesma aplicação do agente. O adaptador

é o responsável por controlar toda a comunicação com o dispositivo e com o agente. O agente é a aplicação que insere a interface MTCConnect®, controlando o armazenamento dos dados coletados pelo adaptador, além de implantar um servidor HTTP para manipular as requisições de aplicativos clientes.

Vale dizer que a aplicação cliente neste experimento faz com que os arquivos gerados sejam armazenados em um servidor conectado à rede, o mesmo que disponibiliza o acesso às informações via internet. O algoritmo para armazenamento das informações, feito em Java, atua como está explicado no fluxograma da Figura 56, isto é, reescrever as instruções no instante em que foram executadas pela máquina-ferramenta. Na prática cada instrução se constitui de um conjunto de comandos (Bloco) em linguagem CNC.

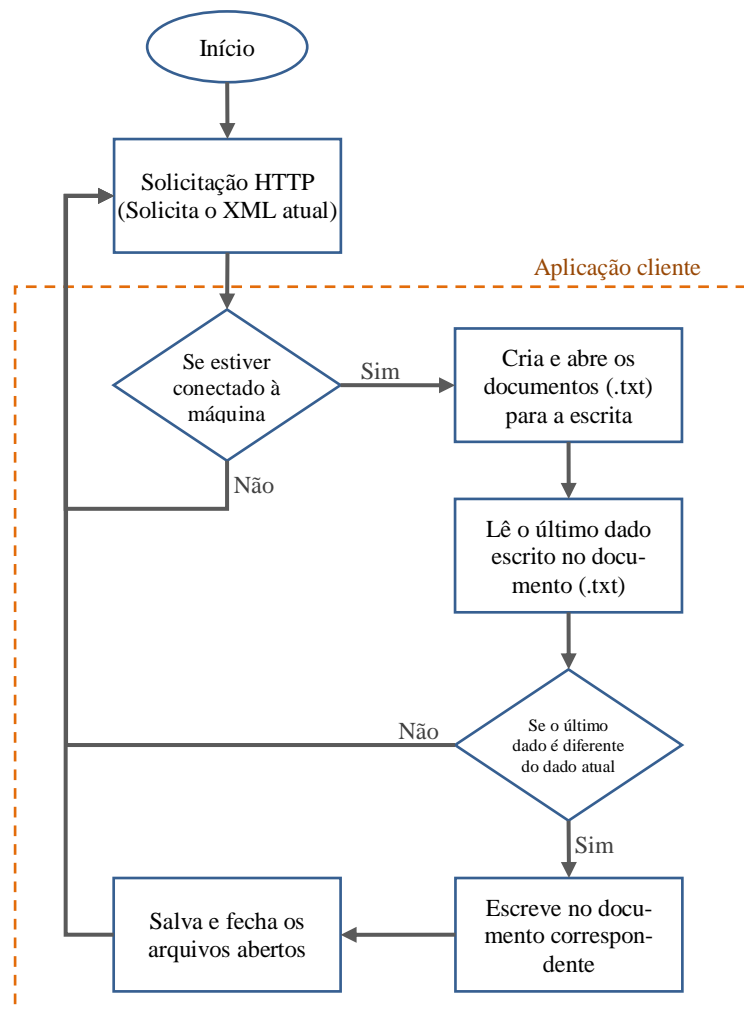


Figura 56: Algoritmo para aplicativo de armazenamento de dados

Fonte – OPF

3.1.5.3. Aquisição simultânea dos dados

A aquisição simultânea é necessária porque os dados do analisador são os valores das variáveis da energia elétrica obtidas a cada 2 segundos e os dados de MTConnect® são as instruções efetuadas pela máquina-ferramenta no decorrer do tempo que mostram o início e o fim de cada evento. O relógio do MTConnect® está sincronizado automaticamente com a hora média de Greenwich (GMT), enquanto o relógio interno do analisador trifásico foi ajustado manualmente pelo operador, o que evidencia a grande possibilidade de erro. No entanto, não foram identificados atrasos significativos entre os dados.

A aquisição simultânea de dados é muito importante porque os dados da energia elétrica não possuem descrição causal. O analisador simplesmente registra as grandezas da energia elétrica sem uma explicação do que aconteceu na máquina-ferramenta. Citam-se como exemplo os dados registrados na Figura 52. No ponto A, a potência atinge 1,76 W de acordo com o analisador de qualidade de energia, enquanto o MTConnect® registrou o comando N10M6, o qual significa segurar a ferramenta no magazine com ajuda do TAF. Outro exemplo, no ponto B, é o registro da ordem “Manual Data Input”, o qual significa que informações acerca de uma ferramenta foram inseridas, e isto define o início da tarefa chamada “carregamento de ferramentas”. Por isso a aquisição simultânea dos dados do MTConnect® com os dados do analisador de qualidade de energia elétrica é importante.

3.2. Métodos

3.2.1. Grandezas registradas pelo analisador de qualidade de energia

Todas essas grandezas medidas estão separadas em positivas (+) e negativas (-), o que indica o sentido da direção do fluxo da potência no triângulo de potências (Figura 13 do capítulo 1). Na Tabela 6 mostra-se a simbologia usada para cada uma delas, siglas e unidades, e a interpretação do sentido do fluxo da potência se os valores forem positivos ou negativos.

Tabela 6: Grandezas mensuradas

Sigla	Nome	Fluxo
P_{r+} (W)	Potência ativa total (Positiva)	Fornecida à carga (Consumida pela carga)
P_{r-} (W)	Potência ativa total (Negativa)	Recebida pela fonte (gerada pela carga)
Q_{tc+} (VAr)	Potência reativa capacitiva total (Positiva)	Recebida pela fonte (gerada pela carga)
Q_{ti+} (VAr)	Potência reativa indutiva total (Positiva)	Fornecida à carga (Consumida pela carga)
Q_{tc-} (VAr)	Potência reativa capacitiva total (Negativa)	Fornecida à carga (Consumida pela carga)
Q_{ti-} (VAr)	Potência reativa indutiva total (Negativa)	Recebida pela fonte (gerada pela carga)
FP_{tc+}	Fator de potência capacitivo total (Positivo)	Presente em cargas de geração
FP_{ti-}	Fator de potência indutivo total (Negativo)	
FP_{ti+}	Fator de potência indutivo total (Positivo)	Presente em carga de consumo
FP_{tc-}	Fator de potência capacitivo total (Negativo)	

Fonte – Adaptado de Metrel®

Os valores para o cálculo das potências e fatores de potência máximos e mínimos são os valores médios calculados sobre os valores do subperíodo de integração de potência. Apresenta-se os ditos valores na Tabela 7, os quais guiarão a interpretação dos dados coletados.

Tabela 7: Valores máximos e mínimos por totais

Valor	Carga que consome potência		Carga que gera potência	
	Indutiva	Capacitiva	Indutiva	Capacitiva
P_{r+} (kW)	P_t		0	
P_{r-} (kW)	0		P_t	
Q_{tc+} (kVAr)	0	0	0	Q_t
Q_{ti+} (kVAr)	Q_t	0	0	0
Q_{tc-} (kVAr)	0	Q_t	0	0
Q_{ti-} (kVAr)	0	0	Q_t	0
FP_{tc+}	na	na	1	FP_t
FP_{ti+}	FP_t	1	na	na
FP_{tc-}	1	FP_t	na	na
FP_{ti-}	na	na	FP_t	1

Fonte – Metrel®

3.2.2. Planejamento experimental

O planejamento experimental teve como propósito conduzir o fim da pesquisa aos objetivos específicos. O primeiro passo foi criar uma proposta de avaliação do consumo de energia elétrica a partir da bibliografia consultada. Como visto no Capítulo 2, essa proposta sugere um modelo analítico que representa as relações de potência elétrica com o processo de usinagem e a máquina-ferramenta, dentro de um período de tempo determinado. Por sua vez, esse modelo possui várias hipóteses (item 2.1.1) a serem verificadas neste experimento.

A escolha do processo de usinagem foi aleatória entre os ensaios efetuados no laboratório de OPF. No caso, o ensaio tinha por objetivo provar a precisão de 13 ferramentas em 17 diferentes operações de fresamento.

A seguir algumas considerações feitas no experimento:

- Quanto à potência consumida pelos subsistemas acessórios de refrigeração, de remoção de cavacos e de ventilação (Figura 27 no primeiro capítulo), foram feitas algumas medições preliminares para a sua determinação. Existia a preocupação de que estes consumos não seriam identificados pelo fato de a aquisição de dados de consumo de energia ter sido feita na entrada geral da máquina-ferramenta, de forma que os dados coletados representam o consumo total da máquina. Optou-se então por esse tipo de coleta para que a metodologia pudesse ser aplicada em qualquer máquina, em que não se contasse com mais do que um analisador de qualidade de energia.
- Quanto às condições de refrigeração, ao longo do desenvolvimento deste trabalho observou-se a tendência em se trabalhar a seco, com o intuito de se minimizar o uso de fontes agressoras ao meio ambiente e à saúde – entre elas, os fluidos de corte ou fluidos lubri-refrigerantes. Por outro lado, observou-se também, de acordo com os principais métodos utilizados no mercado, a tendência de se efetuar a usinagem com fluido em abundância (emulsão), com o objetivo de se prolongar o tempo de vida da ferramenta. Há, portanto, duas tendências paralelas quanto às condições de refrigeração.
- Quanto às forças de corte, embora o objetivo da pesquisa não seja saber detalhes físicos do processo de usinagem em si, sabe-se que a distribuição de forças faz possível a remoção de material. Optou-se, portanto, por medir o consumo de potência com a usinagem em vazio, isto é sem remoção de material, e a usinagem propriamente dita, ou seja, com remoção de material.

Com as particularidades anteriormente descritas definiram-se os seguintes parâmetros:

- Parâmetro 1 (P1): Emulsão faz referência ao fluido refrigerante
 - P1 = 1, usinagem com fluido lubri-refrigerante.
 - P1 = 2, usinagem sem fluido lubri-refrigerante.
- Parâmetro 2 (P2): Usinagem faz referência à remoção de material
 - P2 = 1, usinagem em vazio.
 - P2 = 2, usinagem da peça de trabalho.

O consumo de energia elétrica da máquina-ferramenta é influenciado por dois diferentes parâmetros, e cada um desses parâmetros, para efeito de experimentação, deve ser testado em dois níveis. O número de combinações possíveis do experimento seria $2^2 = 4$, apresentados a seguir na Tabela 8-a:

Tabela 8: Matrizes de experimentos

Experimentos	P1	P2
1	1	1
2	1	2
3	2	1
4	2	2

(a)

Experimentos	P1	P2
1	1	1,2
2	2	1,2

(b)

Fonte – Autor

Assim, os experimentos, isto é, os cenários de consumo de energia pela máquina-ferramenta, são os seguintes:

- Experimento 1: Usinagem a seco e em vazio
- Experimento 2: Usinagem a seco
- Experimento 3: Usinagem com fluido ou emulsão em vazio
- Experimento 4: Usinagem com fluido ou emulsão

Se considerar-se ainda que entre um e outro experimento pelo menos um parâmetro deve ser alterado e que muitas vezes experimentos como estes utilizam recursos de produção e pessoal especializado, evidenciam-se as dificuldades e os custos envolvidos.

Com o intuito de reduzir a quantidade de experimentos necessários, observou-se que os valores do Parâmetro 2 podem ser efetuados em um mesmo plano de trabalho, isto é, em uma mesma rotina de usinagem. Então, optou-se por efetuar a usinagem em vazio e logo em seguida com a peça, nas condições 1 e 2 do Parâmetro 1 (veja-se Tabela 8-b) definindo-se assim dois experimentos para avaliar quatro cenários:

- Experimento 1: Usinagem a seco, em vazio e em seguida a usinagem.
- Experimento 2: Usinagem com emulsão, em vazio e em seguida a usinagem.

A natureza dos valores outorgados aos parâmetros permitiu reduzir a matriz de experimentos inicial em dois únicos experimentos. No entanto, para informação do leitor, no caso da presença de uma maior quantia de parâmetros que não apresentem essa flexibilidade, existe o método de Taguchi para o projeto de experimentos. Esse método utiliza uma série de matrizes ortogonais para reduzir drasticamente a quantidade de experimentos necessários. Por exemplo, para sete parâmetros avaliados em dois níveis de influência (2^7) seriam necessários 128 experimentos. Com o método de Taguchi, reduzir-se-ia a até oito experimentos. Essa redução garante bons resultados se as interações mútuas dos vários parâmetros não forem muito significativas. Caso contrário, matrizes maiores devem ser utilizadas para atenuar os erros. (CORRÊA e CORRÊA 2006, p. 199)

3.2.3. Metodologia para a execução dos experimentos

Inicialmente a máquina-ferramenta foi preparada da seguinte forma:

- a. Montagem da peça. Ambos os experimentos começaram com a montagem da peça na mesa de trabalho. Esta foi fixada com 4 parafusos. Depois de presa, definiu-se manualmente o eixo de coordenadas para localizar o zero da máquina.
- b. Conexão do medidor. O analisador de qualidade de energia foi conectado à entrada de alimentação de energia elétrica da máquina-ferramenta. Para tanto, manteve-se a máquina desligada e sem contato com a rede elétrica. Depois de conectado o analisador em cada fase da linha de energia, como explicado anteriormente, destravou-se a porta do painel elétrico, que por segurança não permite ligar a máquina com a porta de dito painel aberta. Programou-se o analisador com os parâmetros de entrada apresentados na Tabela 5.

- c. Armazenamento de dados. Verificou-se que o servidor estava conectado e pronto pra armazenar as informações da máquina. Em seguida, iniciou-se a gravação de dados no analisador de qualidade de energia, o qual ficou sob observação durante um minuto. O analisador não deveria receber potência alguma pelo fato de a máquina estar desligada, o que foi verificado. Como o consumo de potência registrado foi conforme o esperado, então, conectou-se a máquina à rede elétrica e ligou-se a máquina-ferramenta. Logo após, certificou-se se o analisador de qualidade de energia tinha mudado o consumo, como esperado, e verificou-se se o servidor já havia coletado os dados da mudança do estado da máquina quando ligada. Esta etapa também se mostrou satisfatória.

Após um período de dois a três minutos de inspeção da coleta de dados, deu-se início ao experimento. O procedimento de cada experimento seguiu a descrição de tarefas da máquina-ferramenta explicado na Figura 32, do item 2.1.2 do capítulo anterior. De forma sucinta procedeu-se da seguinte forma:

- a. A máquina tinha feito outras peças quando sofreu intervenção para que se monitorasse seu consumo de energia elétrica. Por essa razão não se efetuou o aquecimento da máquina-ferramenta. Tal aquecimento foi feito no começo do dia da jornada de trabalho, porque a máquina havia ficado desligada por várias horas depois da última operação do dia anterior.
- b. Seguindo o planejamento experimental, efetuou-se o carregamento das 13 ferramentas, descritas no item 3.1.3, junto às programações de cada uma delas, as quais incluem os seus parâmetros. Adicionou-se a programação que corresponde à usinagem, a usinagem “a seco” e a usinagem em vazio, isto é, o plano de trabalho das operações de corte.
- c. Logo após inserir a programação de usinagem e efetuar a inspeção do plano de trabalho da máquina, ativou-se a usinagem em vazio, o qual foi possível mudando-se a programação para que o plano de trabalho fosse afastado da peça. Durante esta tarefa, verificou-se se o trabalho programado para a máquina ocorreu corretamente e segundo as operações definidas na usinagem deste ensaio. A usinagem em vazio foi satisfatória.
- d. Prosseguiu-se com a volta da ferramenta (junto ao eixo-árvore) ao plano original de trabalho, dessa vez para efetuar a usinagem. Concomitantemente verificou-se o

armazenamento satisfatório dos dados no analisador e no servidor e iniciou-se em seguida a usinagem, que até o fim da programação, foi satisfatória.

O segundo experimento foi feito da mesma forma que o anterior. A diferença se manteve restrita aos programas de instruções da máquina-ferramenta, que continham os comandos do subsistema de refrigeração e de remoção de cavacos ativados.

3.2.4. Características esperadas dos experimentos

Conhecendo as tarefas que o centro de usinagem efetua, foram feitas varias medições isoladas de acordo com a natureza de cada tarefa, com o intuito de obter sua média do consumo de energia e de duração que seria consoante com modelo proposto no Capítulo 2. Logo, foram feitos os experimentos como descritos no item anterior (3.2.3.). Os experimentos tiveram características que são agrupadas, a seguir, em dois aspectos: tempo e o processo de usinagem.

- Quanto ao tempo, o ensaio analisado teve as seguintes características:
 - O centro de usinagem operaria em tempo aproximado de 102 min 18 s (6 138 s) efetuando as tarefas descritas na Tabela 9.

Tabela 9: Tempos aproximados para a execução de tarefas

Descrição das tarefas	Duração Aprox. (s)	Proporção Acumulada (%)
A. Programação e espera	753	12,27
B. Carregamento das ferramentas	927	15,10
C. Inspeção	319	5,19
D. Programação e espera	753	12,27
E. Usinagem em vazio	998	16,25
F. Inspeção	319	5,19
G. Programação e espera	753	12,27
H. Usinagem	998	16,25
I. Inspeção e espera	319	5,19
TOTAL	6138	100,00

Fonte – Autor

- A programação e a espera iniciais (A) devem ocorrer quando a máquina-ferramenta está ligada na rede elétrica, porém detida, mas com as luminárias e o CNC acesos.

Quando a máquina registra a espera inicial, se subentende que o operador está ocupado aprontando a programação do CNC, as ferramentas e fixando a peça na mesa de trabalho. O tempo estimado é uma média calculada a partir de uma amostra aleatória em processos de fresamento na máquina-ferramenta em estudo.

- No carregamento das ferramentas (B) efetuam-se três passos: primeiramente, para colocar a ferramenta no porta-ferramentas abre-se a porta da máquina e, em seguida, fecha-se a mesma; como segundo passo, através do CNC a máquina recebe as informações acerca dessa ferramenta; finalmente, a máquina insere a ferramenta no copo do magazine imediatamente disponível com ajuda do TAF. O tempo necessário para o primeiro e o segundo passo depende muito do operador da máquina. Já no último passo, o TAF guarda a ferramenta no magazine em um intervalo de 1,4 min (mínimo) a 3,9 min (máximo), dependendo do fabricante.
- A primeira inspeção (C) deve ser feita para verificar o posicionamento das ferramentas no magazine segundo a programação, assim como para validar o referenciamento das ferramentas com a ajuda de mecanismos de inspeção como sensores *preset* com ou sem contato, entre outros. O tempo estimado é a média de uma amostra de diversos processos de fresamento, os quais também dependem da habilidade e experiência do operador. Espera-se que esta atividade seja repetida após a execução de cada programa efetuado pela máquina.
- A segunda programação no CNC (D) envolve atividades de posicionamento do magazine para dispor a ferramenta que pertence ao primeiro processo de corte, além de inserir o plano de trabalho da máquina para efetuar a usinagem em vazio. O tempo estimado é a mesma média estimada na tarefa A.
- Na usinagem em vazio (E), efetua-se todo o plano de trabalho programado sem encostar-se a ferramenta na peça, com o intuito de validar a sua programação e avaliar o consumo de energia efetuado pela máquina sem o processo de usinagem. A usinagem em geral efetua dois tipos de atividades: a operação e a troca de ferramenta(s). O tempo de corte T_c [min] da operação é calculado de acordo com o comprimento total L [mm] de avanço da mesa adicionado ao diâmetro da fresa dividido pela velocidade de avanço da mesa V_f [mm/min], assim como mostrado na equação (50). Já segundo o fabricante da máquina-ferramenta, o tempo de troca de ferramenta é de 2,65 s.

$$T_c = \frac{L}{v_f} \quad \dots(50)$$

- Após a usinagem em vazio (E), a segunda inspeção (F) tem por objetivo conferir o plano de referenciamento da máquina, assim como validar o plano de trabalho para continuar com a usinagem (H). O tempo estimado segue a explicação da primeira inspeção na tarefa C.
- Após validado o plano de trabalho por meio da anterior inspeção (F), durante a segunda atividade de programação e espera (G) devolveram-se as coordenadas iniciais ao eixo-árvore para conseguir a remoção de material. O tempo estimado é o mesmo tempo inicialmente calculado na tarefa A.
- Na usinagem, propriamente dita (H), efetua-se o plano de trabalho. O tempo estimado é o mesmo tempo calculado para a usinagem em vazio (E), pois se trata do mesmo plano de trabalho.
- A última inspeção (I) envolve atividades de conferir as dimensões do produto, a peça usinada, com as dimensões pré-desenhadas. Entretanto é necessária a conferência não somente da peça usinada, mas também da posição final do eixo-árvore em comparação com o programado através de um sensor de medição, para que se continue com a fabricação de mais cópias exatas daquele produto. O tempo estimado é a mesma média estimada na primeira inspeção.
- O plano de trabalho da máquina para efetuar a usinagem é como mostra a Tabela 10, a qual também mostra os tempos estimados nos processos de corte ou operações. Nela toma-se como o tempo para troca de ferramenta o valor estimado pelo fabricante da máquina-ferramenta.

Tabela 10: Atividades no plano de trabalho da máquina

Plano de Trabalho	Tempo estimado (s)
Troca de ferramenta T1	2,65
Operação 1	40
Troca de ferramenta T2A	2,65
Operação 2	172
Troca de ferramenta T3	2,65
Operação 3	60
Troca de ferramenta T4	2,65
Operação 4	47
Troca de ferramenta T2B	2,65
Operação 5	37
Troca de ferramenta T5A	2,65
Operação 6	37
Troca de ferramenta T6	2,65
Operação 7	38
Troca de ferramenta T5B	2,65
Operação 8	24
Operação 9	34
Operação 10	104
Troca de ferramenta T7	2,65
Operação 11	20
Troca de ferramenta T8	2,65
Operação 12	101
Troca de ferramenta T9	2,65
Operação 13	127
Troca de ferramenta T10	2,65
Operação 14	30
Troca de ferramenta T11	2,65
Operação 15	16
Troca de ferramenta T12	2,65
Operação 16	54
Troca de ferramenta T13	2,65
Operação 17	17
TEMPO TOTAL	997,75

Fonte – Autor

- Vale destacar que, estatisticamente, 52,39 % do tempo se refere às etapas de programação, inspeção e tempos de espera entre as tarefas. O tempo de espera foi definido como o tempo em que a máquina não faz atividade nenhuma, em que não registra nenhum tipo de comando de instrução. O uso do tempo pode ser bem justificado pela inspeção das informações que o operador precisa conferir no plano de trabalho, como também pode simplesmente não ser utilizado, não sendo, dessa forma, justificado. Muito depende da complexidade da peça e da habilidade do operador.

O plano de trabalho, se longo, precisa ser dividido e carregado ao CNC em partes. Uma primeira parte no início, e outra parte no meio da operação da máquina, isso quando a memória do CNC é pequena para armazenar programas que vão além da capacidade do CNC. Seguindo o esquema da Figura 57 da máquina em operação, junto aos dados colhidos estatisticamente, estima-se um tempo de usinagem inferior à terça parte do tempo total do uso da máquina-ferramenta (27%), sendo que o carregamento das ferramentas no magazine ocupa 15% do tempo. Em suma, estima-se que a máquina-ferramenta será utilizada em menos da metade do tempo total (47.61%), o resto do tempo, em termos de consumo de energia, a máquina está em tempos de espera enquanto eventos como programação, inspeção ou mesmo sem atividade, ocorrem.

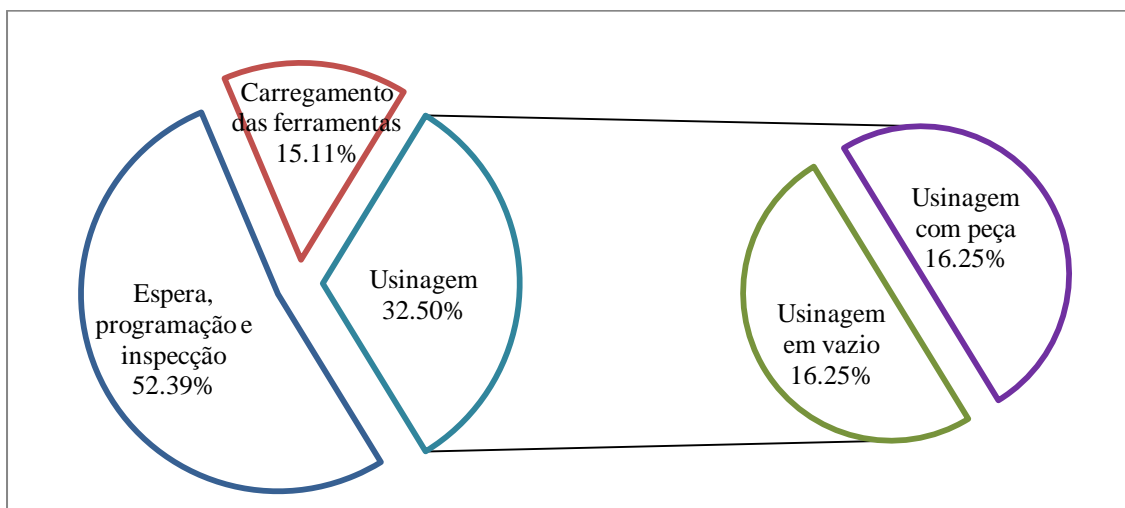


Figura 57: Tempo estimado distribuído no uso da máquina-ferramenta nos experimentos

Fonte – Autor

- Quanto ao processo de usinagem, as características foram as seguintes:
 - Foi programado um mesmo processo de usinagem para duas condições, em vazio e com remoção, com o intuito inicial de verificar a programação das operações, mas que também ajudou a identificar as variações no consumo da potência entre ambas as condições.
 - No item anterior deste capítulo foram descritas 13 ferramentas (fresas), com as quais se efetuaram 17 operações.

Ter em mente as características do experimento se mostra primordial para avaliar os resultados e discernir as conclusões do trabalho apresentadas no capítulo seguinte.

4. Resultados e Discussões

Na Figura 58 estão mostrados os valores médios da potência instantânea atingida pela máquina-ferramenta a cada dois segundos nas condições a seco e com fluido. Também é mostrada a sequencia de tarefas que o centro de usinagem efetuou nos experimentos.

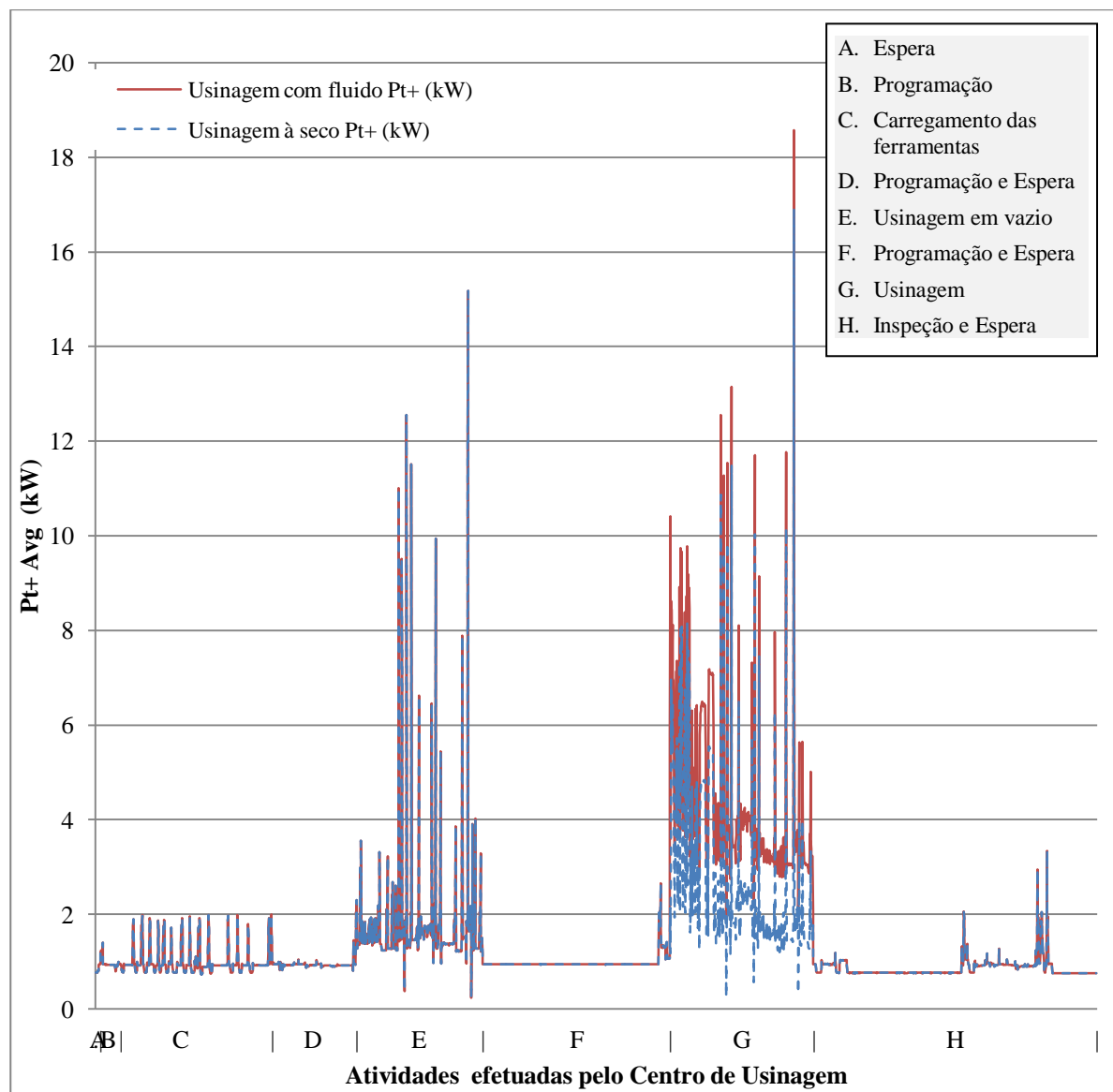


Figura 58: Curva de carga dos experimentos

Fonte – Autor

Na Figura 58 observa-se a ausência de periodicidade durante tarefas como a espera, a programação e a inspeção – em A, B, D, F e H, respectivamente – enquanto que esta é evidente durante o carregamento de ferramentas – em C. Por outro lado, comparando-se a curva de carga da usinagem em vazio (E) com a da usinagem (F) no mesmo plano de trabalho em ambas as condições (com fluido e sem), pode-se afirmar: a usinagem, em geral, é mais demorada quando comparada à usinagem em vazio, atingindo maiores valores de potência e, consequentemente, consumindo mais energia. Na Figura 58 fica visível que a escala de variação da potência na usinagem em vazio é muito menor que quando se efetua a usinagem, acentuando-se essa variação quando esta ocorre com fluido.

4.1. Análise dos dados coletados

4.1.1. Consumo de energia elétrica

No registro do consumo de energia elétrica, os dados de entrada do analisador de qualidade de energia são valores médios no subperíodo de integração de potência instantânea, no período de um ciclo de entrada. Tais dados passam por uma análise periódica no período de integração de 2 segundos. Nesse período de integração, o analisador calculou os valores máximos, mínimos e médios da potência ativa P , da potência reativa Q e do fator de potência FP para cada fase. Ao final desse período de integração os valores P , Q e FP foram armazenados. A seguir é apresentada uma breve análise dos valores P , Q e FP coletados.

4.1.1.1. Potência ativa

A potência ativa registrada é a potência ativa instantânea total, que é a somatória das potências de fase (P_t). Na Figura 59, observa-se a presença de dois tipos de potências ativas: de importação (P_{t+}) e de exportação (P_{t-}).

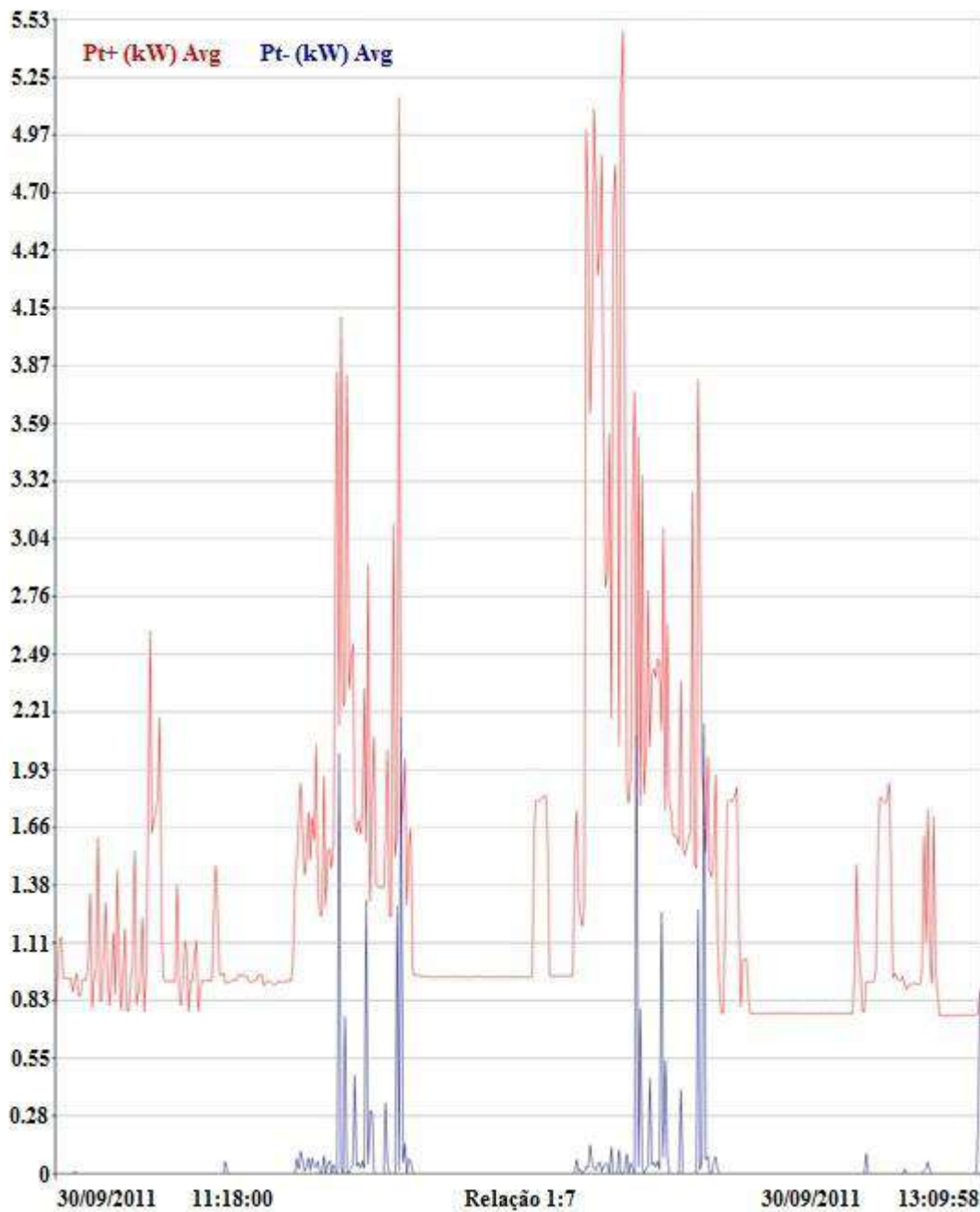


Figura 59: Leitura da potência ativa

Fonte – Analisador de qualidade de energia trifásica (Metrel MI 2292)

A potência ativa de importação ($Pt+$) é predominante na Figura 59 e representa o consumo de energia elétrica pela máquina-ferramenta em operação. Enquanto a potência ativa de exportação ($Pt-$) surge por causa da frenagem dos servomotores que acabam absorvendo potência ativa e fornecendo potência reativa quando os eixos (X, Y e Z) estão se movimentando. O responsável pela frenagem e aceleração desses mecanismos são os variadores de velocidade, também conhecidos como “drivers”, embora essa não seja uma denominação correta.

4.1.1.2. Potência reativa

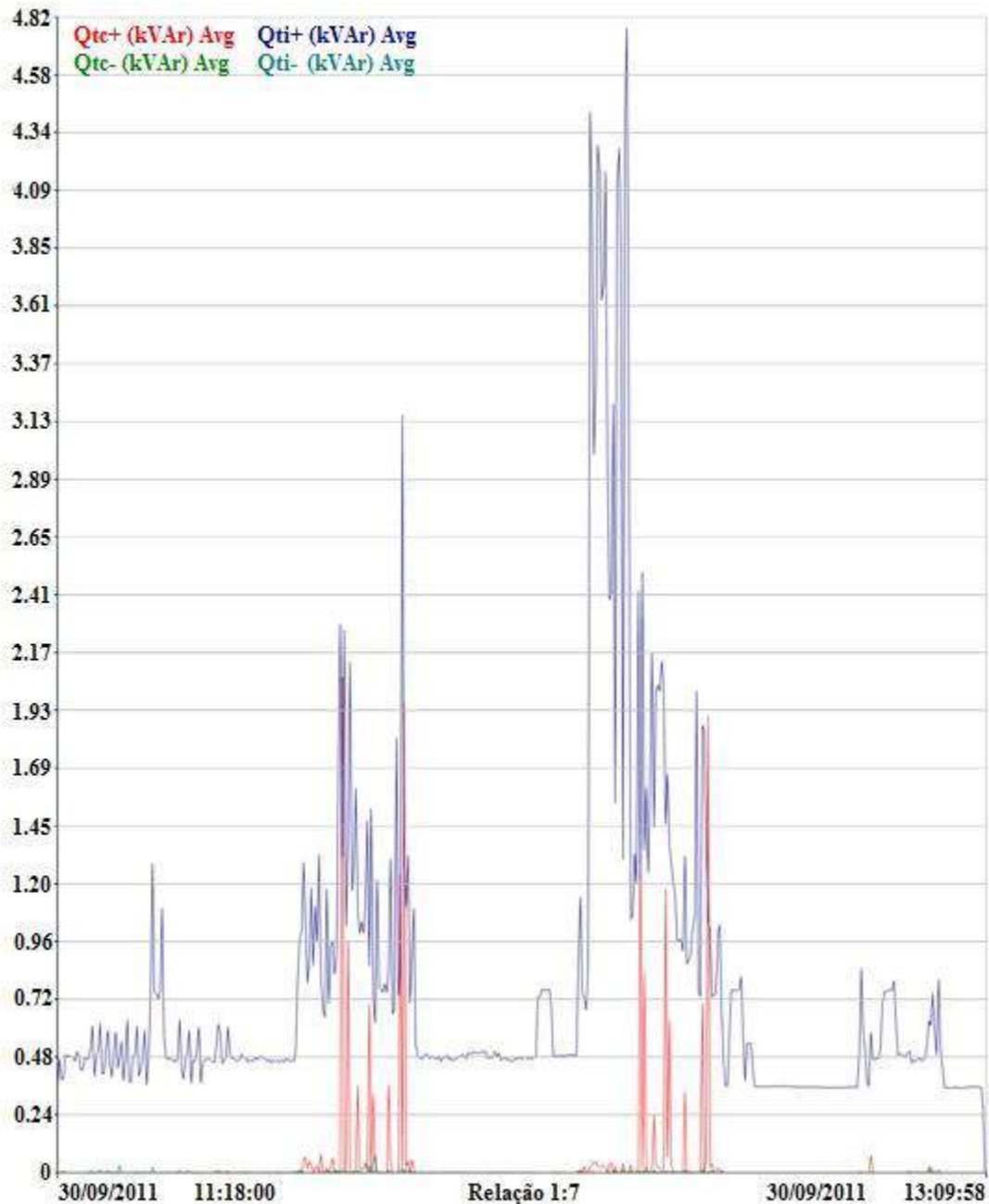


Figura 60: Leitura da potência reativa

Fonte – Analisador de qualidade de energia trifásica (Metrel MI 2292)

A potência reativa apresentada na Figura 60, de forma semelhante à potência ativa, é a potência reativa instantânea total, que é a somatória das potências de fase. Nota-se a presença dos 4 tipos de potência reativa: indutiva de importação (Q_{ti+}), capacitiva de importação (Q_{tc+}), indutiva de exportação (Q_{ti-}) e capacitiva de exportação (Q_{tc-}). Na Figura 60, a curva em azul apresenta momentos constantes que se intercalam com momentos variáveis, podendo

ser feita sua divisão em quatro momentos de potência reativa variável: o primeiro é o carregamento das ferramentas, o segundo é a usinagem em vazio, o terceiro é a usinagem e o quarto é a inspeção. Note-se que as potências reativas de importação capacitiva e indutiva seguem o padrão de comportamento de consumo da P_{t+} para Q_{ti+} e da P_{t-} para Q_{tc+} .

4.1.1.3. Fator de potência

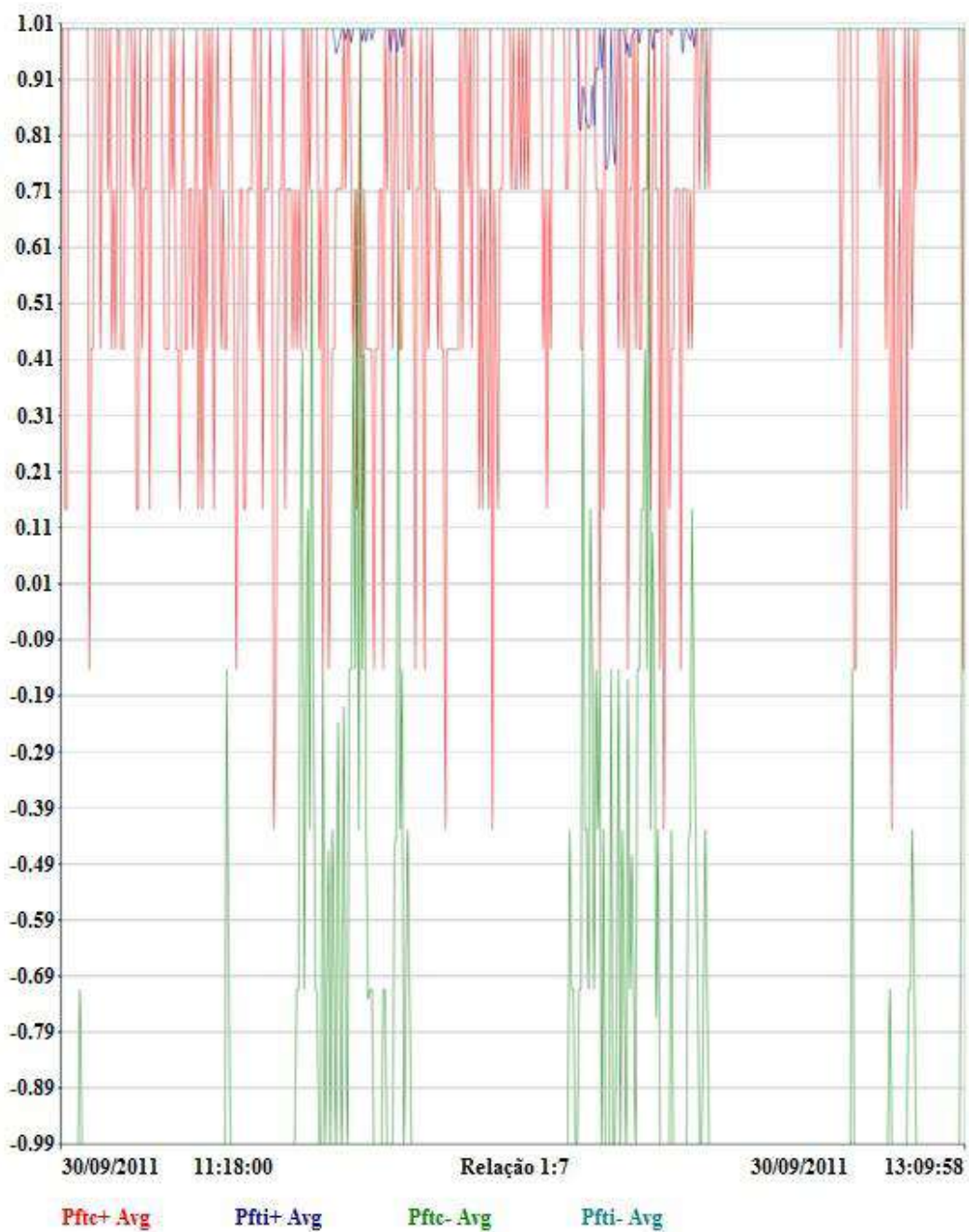


Figura 61: Leitura do fator de potência

Fonte – Analisador de qualidade de energia trifásica (Metrel MI 2292)

O fator de potência registrado apresentado na Figura 61, de forma semelhante à potência reativa, apresenta valores indutivos e capacitivos. Na Figura 61 observa-se a presença dos quatro tipos de fator de potência: indutivo de importação (FP_{ti+}), capacitivo de importação (FP_{tc+}), indutivo de exportação (FP_{ti-}) e capacitivo de exportação (FP_{tc-}), os quais seguem a mesma explicação da potência reativa capacitiva e indutiva nos seus fluxos de importação e de exportação.

4.1.1.4. Avaliação de P , Q e FP

Em geral, o centro de usinagem comporta dispositivos de carga indutiva. Isso se comprova nos dados registrados durante o tempo de operação da máquina, em que se nota a presença de valores pertencentes a cargas capacitivas e indutivas. A seguir tem-se uma Tabela-resumo com os valores máximos e mínimos atingidos em instantes indistintos e os valores totais de consumo de energia elétrica em cada cenário.

Tabela 11: Máximos, mínimos e totais trifásicos da coleta de dados no plano de trabalho

Parâmetros	Cenário 1: usinagem a seco			Cenário 2: usinagem com fluido		
	Máximo	Mínimo	Consumo de energia elétrica total	Máximo	Mínimo	Consumo de energia elétrica total
Potência ativa total (P_{t+}, P_{t-})						
P_{t+}	16,90 kW	0,23 kW	2 409,33Wh	18,58 kW	0,23 kW	2 959,55Wh**
P_{t-}	11,99 kW	0 kW	84,43Wh	11,99 kW	0 kW	84,43 Wh
Potência reativa indutiva total (Q_{ti+}, Q_{ti-})						
Q_{ti+}	9,7 kVAr	0,29 kVAr	1 460,69 VARh	9,7 kVAr	0,29 kVAr	1 638,99 VARh*
Q_{ti-}	0,55 kVAr	0 kVAr	0,93 VARh	0,55 kVAr	0 kVAr	0,93 VARh
Potência reativa capacitiva total (Q_{tc+}, Q_{tc-})						
Q_{tc+}	10,06 kVAr	0 kVAr	65,92 VARh	10,06 kVAr	0 kVAr	65,92 VARh
Q_{tc-}	0,13 kVAr	0 kVAr	1,73 VARh	0,13 kVAr	0 kVAr	1,73 VARh
Fator de potência indutivo total (P_{fti+}, P_{fti-})						
FP_{ti+}	1	0,01	0,99	1	0,01	0,99
FP_{ti-}	1	0,74	1,00	1	0,74	1,00
Fator de potência capacitivo total (P_{ftc+}, P_{ftc-})						
FP_{tc+}	1	0,60	1,00	1	0,60	1,00
FP_{tc-}	1	0,03	1,00	1	0,03	1,00
** Sem a unidade de refrigeração atinge 2 873,31 Wh						
* Sem a unidade de refrigeração atinge 1 630,96 VARh						

Fonte – Autor

Em princípio, o centro de usinagem é uma máquina que absorve energia ativa e “ocupa espaço” com a energia reativa, e então, não a gera. Espera-se, portanto, valores de $Pt+$ e nenhum valor significativo de $Pt-$. Contudo, a presença de valores de $Pt-$, principalmente durante a usinagem, são justificados pela presença de mecanismos de proteção dos eixos (dos servomotores), pela “sobre-excitação” dos servomotores, pelos inversores de frequência e pelos variadores de velocidade. Esta explicação deve ser abordada em pesquisas futuras, pois a presença de $Pt-$ pode trazer prejuízo ao fator de potência, assim como também ao funcionamento e à eficiência energética da máquina-ferramenta. Pode ser notado na Tabela 11, que tanto em um cenário quanto no outro, a $Pt-$ não muda e nem acumula uma quantidade importante. Cabe afirmar então que os elementos auxiliares no cenário 2 não adicionam $Pt-$ ao processo.

Teoricamente, cargas podem apresentar natureza capacitiva ou indutiva. Isso pode ser avaliado no consumo de potência reativa. No entanto, a carga ora recebe energia da fonte, ora entrega energia para a fonte, ora é capacitiva, ora é indutiva, não sendo prevista pela teoria a presença simultânea dos quatro tipos de potência reativa. A potência reativa indutiva (medida em VAR) geralmente se deve às cargas indutivas como motores, indutores e transformadores, podendo, no entanto, apresentar caráter capacitivo em dados momentos de operação.

No que se refere ao fator de potência para cargas que absorvem energia elétrica, espera-se a sua variação no fator de potência indutivo de importação $FPTi+$ e no fator de potência capacitivo de exportação $FPTc-$. No entanto:

- ✓ $FPTi+$ apresenta valores de 0,01 até 1, o que significa que nem toda a potência fornecida é consumida e há uma certa quantidade de potência reativa presente por causa de avanços (carga capacitiva) ou retardos (carga indutiva) de corrente. Contudo, o $FPTi+$ médio durante toda operação da máquina nos cenários 1 e 2 foi de 0,99.
- ✓ $FPTi-$ apresenta valores de 0,74 até 1 e valores -1. Ambos os valores de 1 e de -1 significam que a corrente e a voltagem estão em fase, de modo que toda a potência fornecida é consumida pelo dispositivo quando o valor é 1 e que o dispositivo gera potência quando é -1. Contudo, considerando os módulos, o $FPTi-$ médio durante toda operação da máquina nos cenários 1 e 2 foi de 1.

- ✓ *FPtc+* apresenta valores de 0,60 até 1 e valores -1, interpretados da mesma forma que o *FPti-*. Contudo, o *FPtc+* médio durante toda operação da máquina nos cenários 1 e 2 foi de 1.
- ✓ *FPtc-* apresenta valores de 0,03 até 1 e valores de -1, interpretados da mesma forma que o *FPti-*. Então, a média do *FPtc-* do tempo de medição no cenário 1 quanto no cenário 2 foi de 1.

4.1.2. Tarefas e instruções executadas pela máquina-ferramenta

Através do MTConnect® e do algoritmo de armazenagem de dados foi possível obter os comandos que a máquina-ferramenta recebe para executar alguma instrução. Tais comandos, como mostrado no Apêndice A, facilitam a identificação das tarefas, e consequentemente dos elementos de acionamento responsáveis pela potência atingida na execução das respectivas tarefas efetuadas pela máquina. Para melhor compreensão, as informações da máquina-ferramenta coletadas via MTConnect® foram divididas como exibidas na Tabela 12, a saber: informações gerais, informações do processo de usinagem e informações da máquina.

Tabela 12: Informações coletadas da máquina-ferramenta via MTConnect

Informação	Categoria	XML	Valores
INFORMAÇÕES GERAIS			
Comunicação	Evento	Availability	AVAILABLE, UNAVAILABLE
CNC Ready	Evento	Execution	READY
CNC Active	Evento	Execution	ACTIVE
CNC Stopped	Evento	Execution	STOPPED
INFORMAÇÕES DO PROCESSO			
Carga de X	Amostra	Load	Real [N]
Carga de Z	Amostra	Load	Real [N]
INFORMAÇÕES DA MÁQUINA			
Modo do controlador	Evento		Automatic, manual, manual data input, semi automatic
Execução	Evento		Ready, active, interrupted, stopped
X, Y, Z Comandado	Amostra	PathFeedrate	Real [mm/s]
X, Y, Z Comandado	Amostra	PathPosition	Real [mm]
Velocidade do spindle	Amostra	S1Speed	rpm
Block	Evento	Block	Variável tipo String

Fonte – Autor

Ainda que os dados coletados no CNC não sejam todos os que são necessários para determinar o início ou o fim de cada instrução ou tarefa, há alguns comandos-chave que ajudaram sobremaneira na definição desses parâmetros. A seguir seguem alguns comandos:

- **T...** : Indica uma ferramenta. Se for T2, se entende como “Ferramenta 2”.
- **O0000...** : Indica o nome do programa. Se for O0000T2 se entende como “programa da ferramenta dois”.
- **S...** : Indica a velocidade do motor *spindle* no eixo-árvore em rpm. Exemplos: de S6631 entende-se que a velocidade do *spindle* é de 6631 rpm, de S5849 entende-se que a velocidade do *spindle* é de 5849 rpm, etc.
- **G43H...D...** : Indica a correção da ferramenta por um comprimento definido em milímetros. Exemplo: G43H1D1, G43H2D2
- **M6** : Libera a troca de ferramenta, isto é, que o trocador de ferramenta ative-se para trocar as ferramentas.
- **S...M3** : M3 liga e acelera o *spindle* até atingir a velocidade S. Exemplo: S1263M3, indica que o *spindle* será ligado e acelerado até atingir os 1263 rpm.
- **M5** : Ordena a detenção do *spindle*.
- **G64** : Modo de corte.
- **G17** : Seleciona o plano XY.
- **G94** : Define o avanço.

Com a ajuda dos comandos registrados durante o funcionamento da máquina-ferramenta, determinou-se o começo e o fim das atividades da máquina dentro de cada tarefa. Por exemplo, na tarefa de usinagem, M6 foi usado para definir o começo da tarefa “troca de ferramenta” e M3 foi usado para indicar o fim da troca de ferramentas e o início de cada operação de usinagem.

4.2. Avaliação do consumo de energia durante o uso da máquina-ferramenta

Sabe-se que o consumo total de energia da máquina-ferramenta depende dos subsistemas principais ativados e de outros secundários que dão suporte aos primeiros. No caso do centro de usinagem, os componentes que consomem energia quando a máquina é energizada são: o motor do ar condicionado, a ventilação do painel elétrico, as luminárias, os relés, os disjuntores, os solenoides, as régua e os supressores, entre outros. Com todo esse universo de componentes, considerou-se um tempo de 30 min para determinar um valor médio de consumo de energia da máquina, somente quando ela está ligada, porém sem atividade, ou seja, em

espera, denominada “a potência básica” da máquina. Observou-se três cenários de espera: com porta fechada, com porta aberta e em estado de parada de emergência. O estado de parada de emergência é aquele em que a máquina-ferramenta desliga boa parte dos elementos eletrônicos, da mesma forma em que fica quando está com a porta aberta. Dessa análise estatística obteve-se o seguinte: quando a máquina está ligada, alcança-se 936,54 W quando a porta está fechada e 768,56 W quando a porta da máquina está aberta ou mesmo com porta fechada, mas em estado de parada de emergência. Esses dois valores foram utilizados para discriminar o consumo de energia gasto só pela máquina do consumo total quando ela está em uso, cuja diferença vem a ser o consumo pela atividade da máquina.

A energia total consumida pela máquina-ferramenta no decorrer do tempo foi variada, por causa da utilização ou não dos principais subsistemas da máquina, conforme requeridos em cada tarefa, além da influência de alguns elementos que são utilizados temporariamente para dar suporte ao funcionamento da máquina durante seu uso. A seguir uma Tabela-resumo dessa observação e, nos itens que se seguem, uma breve avaliação do consumo de energia durante cada tarefa.

Tabela 13: Subsistemas ativos por tarefa

Subsistemas \ Tarefas	Carregamento	Usinagem em vazio	Usinagem		Espera	Programação	Inspeção
			SF	CF			
Eixo-Árvore		✓	✓	✓			✓
Mesas de Trabalho “X” e “Y”		✓	✓	✓			✓
CNC	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Trocador Automático de Ferramenta	✓	✓	✓	✓			✓
Lubrificação		✓	✓	✓			✓
Refrigeração (do cabeçote)* ou Unidade de refrigeração	✓	✓	✓	✓			
Refrigeração**				✓			
Pneumático*	✓	✓	✓	✓			✓
Remoção de cavacos**				✓			
Exaustão**				✓			

* Subsistemas ativados automaticamente de forma periódica e independentemente da tarefa
 ** Subsistemas ativados se são programados pelo operador manualmente
 SF: Usinagem sem fluido. CF: Usinagem com fluido.

Fonte – Autor

4.2.1. Consumo de energia durante o carregamento de ferramentas

Como apresentado na Tabela 13, os subsistemas em funcionamento durante o carregamento de ferramentas são principalmente o trocador de ferramenta e o CNC. Já os subsistemas auxiliares a essa tarefa – a refrigeração do cabeçote, a lubrificação e o subsistema pneumático – ficam em funcionamento em diferentes instantes do tempo, de acordo com as necessidades da máquina-ferramenta. Essa tarefa teve uma duração de 16 min 54 s, 109,4% do estimado, sendo que a maior variabilidade acontece devido ao tempo para as programações específicas dentro dessa tarefa ($29 \text{ s} \pm 22 \text{ s}$), localizado nos patamares da potência total da Figura 62.

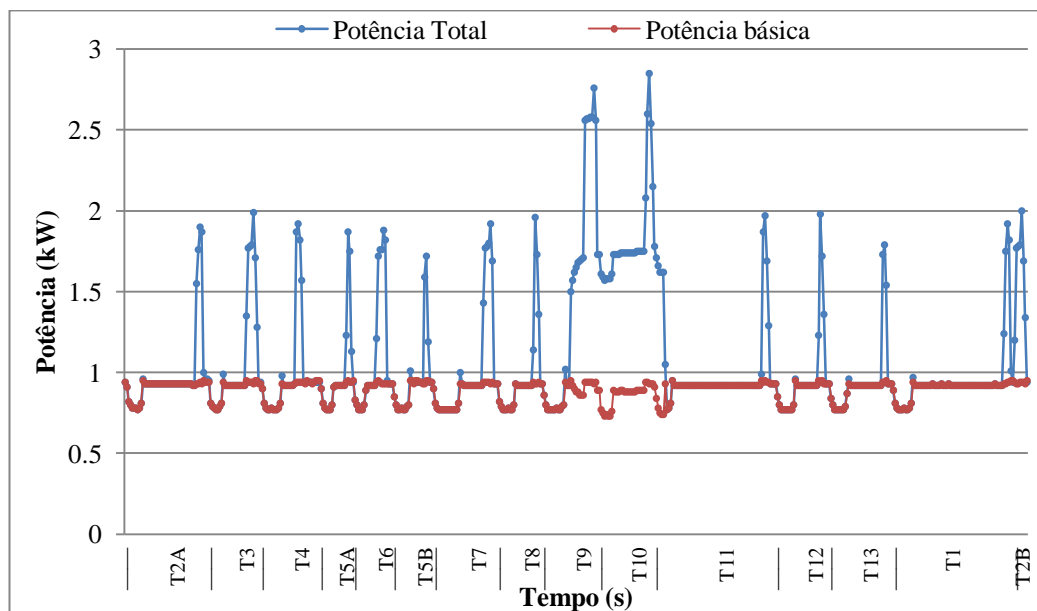


Figura 62: Potência total consumida no carregamento

Fonte – Autor

Na Figura 62 observa-se o comportamento da potência durante os carregamentos das ferramentas. A potência total por cada carregamento, representada pela curva azul, começa com a queda da potência, dado que a primeira ação a se tomar nesta atividade é abrir a porta para colocar a ferramenta no porta-ferramentas. A máquina-ferramenta em geral está desenhada para desligar alguns elementos acessórios da máquina quando se abre a porta da mesma, para fins de segurança do operador, o que explicaria tal queda de potência. Logo após o vale formado por essa queda de potência segue-se um patamar que começa quando a porta da máquina-ferramenta é fechada e o operador insere as informações da ferramenta no CNC. Concluída esta etapa, a ferramenta é guardada no magazine com ajuda do TAF. Essa ação é a

resposta a um comando que ordena ao motor do magazine girá-lo para dispor um “copo” disponível para guardar a ferramenta, enquanto simultaneamente o braço do TAF se posiciona para segurar a ferramenta, que se encontra no cabeçote, e, com um movimento de 180°, guarda a ferramenta no magazine. Tanto o magazine quanto o braço do TAF, ao serem movimentados conjuntamente formam um pico alto de consumo de energia em poucos segundos.

Observa-se também que a periodicidade mudou o nível de potência quando se guardou a ferramenta T9 no magazine até segundos antes do fechamento da porta durante o carregamento da ferramenta T11. Essa mudança aconteceu quando a unidade de refrigeração, mecanismo do subsistema de refrigeração responsável por esfriar o líquido que refrigera o cabeçote e o eixo-árvore, se ativou.

Durante o carregamento das ferramentas a inspeção é muito importante, pois os dados para o processo de referenciamento das ferramentas devem ser bem controlados. A inspeção da altura da ferramenta é muitas vezes conferida na máquina durante a tarefa de carregamento. Para tanto, um sensor *preset* é de muita utilidade. Na Figura 62, o elemento T5B trata-se da inspeção com o sensor *preset*. Já o elemento T2B não tem o mesmo comportamento de consumo como descrito para o carregamento das ferramentas, pois se trata da alocação do magazine com a ferramenta correspondente à primeira operação de usinagem. Sendo no total 13 ferramentas guardadas no magazine.

A curva vermelha da Figura 62 mostra o comportamento do consumo básico de energia, o qual também é variável por causa da abertura e fechamento da porta do centro de usinagem.

4.2.1.1. Análise da potência ativa no carregamento de ferramentas

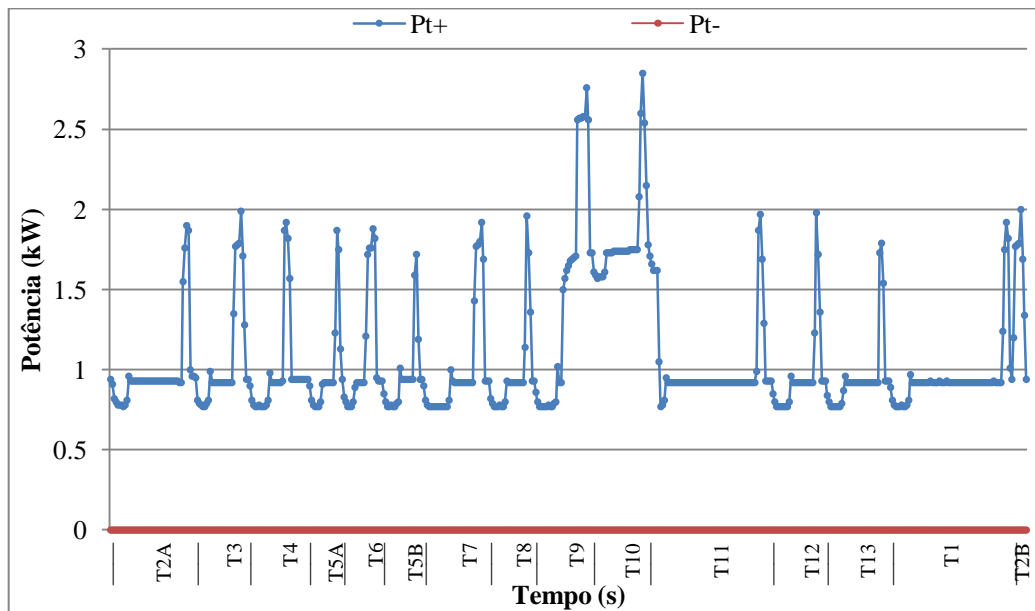


Figura 63: Potência ativa positiva e negativa do carregamento de ferramentas

Fonte – Autor

Na Figura 63, a área abaixo da curva de carga de potência ativa de importação (P_{t+}) dá o consumo de energia. De acordo com cada ferramenta, nota-se que a potência desenha o mesmo comportamento de consumo para cada uma delas. Já a potência ativa de exportação (P_{t-}) manteve-se nula durante toda a tarefa, comprovando que o carregamento de ferramentas consome energia puramente ativa, neste caso, energia mecânica para a movimentação do magazine e do TAF.

O consumo total de energia pelo carregamento de ferramentas, incluindo a sua inspeção, foi de 279,79 Wh (atingindo os 304,49 Wh quando se adiciona o consumo pela unidade de refrigeração). Experimentalmente, obtiveram-se valores de consumo entre 6,95 Wh e 35,94 Wh, durante períodos de entre 34 s e 114 s, no carregamento de cada ferramenta.

4.2.1.2. Análise da potência reativa no carregamento de ferramentas

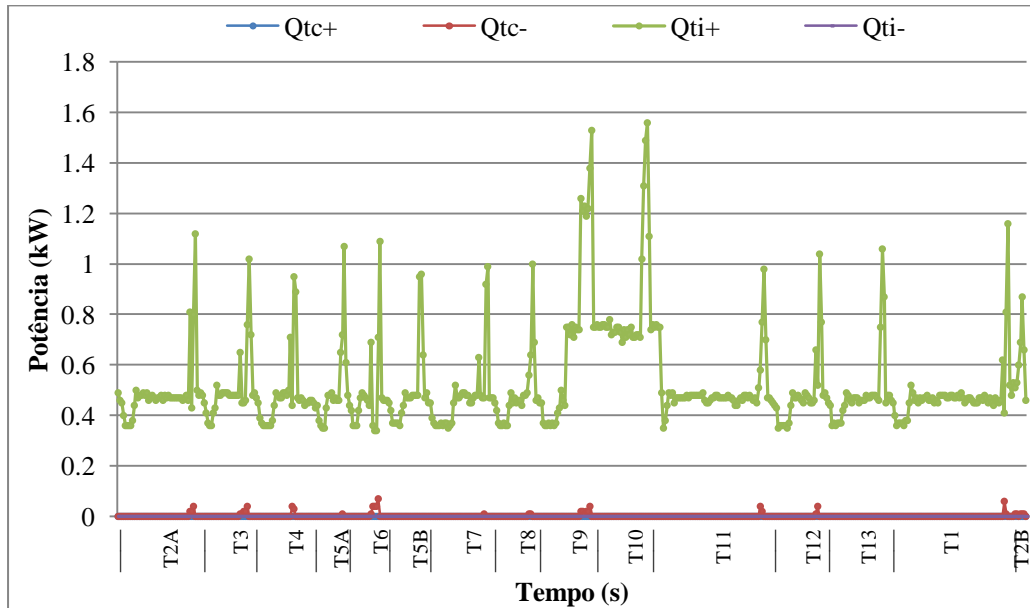


Figura 64: Potência reativa no carregamento de ferramentas

Fonte – Autor

A potência reativa durante essa tarefa, assim como mostrado na Figura 64, explica-se pelo funcionamento dos motores, os quais usam energia reativa para criar e eliminar campos magnéticos que permitam seu normal funcionamento.

Tabela 14: Consumo total de potências reativas no carregamento de ferramentas

Tipos de energia reativa		Q_t (kVAr)	E_t (VArh)
Potência reativa indutiva	Q_{ti+}	529,52	147,09
	Q_{ti-}	0	0
Potência reativa capacitiva	Q_{tc-}	1,70	0,47
	Q_{tc+}	0	0

Fonte – Autor

Na Tabela 14 observam-se as potências reativas totais separadas em seus fluxos de importação (+) e de exportação (-), capacitivos e indutivos, em que a energia acumulada pela Q_{ti-} , Q_{tc-} e Q_{tc+} são consideradas nulas, e a Q_{ti+} apresenta um total de 147,09 VArh.

Os subsistemas envolvidos com o carregamento de ferramentas que possuem motores ou bombas como mecanismos de acionamento são o TAF e a refrigeração do cabeçote. O TAF usa dois motores: um motor para o movimento do magazine e outro para o braço mecânico. Cada motor, segundo dados do fornecedor, consome 0,59 kVA e 0,14 kVA, respectiva-

mente. A refrigeração do cabeçote se ativa automaticamente e de forma independente à tarefa que a máquina está realizando. O mesmo ativou-se quando se realizava o carregamento das ferramentas T9 e T11 no experimento, a qual se visualiza na variação da faixa de consumo no gráfico. Esse subsistema é periodicamente ativado para manter o líquido refrigerante na temperatura adequada. Seu mecanismo de acionamento é um conjunto de bombas de 7bar, 15bar e 50bar para efetuar a refrigeração pelo centro do eixo-árvore as quais, segundo o fornecedor, consomem 2,25 kVA, 4,11 kVA e 6,82 kVA respectivamente, além de uma bomba para acionar a refrigeração do cabeçote de 2,48 kVA de consumo (Anexo A).

4.2.1.3. Análise do fator de potência no carregamento de ferramentas

Durante o carregamento das ferramentas no centro de usinagem, o valor médio do fator de potência para essa tarefa manteve-se no valor de 1 para o F_{Pti+} , o F_{Pti-} , o F_{Ptc+} e o F_{Ptc-} , valor que demonstra que a corrente e a tensão estão em fase. Contudo, no caso do F_{Pti+} , nos seus valores mínimos este apresentou uma média de 0,97, valor que é permitido pela legislação brasileira.

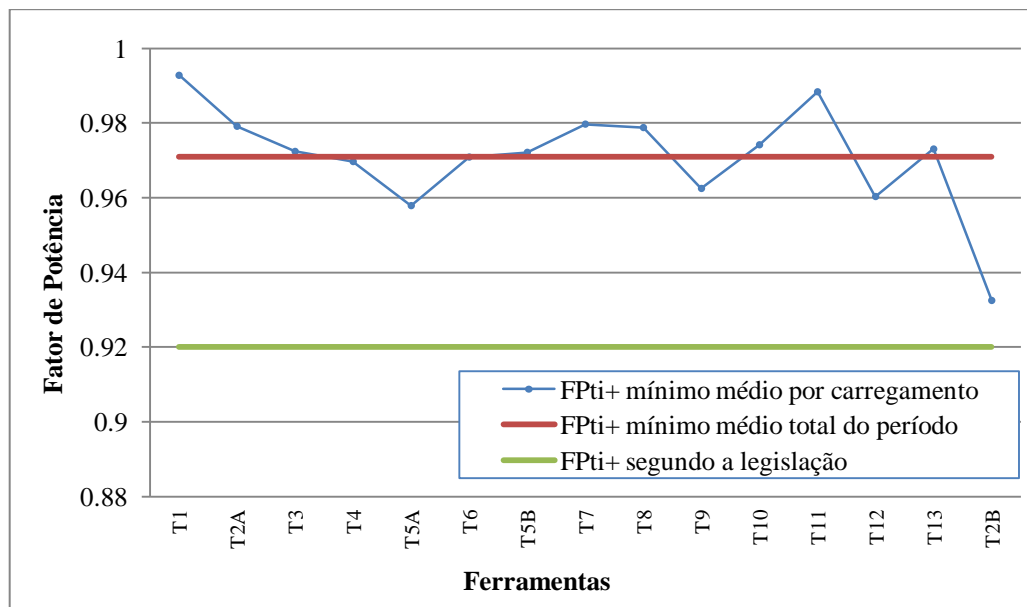


Figura 65: FP capacitivo de importação na tarefa de carregamento de ferramentas

Fonte – Autor

Acompanhando a Figura 65, vê-se que para cada ferramenta o F_{Pti+} geralmente varia ainda dentro dos valores permissíveis. Tal variação se explica pela presença dos motores de indução que constituem os subsistemas aqui analisados.

4.2.2. Consumo de energia durante a usinagem

O consumo de energia durante a usinagem depende dos subsistemas em funcionamento, assim como das condições de usinagem. Os subsistemas mais representativos no que se refere ao consumo de energia foram apresentados na Tabela 13.

Os três cenários de usinagem avaliados ocupam um grupo importante de subsistemas comuns, de acordo com a Figura 35. No entanto, o cenário de usinagem com fluido, além desses subsistemas comuns, precisa do auxílio do subsistema de refrigeração (da peça e da ferramenta), da remoção de cavacos e de exaustão, todos esses fatíveis de serem programados pelo operador. Em termos de tempo e consumo de energia, em cada cenário obtiveram-se os resultados apresentados nos itens a seguir.

4.2.2.1. Análise da potência ativa na usinagem

Para este trabalho não foi efetuado o prognóstico de consumo de energia da máquina em cada operação de usinagem, isto se deve ao fato de as operações serem muito diferentes e dependerem de diversas variáveis, como os parâmetros de corte. No entanto, foi possível estimar o tempo de cada operação. Além disso, a máquina-ferramenta possui mecanismos automáticos que preservam os parâmetros de corte estabelecidos, embora mudem variáveis das quais estes dependem, como por exemplo, a velocidade e o torque.

A potência ativa foi registrada durante a usinagem nas suas formas de importação (P_{t+}) e de exportação (P_{t-}). De acordo com a literatura, para avaliarmos o consumo de energia elétrica pela máquina-ferramenta, deve-se considerar apenas a potência ativa de importação (P_{t+}), a qual foi a mais consumida nos três cenários de acordo com a Tabela 15 a seguir apresentada. Como a potência ativa de exportação (P_{t-}) é entendida como energia devolvida à rede elétrica, ela não será considerada na análise de consumo de energia.

No que diz respeito ao consumo de energia durante a usinagem, a máquina-ferramenta efetua duas tarefas repetitivas: a operação de corte e a troca de ferramentas. Em todos os cenários, as ferramentas estavam presentes e foram trocadas de acordo com o plano de trabalho. O consumo de potência ativa total em cada um dos cenários é dado a seguir:

Tabela 15: Resultados experimentais do consumo de energia na usinagem

	Cenários de medição		
	Em vazio	A seco	Com fluido
Tempo de usinagem	14 min 06 s	16 min 00 s	16 min 0 s
	100%	113%	113%
Pt+ consumida (Wh)	424,33	725,43	1 158,39
	100%	171%	192%
Pt- consumida (Wh)	40,97	41,94	41,94
	100%	102%	102%

Fonte – Autor

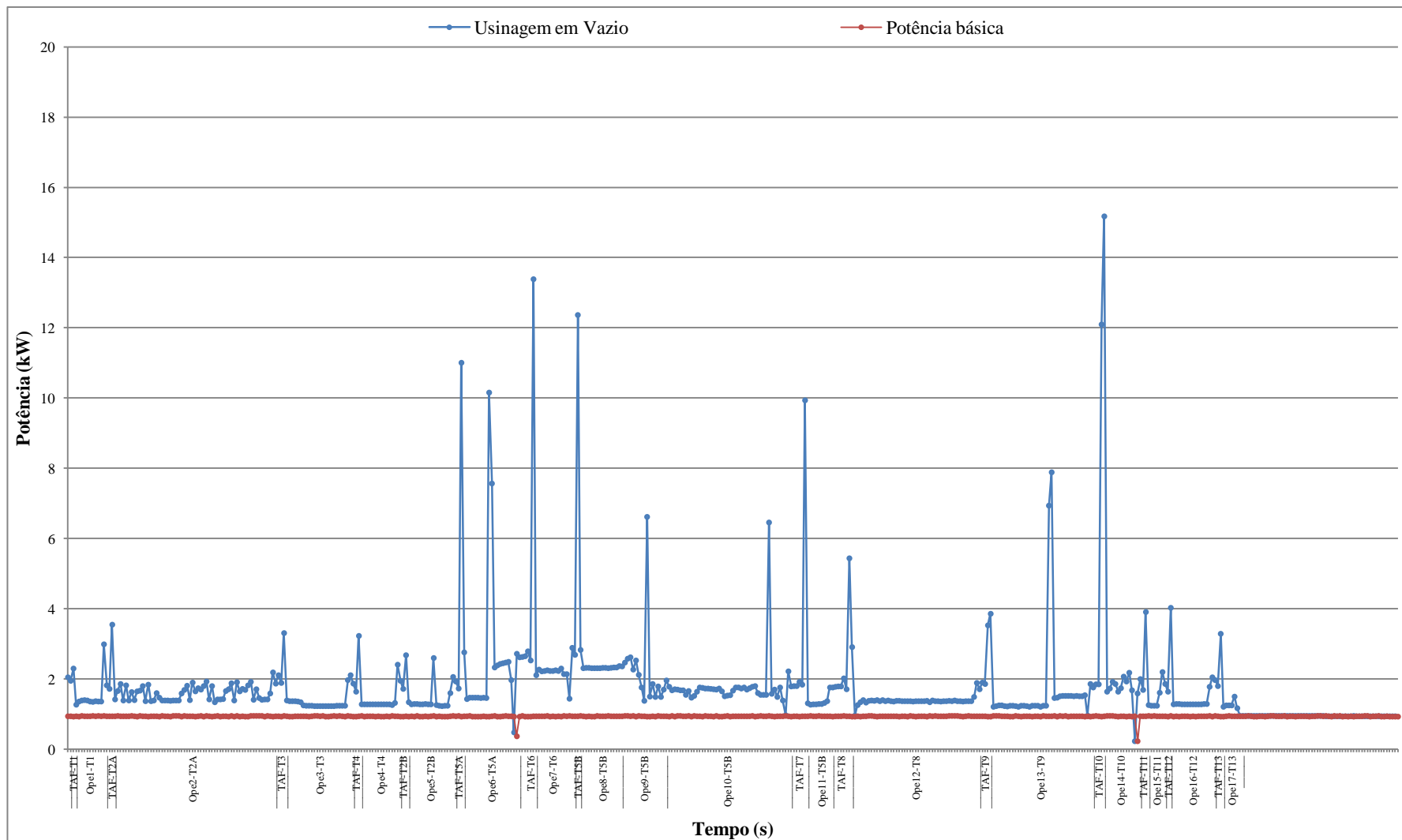
De acordo com os dados apresentados na Tabela 15, o tempo de usinagem foi menor que o tempo esperado (16 min 38 s): em vazio obteve-se 84,8% do valor estimado, enquanto no caso com remoção registrou-se um valor correspondente a 96,2% do estimado. Se comparados os cenários, o tempo de usinagem (a seco ou com fluido) foi 113% maior quando comparado com o tempo de usinagem em vazio. Uma explicação para esse resultado é devido aos seguintes fatores observados:

- A única diferença entre os cenários é a existência de remoção de material, a qual demora o processo de usinagem devido à resistência que oferecem os materiais à usinagem.
- O tempo de troca de ferramenta na usinagem em vazio foi maior do que o tempo de troca na usinagem. Esta observação concorda com a lei de inércia, pois assim que o eixo-árvore termina com uma operação de usinagem, em seguida está trocando de ferramenta. A eficiência com que acelera e freia o eixo Z para posicionar o eixo-árvore no plano de troca da ferramenta, de acordo com os dados recolhidos nos experimentos, parece mais eficiente do que quando a usinagem em vazio. Tal hipótese merece um estudo mais dedicado na área de processamento de respostas na mudança de tarefas dos servomotores com carga e sem carga.

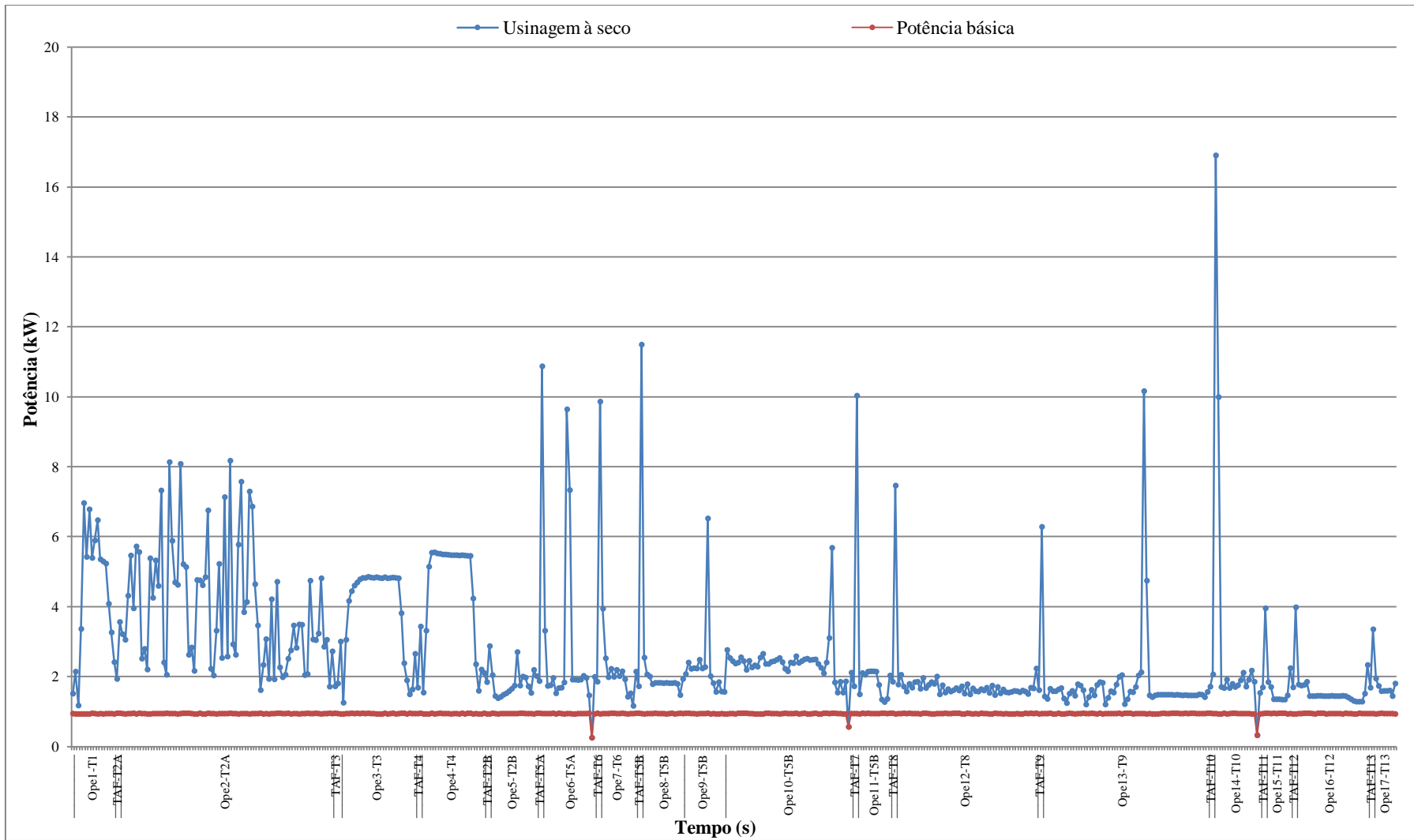
Seguindo as observações anteriores e os dados da Tabela 15, o consumo de energia em vazio, isto é, quando não existe remoção de material, é de 424,33 Wh (com a unidade de refrigeração ativada, atingiu os 449,01 Wh). Quando se passou a efetuar a remoção, o consumo de energia na usinagem a seco subiu para 725,43 Wh, valor 71% maior do que na usinagem em vazio. Por sua vez, o consumo de energia na usinagem com fluido refrigerante atingiu 1158,39 Wh, 173% maior, quase três vezes o consumo de energia da usinagem em vazio. Note-se que entre os cenários de usinagem, a seco e com fluido, não há diferença na *Pt-* porque os subsistemas auxiliares (o remoção de cavacos, a refrigeração e a exaustão) não demandam *Pt-*.

De acordo com a Figura 35 do Capítulo 2, a usinagem em vazio e a usinagem a seco possuem os mesmos subsistemas da máquina-ferramenta em funcionamento, o que permite chegar à seguinte conclusão: a diferença entre o consumo de energia ativa do cenário de usinagem em vazio em relação ao cenário de usinagem a seco seria o consumo de energia pela usinagem propriamente dita. Por outro lado, deve-se observar a possível influência que a remoção de cavaco tem sobre a eficiência dos mecanismos da máquina.

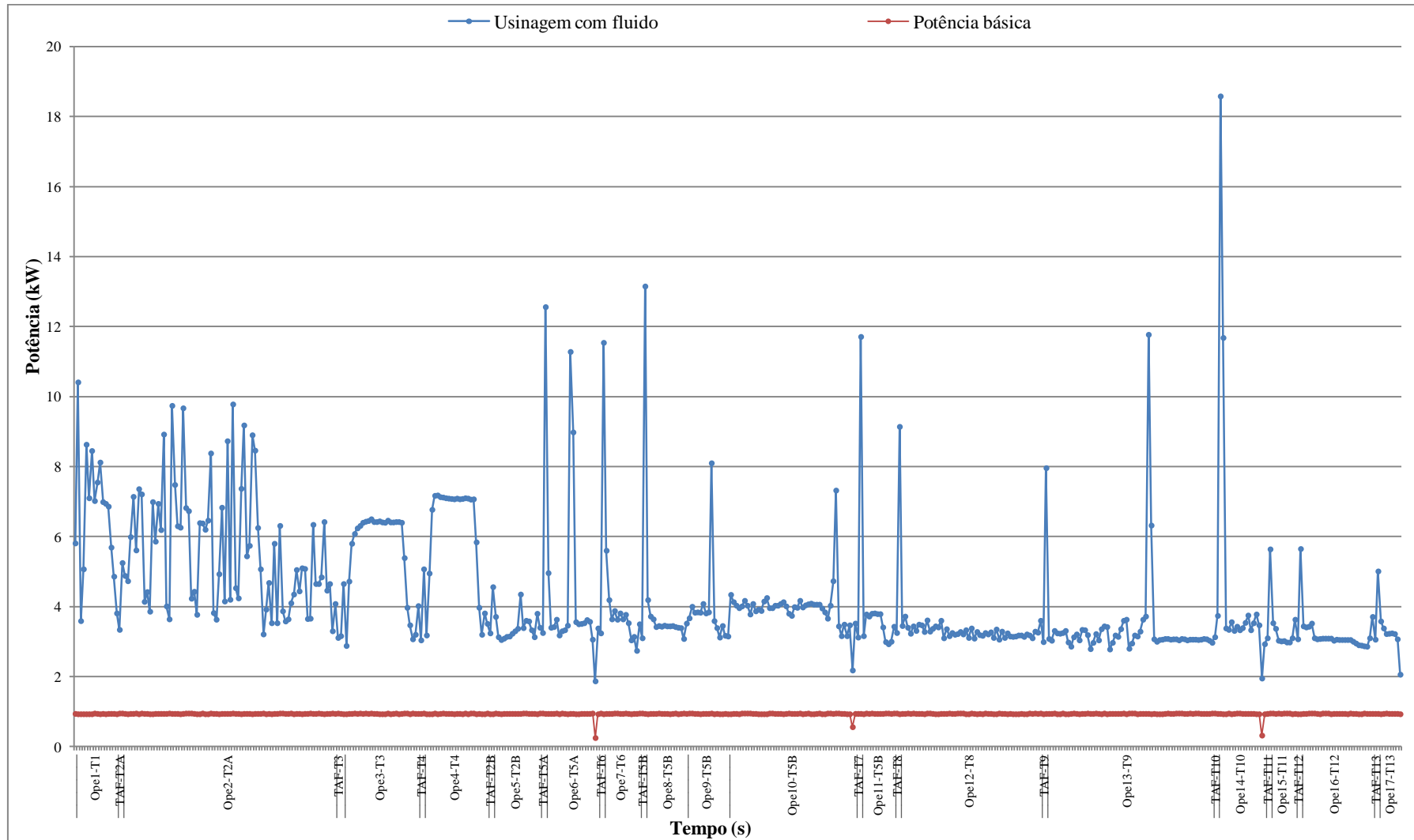
A seguir, na Figura 66, apresentam-se graficamente maiores detalhes do que acontece quando a máquina-ferramenta trabalha efetuando, nos três cenários de usinagem, o mesmo plano de trabalho. Além disso, é mostrado o comportamento da P_{t+} nos três cenários de usinagem experimentados: em vazio (66-a), a seco (66-b) e com fluido (66-c). Para o cenário em vazio foi necessário efetuar a troca de ferramenta para alocar a ferramenta T1 no eixo-árvore. Já no cenário de usinagem a seco e com fluido, a ferramenta T1 estava alocada no eixo-árvore, razão pela qual essa primeira atividade não foi necessária. Em seguida, a sequência de operações e trocas de ferramenta obedeceram ao mesmo plano de trabalho para as diferentes condições de usinagem. Observa-se também nessa Figura que o comportamento da potência comparada entre cada operação em um único cenário é muito diferente, e ainda diferente quando a mesma operação muda de cenário. Por outro lado, a potência básica da máquina acaba sendo estável para os três cenários, o que demonstra que a porta da máquina durante todo o tempo de realização dessa tarefa se manteve fechada.



(a) Usinagem em vazio



(b) Usinagem a seco



(c) Usinagem com fluido

Figura 66: Consumo de potência durante a usinagem

4.2.2.2. Análise da potência reativa na usinagem

A seguir apresentam-se os consumos de energia reativa durante os três cenários de usinagem efetuados pela máquina-ferramenta.

Tabela 16: Consumo total de potências reativas na usinagem

Tipos de energia reativa		Usinagem em vazio		Usinagem a seco		Com fluido	
		Qt (kVAr)	Et (VArh)	Qt (kVAr)	Et (VArh)	Qt (kVAr)	Et (VArh)
Potência reativa indutiva	<i>Qti+</i>	948,00	263,33	1 921,42	533,73	2 563,28	712,02
	<i>Qti-</i>	2,42	0,67	0,86	0,24	0,86	0,24
Potência reativa capacitiva	<i>Qtc-</i>	2,02	0,56	1,78	0,49	1,78	0,49
	<i>Qtc+</i>	122,88	34,13	112,26	31,18	112,26	31,18

Fonte – Autor

Com apoio da Tabela 6 do capítulo anterior e os resultados apresentados na Tabela 16, são feitas as seguintes interpretações:

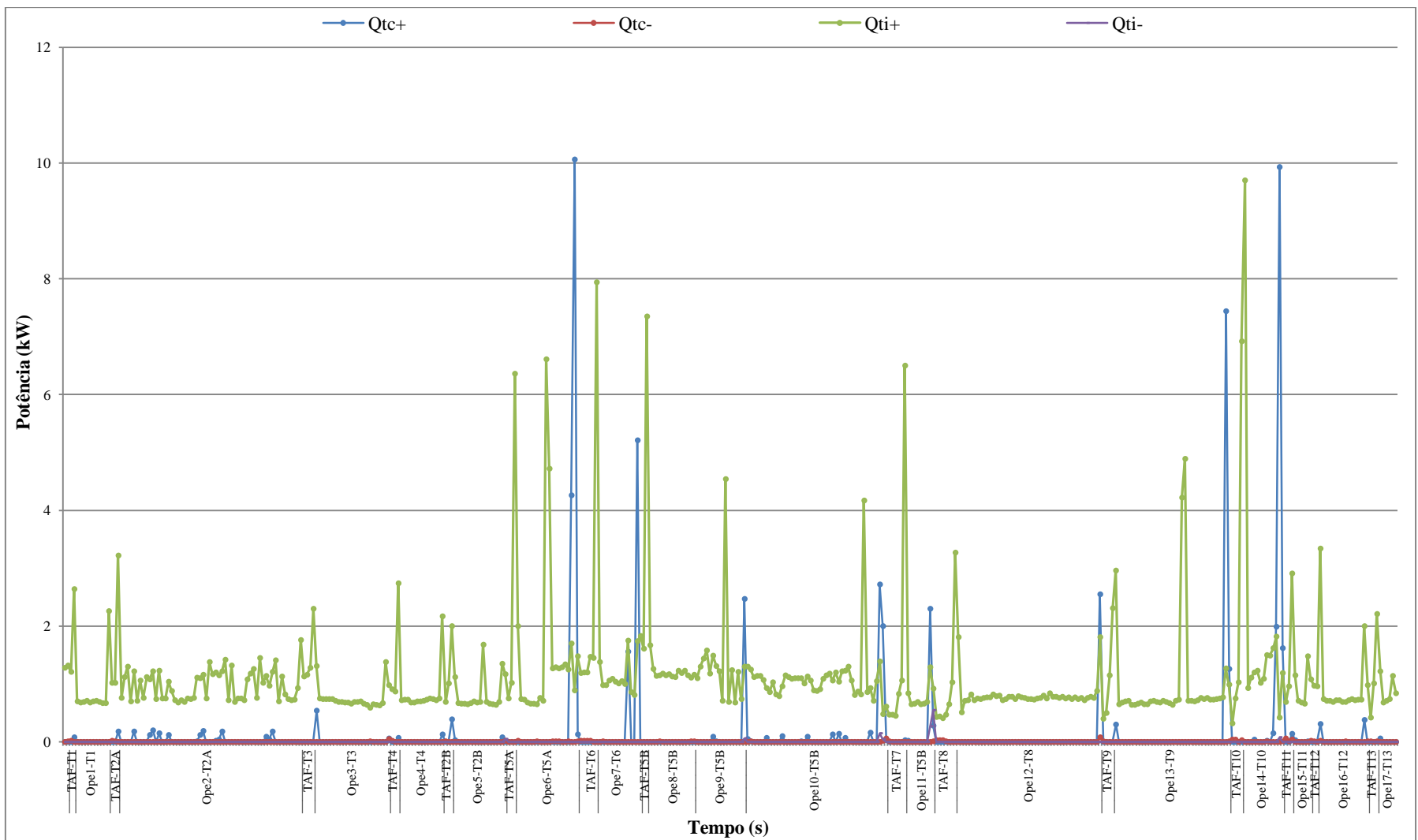
- Na Tabela 16 observam-se as potências reativas totais separadas em seus fluxos para cada cenário. A potência reativa indutiva de importação (*Qti+*) e a potência reativa capacitiva (*Qtc-*) surgem por causa da presença de potência ativa positiva (*Pt+*). No entanto, a presença de potência ativa negativa (*Pt-*) leva à ocorrência de valores significativos de potência reativa indutiva (*Qti-*) e de potência reativa capacitiva (*Qtc+*). Essa interpretação pode ser verificada nos gráficos das Figuras 59 e 60 comparando, por exemplo, *Qti+* e *Pt+* ou *Qtc+* e *Pt-*.
- Os valores predominantes entre os vários tipos de potência reativa são aqueles de importação (*Qti+* e *Qtc+*), por tratar-se de uma carga (máquina-ferramenta) que usa energia elétrica e não de um gerador. Já os pequenos valores de exportação (*Qti-* e *Qtc-*) acontecem devido à energia regenerativa durante a frenagem.
- A variação de energia reativa entre um e outro cenário observa-se principalmente na *Qti+*, por causa da remoção de material (Figura 67). Durante as operações acontece um leve acréscimo no cenário da usinagem com fluido, se comparado com a usinagem a seco, por causa dos subsistemas adicionais (Figura 35, Capítulo 2).
- A potência reativa durante a usinagem, representada na Figura 67, apresenta grande variabilidade, a qual acompanha a potência ativa da Figura 66. A potência reativa é causada pelos mecanismos de acionamento elétrico dos subsistemas envolvidos. Entre os que dão o-

rigem à potência reativa, têm-se, principalmente: servomotores, motores, motor-redutores e bombas, os quais são apresentados e discriminados na Tabela 17 segundo os cenários de usinagem.

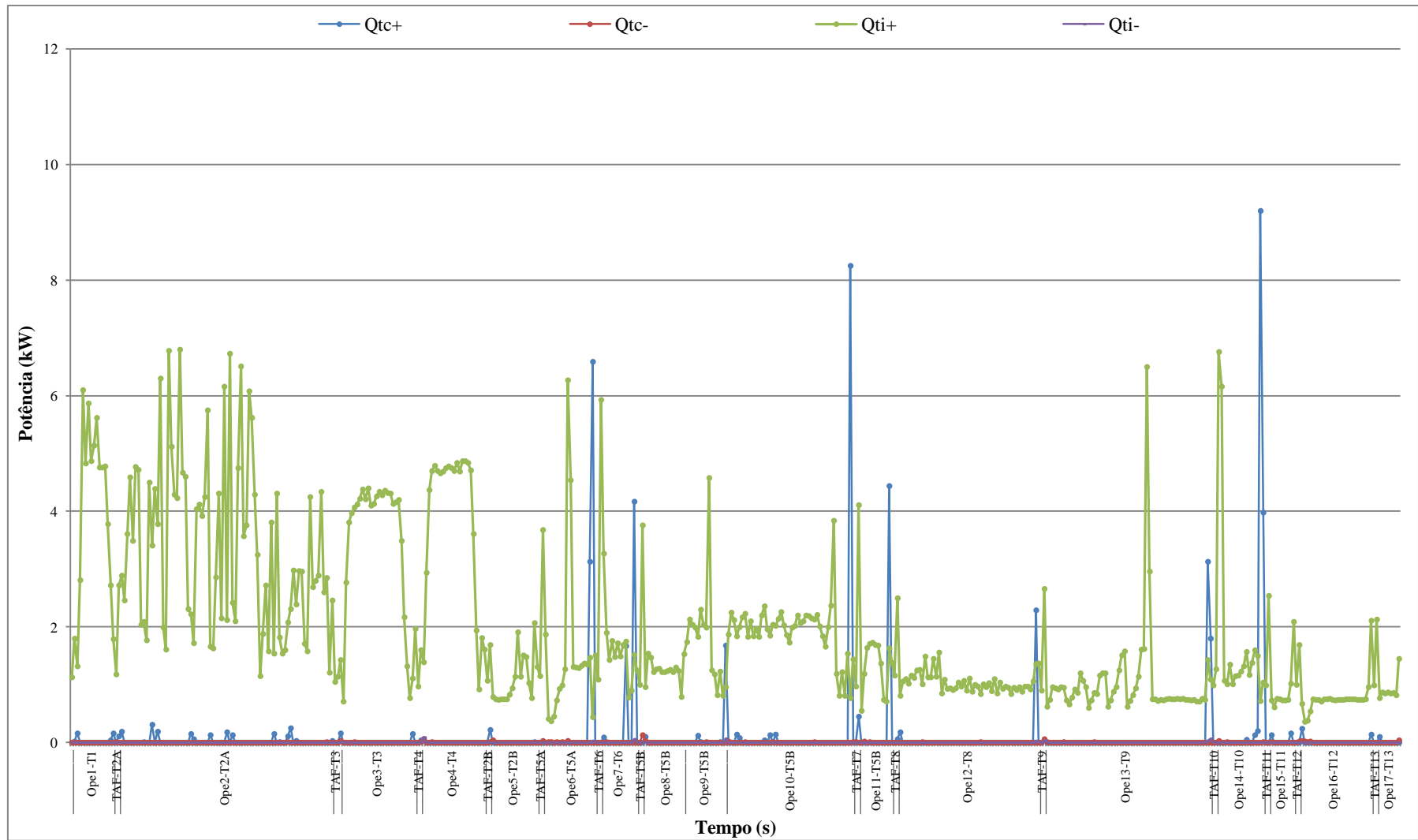
Tabela 17: Mecanismos de acionamento responsáveis pelas potências reativas na usinagem

Subsistemas	Estrutura	Acionamento principal	Potência	Vazio	Usinagem	
					SF	CF
Eixo-Árvore	Cabeçote	<i>Spindle</i> (S1,S2)	(11,15) kW	✓	✓	✓
	Eixo-árvore					
	Eixo Z	Servomotor	2,7 kW	✓	✓	✓
Mesas de Trabalho "X" e "Y"	Mesa superior "X"	Servomotor	2,7 kW	✓	✓	✓
	Fuso					
	Mesa inferior "Y"	Servomotor	2,7 kW	✓	✓	✓
	Fuso					
Trocador Automático de Ferramenta	Braço mecânico	Motor-redutor	1,143 kVA	✓	✓	✓
	Disco porta-ferramentas	Motor	0,594 kVA	✓	✓	✓
Lubrificação	Bomba	Motor	0,007 kVA	✓	✓	✓
Refrigeração do cabeçote*	Ventilador do eixo-árvore	Motor	0,050 kVA	✓	✓	✓
	Unidade de refrigeração	Motobomba	2,477 kVA	✓	✓	✓
Refrigeração **	Reservatório	Motobomba	0,343 kVA			✓
Exaustão	Exaustor de gases	Motor	2,172 kVA			✓
Remoção de cavaco**	Transportador de cavaco helicoidal	Motor	0,682 kVA			✓
Pneumático	Pressostato, válvulas, manômetro.		2,286 kVA	✓	✓	✓
* A unidade de refrigeração é ativada periodicamente, não tendo nenhuma relação com as tarefas da máquina						
** O subsistema é programado manualmente pelo operador						

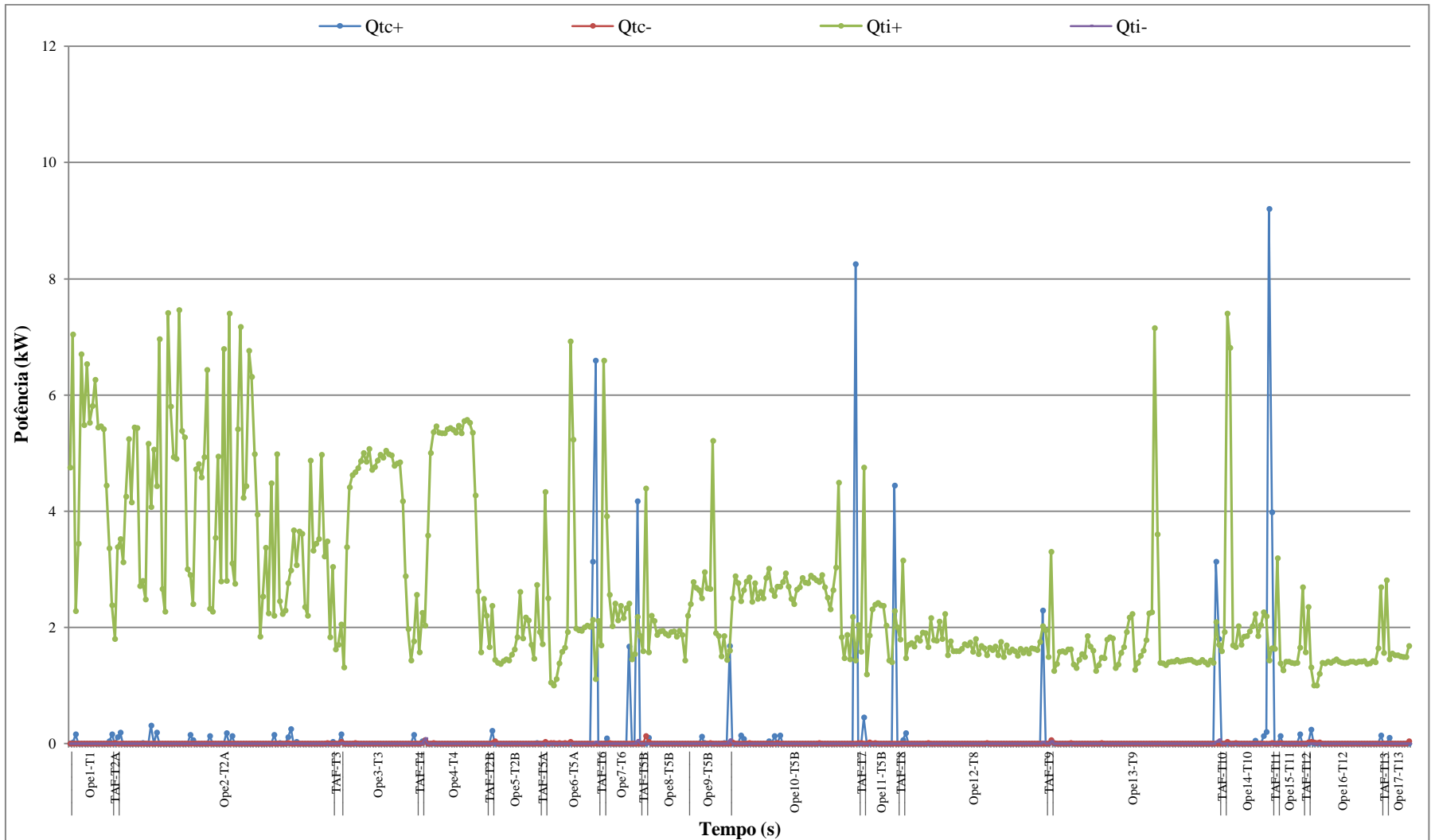
Fonte – Autor



(a) Usinagem em vazio



(b) Usinagem a seco



(c) Usinagem com fluido

Figura 67: Potência reativa positiva e negativa durante a usinagem

Fonte - Autor

4.2.2.3. Análise do fator de potência na usinagem

Os fatores de potência médios para o período de usinagem em cada cenário são apresentados a seguir:

Tabela 18: FP médio em cada cenário de usinagem

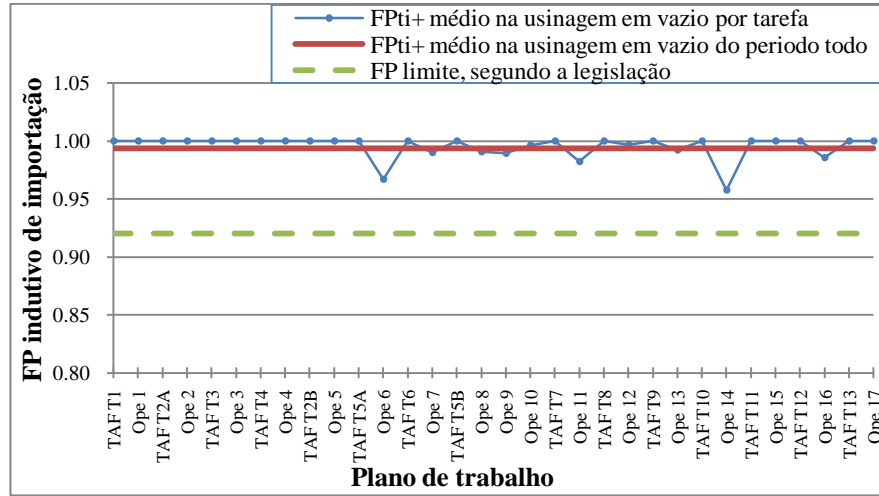
Fator de Potência	Vazio	Usinagem	
		SF	CF
Capacitivo de importação ($FPtc+$)	1,00	1,00	1,00
Indutivo de importação ($FPti+$)	0,99	0,95	0,95
Capacitivo de exportação ($FPtc-$)	0,99	1,00	1,00
Indutivo de importação ($FPti-$)	1,00	1,00	1,00

SF: Sem fluido ou a seco; CF: Com fluido

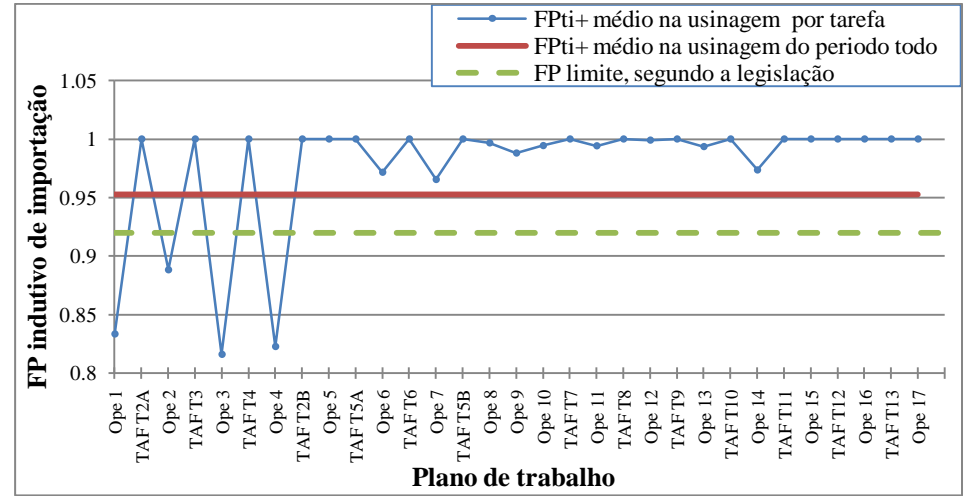
Fonte – Autor

De acordo com a Tabela 18, o valor médio do fator de potência em cada tipo é 1, exceto no fator de potência indutivo de importação ($FPti+$), em que quando a usinagem é em vazio o $FPti+$ foi de 0,99 e, quando muda de cenário, para a usinagem a seco ou com fluido atinge a 0,95. Nota-se também que o valor do fator de potência no cenário de usinagem a seco (SF) é igual a quando se adicionam os subsistemas auxiliares para efetuar a usinagem com fluido (CF), pois estes carecem de fator de potência diferente de 1 de forma independente.

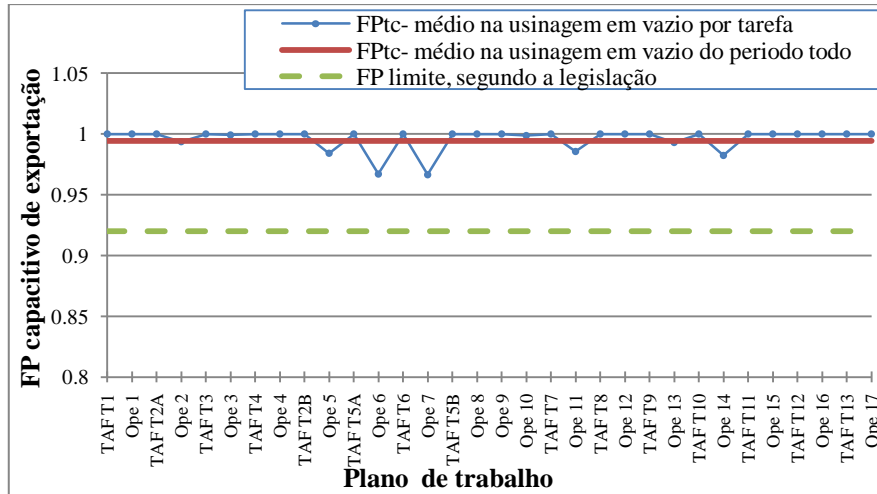
Na Figura 68 apresentam-se graficamente as variações dos valores dos FP atingidos pela usinagem em vazio (Figura 68 - a, c) e com remoção (Figura 68 - b, d) no tipo indutivo de importação ($FPi+$) e capacitivo de exportação ($FPC-$). Nota-se que algumas operações e tarefas atingem fatores de potência médios fora da norma. Segundo a legislação, um fator de potência médio menor que 0,92, durante um período específico de avaliação é punido com uma multa calculada segundo a equação (23). Considerando-se que todos os valores aqui apresentados são valores médios de períodos de tempo relativamente curtos (14 min 6 s para a usinagem em vazio e 16 min para a usinagem a seco ou com fluido), estes podem ser considerados períodos desprezíveis, dado que os valores médios de fatores de potência observados pela legislação são calculados em períodos mensais medidos a cada intervalo de uma hora ou quinze minutos (a medição é feita na entrada da fábrica), e nesse caso não são prejudiciais para a rede elétrica em que funciona a máquina-ferramenta. Porém, considerando o dia a dia de empresas que efetuam o processo de usinagem durante longos períodos de tempo, com valores significativos mensalmente, vale a pena avaliar, em trabalhos futuros, o impacto do $FPi+$ na rede elétrica local de linhas de produção em grande escala com esse processo de fabricação.



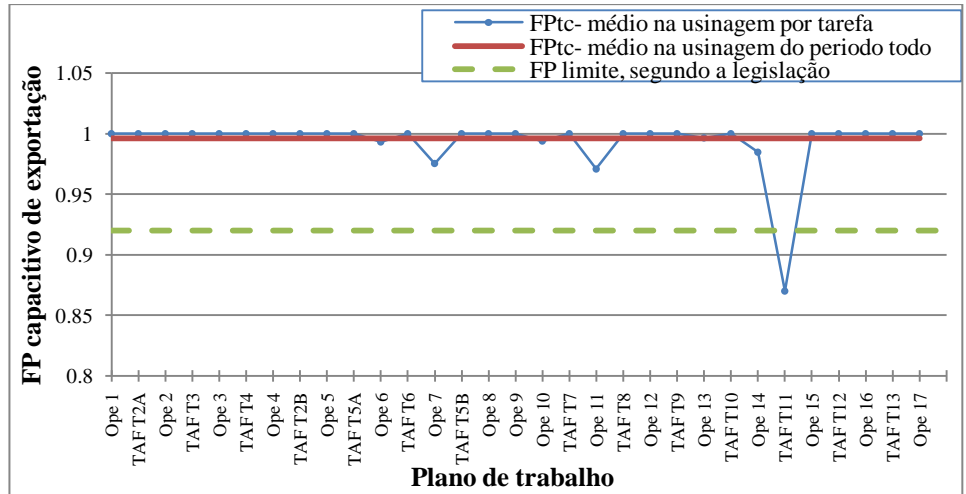
(a) FPti+, usinagem em vazio



(b) FPti+, usinagem



(c) FPtc-, usinagem em vazio



(d) FPtc-, usinagem

Figura 68: FP capacitivo da usinagem

Fonte – Autor

4.2.3. Consumo de energia durante esperas, programações e inspeções

A espera, a programação e a inspeção são atividades necessárias em trabalhos de alta precisão, como no caso da operação de máquinas-ferramentas. Cada uma dessas atividades pode ser executada separadamente ou em conjunto, sendo que o consumo de energia elétrica da máquina-ferramenta depende principalmente da duração das mesmas. Vale ressaltar que nenhuma delas tem um tempo exato de duração, pois o fator crítico que as limita não é a máquina, mas sim o seu operador. Contudo, foram avaliados estatisticamente os tempos de espera, programação e inspeção, com o intuito de conseguir estimativas do período de ocupação da máquina com essas tarefas.

Foram avaliadas de forma conjunta as programações e esperas, já que na maioria das vezes essas apresentaram-se sucessivamente, enquanto as inspeções foram avaliadas de forma individual. Para as programações e esperas obteve-se uma média estimada de 12 min 33 s com uma alta variabilidade de ± 9 min 07 s. Para as inspeções obteve-se uma média de 5 min 19 s com uma alta variabilidade de ± 4 min 15 s. A variabilidade das estimativas sugere que os tempos associados a essas atividades dependam fortemente da habilidade e experiência do operador.

4.2.3.1. Espera

De acordo com a Tabela 13, o subsistema em funcionamento durante a espera é o CNC e alguns elementos elétricos e eletrônicos, como iluminação, régua eletrônica, ar condicionado e ventilação do painel, entre outros, os quais dependem do estado em que se encontra a máquina-ferramenta. No caso do centro de usinagem estudado, os estados da máquina em espera são dois: em condições de operar ou com a parada de emergência acionada.

As esperas foram definidas como aqueles momentos nos quais o centro de usinagem não registrava nenhum comando do plano de trabalho. No entanto, a máquina possui mecanismos que são ativados de forma automática quando necessário. Esse é o caso da unidade de refrigeração, o que explicaria a variabilidade nas esperas 3 e 4 representadas na Figura 69.

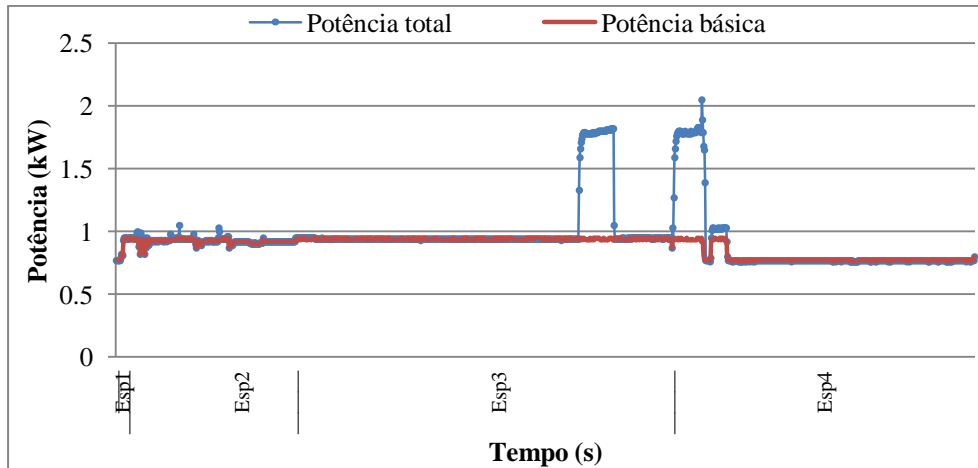


Figura 69: Potência total consumida nas esperas

Fonte – Autor

Na espera 3 (Esp3) da Figura 70, observa-se a variação da potência, a qual atinge valores acima de 1,7 kW no momento em que é ativada a unidade de refrigeração, que está programada para funcionar de forma periódica e independente do estado e tarefas da máquina, unicamente dependente da temperatura do líquido refrigerante. Já na espera 4, observa-se a queda do nível de consumo de potência, que se estabiliza no valor de 768,56 W, um valor menor do que a potência básica (936,54 W). Isso indica que a espera da máquina ocorreu com a porta aberta ou com a parada de emergência acionada.

4.2.3.1.1. Análise da potência ativa nas esperas

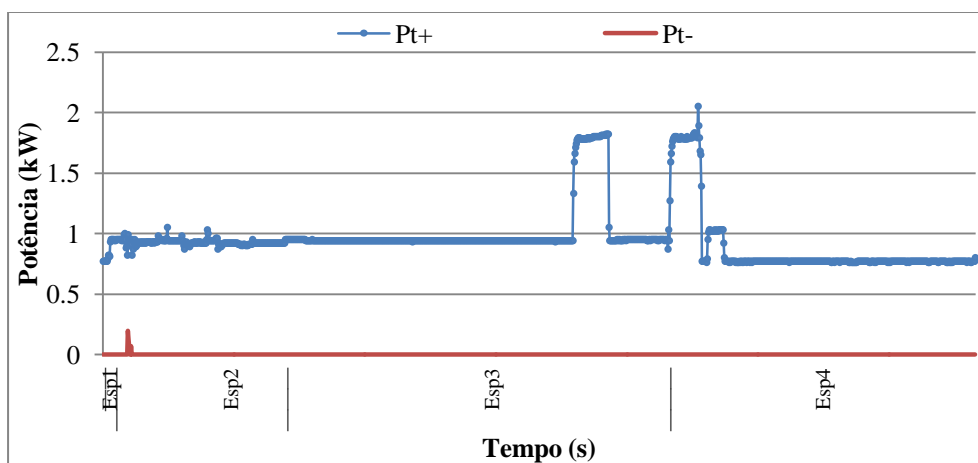


Figura 70: Potência ativa positiva e negativa do tempo de esperas

Fonte – Autor

Na Figura 70, a área sob a curva de carga de $Pt+$ representa o consumo de energia. Nessa situação os elementos internos da máquina consomem energia devido à perda de energia nos circuitos que, por efeito Joule, acabam aquecendo a máquina, tornando necessária a ventilação do painel elétrico, disjuntores e reles, entre outros elementos.

O consumo total de energia durante as esperas no experimento foi de 656,96 Wh e teve duração total de 44 min 24 s. As esperas aconteceram antes de cada programação ou entre programações sucessivas.

4.2.3.1.2. Análise da potência reativa nas esperas

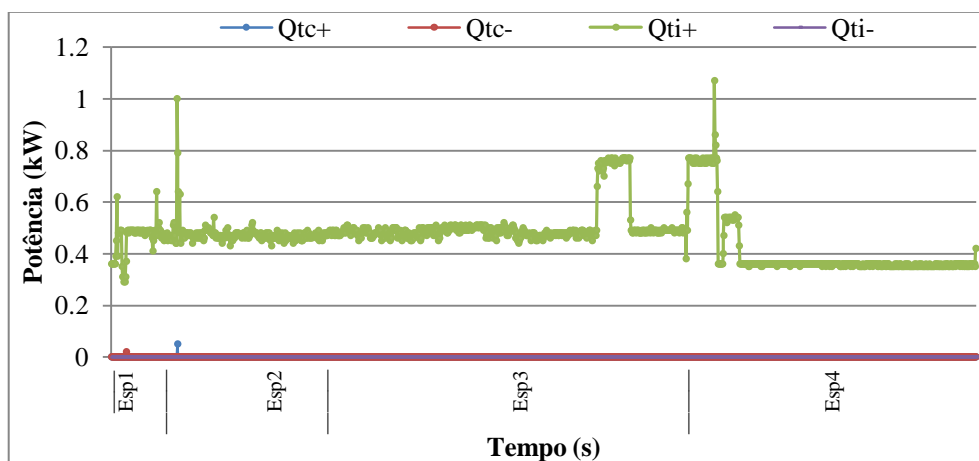


Figura 71: Potência reativa no tempo de esperas

Fonte – Autor

A potência reativa durante as esperas se comportou como apresentado na Figura 71, em que se evidencia o uso da energia reativa no fluxo indutivo de importação ($Qti+$), e está numericamente totalizada em cada um de seus fluxos na Tabela 19. Esse tipo de potência existe por causa da presença de pequenos campos magnéticos nos motores, os quais acionam o ar condicionado e a ventilação do painel elétrico, e em elementos como disjuntores e reles, entre outros, que são responsáveis por manter a máquina em condições de operação.

Tabela 19: Consumo total de potências reativas nas esperas

Tipos de energia reativa		Qt (kVAr)	Et (VArh)
Potência reativa indutiva	$Qti+$	1 240,94	344,71
	$Qti-$	0	0
Potência reativa capacitiva	$Qtc-$	0	0
	$Qtc+$	0,10	0,03

Fonte – Autor

Observa-se também que a energia reativa total foi de 344,71 VARh. Durante as esperas, os elementos de acionamento que usam energia reativa são principalmente: um motor que consome 0,099 kVA no acionamento da climatização do painel elétrico, outro motor que consome 0,572 kVA no ar condicionado e fontes 24 VCC (Voltagem de corrente contínua) que consomem 0,24 kVA, entre outros elementos de menor consumo (Anexo A).

4.2.3.1.3. Análise do fator de potência nas esperas

O fator de potência médio alcançado em cada fluxo de exportação e importação de energia durante as esperas apresenta-se na Tabela 20:

Tabela 20: FP médio nas esperas

Fator de Potência	Esperas
Capacitivo de importação (<i>FPtc+</i>)	1,00
Indutivo de importação (<i>FPti+</i>)	1,00
Capacitivo de exportação (<i>FPtc-</i>)	1,00
Indutivo de importação (<i>FPti-</i>)	1,00

Fonte – Autor

Na Tabela 20 se observa que o valor de FP durante todas as esperas foi de 1 em todos os fluxos de importação e exportação durante 44 min 24 s.

4.2.3.2. Programação

Durante a tarefa de programação, o operador da máquina efetua ações como: referenciar os eixos da máquina, as ferramentas e o zero da peça; alterar parâmetros e inserir os programas do plano de trabalho, entre outras. O referenciamento requer, na maioria das vezes, movimentar as mesas, o eixo-árvore e outros subsistemas, enquanto que inserir programas ou alterar parâmetros ocupam o CNC principalmente. Movimentos no referenciamento envolvem o acionamento de algum motor por momentos muito breves, descontinuados e totalmente aleatórios, razão pela qual considera-se o subsistema CNC o principal consumidor de energia nessa tarefa. A unidade de refrigeração, por sua vez, é ativada periodicamente e de forma independente das programações, podendo influenciar no consumo dessa tarefa.

Notou-se que as programações geralmente são efetuadas após as esperas e antes da máquina efetuar alguma tarefa (carregamento, troca de ferramentas, usinagem, etc.). Os perí-

odos de programação foram identificados no código do CNC pela presença de dois comandos-chave. O início da programação foi indicado pelo comando de leitura de um programa inserido no CNC, e o final da programação foi indicado pelo seguinte comando referente alguma tarefa, como ligar o motor *spindle* ou trocar de ferramenta. O tempo total das programações durante o experimento foi de 4 min 22 s.

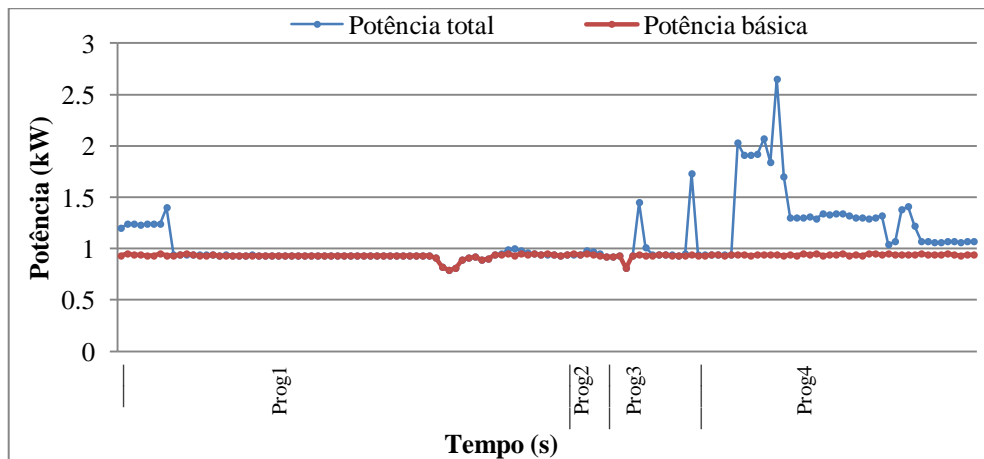


Figura 72: Potência total consumida nas programações

Fonte – Autor

Na Figura 72, em que se observa o comportamento do consumo total da potência durante as programações (linha azul), nota-se que na primeira programação (Prog1) a parada de emergência estava em estado “armed”, retornando pouco tempo depois para o patamar de consumo básico de potência em modo manual. O vale no meio desse patamar ocorreu porque o operador abriu a porta de forma manual. Na programação 2 (Prog2) carregou-se o programa para a usinagem. Na programação 3 (Prog3), a máquina apresentou um primeiro pico por ter entrado no modo manual e um segundo pico quando entrou no modo automático. Na programação 4 (Prog4), inseriram-se programas, e o primeiro pico durante ela foi dado pelo TAF no estado ativo da máquina, em que se executou a correção da ferramenta e o motor *spindle* foi ligado a 1263rpm, sendo logo após detido e fixado no modo manual, provocando a queda do consumo de potência. A curva vermelha, na Figura 72, mostra o consumo básico da máquina.

4.2.3.2.1. Análise da potência ativa nas programações

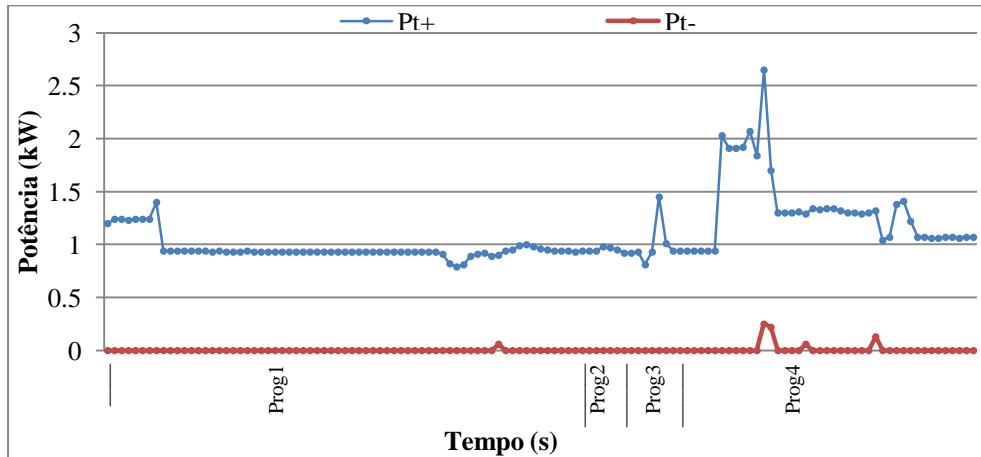


Figura 73: Potência ativa positiva e negativa nas programações

Fonte – Autor

A energia consumida durante as programações mostra-se na Figura 73, em que a soma total é de 79,34 Wh em P_{t+} e aproximadamente zero (0,40 Wh) em P_{t-} . Principalmente energia ativa de importação.

4.2.3.2.2. Análise da potência reativa nas programações

Na Figura 74, tem-se a representação gráfica da potência reativa durante as programações. Nota-se que a potência reativa indutiva de importação (Q_{ti+}) possui o mesmo padrão de comportamento que a potência ativa de importação (P_{t+}) da Figura 73.

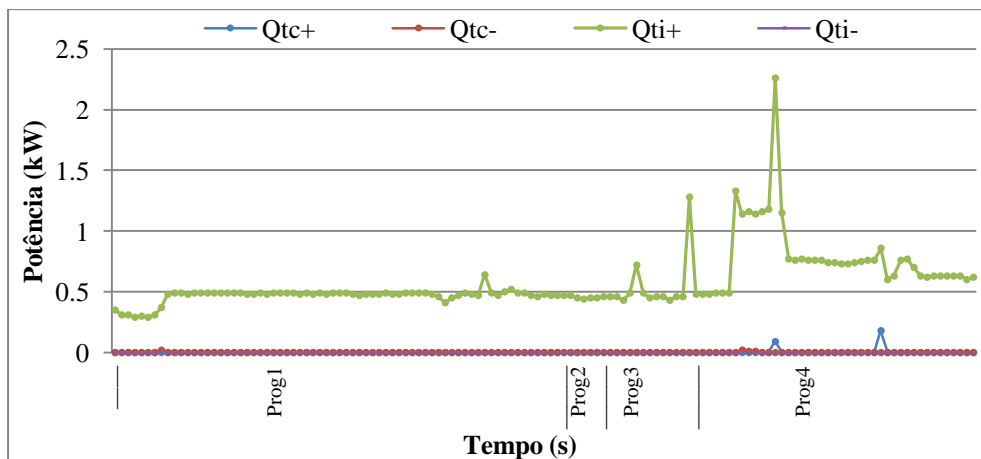


Figura 74: Potência reativa nas programações

Fonte – Autor

A potência reativa total durante as programações em cada um de seus fluxos apresenta-se na tabela a seguir.

Tabela 21: Consumo total de potências reativas nas programações

Tipos de energia reativa		Qt (kVAr)	Et (VArh)
Potência reativa indutiva	Q_{ti+}	151,54	42,09
	Q_{ti-}	0	0
Potência reativa capacitiva	Q_{tc-}	0,12	0,03
	Q_{tc+}	0,54	0,15

Fonte – Autor

Observa-se na Tabela 21 que a potência reativa é quase nula nos seus fluxos capacitivos (Q_{tc+} e Q_{tc-}) e no seu fluxo indutivo de exportação (Q_{ti-}), sendo que apenas consome 42,09 VArh em energia reativa indutiva de importação (Q_{ti+}). A presença de potência reativa nos seus fluxos capacitivos ocorre devido ao acionamento dos motores em alguns instantes durante as programações.

4.2.3.2.3. Análise do fator de potência nas programações

A seguir têm-se os valores médios de FP durante as programações:

Tabela 22: FP médio nas programações

Fator de Potência	Programações
Capacitivo de importação (FP_{tc+})	1,00
Indutivo de importação (FP_{ti+})	1,00
Capacitivo de exportação (FP_{tc-})	1,00
Indutivo de importação (FP_{ti-})	1,00

Fonte – Autor

O valor médio de FP calculado foi de 1 para cada tipo de fator de potência. Isso significa que durante as programações a tensão e a corrente estavam em fase, de modo que toda a potência fornecida é consumida pelos dispositivos.

4.2.3.3. Inspeções

Durante as inspeções, usam-se majoritariamente sensores de medição para corrigir ou conferir o andamento do trabalho. Algumas dessas medições podem ser confundidas com trocas de ferramenta ou esperas, e até mesmo programações, o que pode ser conferido no gráfico apresentado na Figura 75 a seguir, na qual se nota a aleatoriedade das medições e os patama-

res semelhantes às esperas. Na inspeção 2 (Insp2) surge o consumo peculiar da unidade de refrigeração, como aconteceu em outras tarefas e, neste caso da inspeção, a ativação dessa unidade também é independente da tarefa de inspeção.

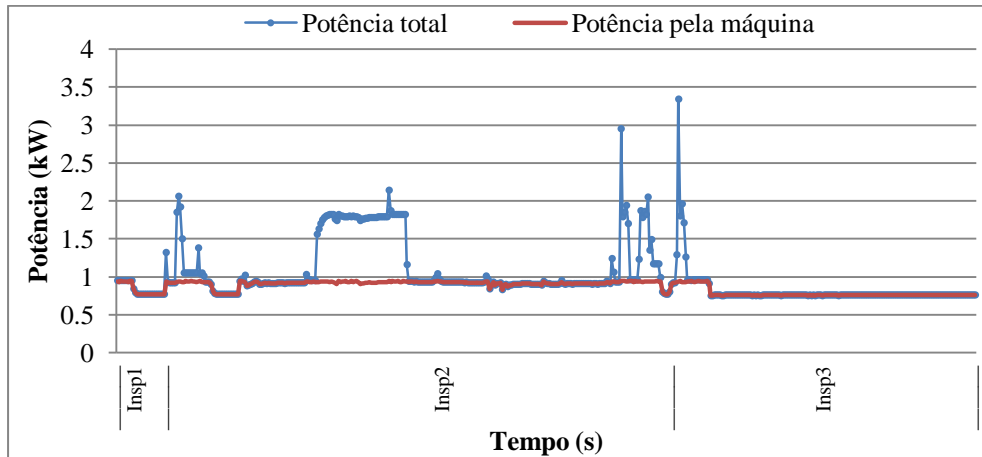


Figura 75: Potência total consumida nas inspeções

Fonte – Autor

O tempo total ocupado pelas três inspeções feitas no experimento foi de 15 min 2 s, sendo que o valor estimado era de 15 min 57 s. Nos itens seguintes mostram-se os detalhes do consumo de energia dessa tarefa.

4.2.3.3.1. Análise da potência ativa nas inspeções

Na Figura 76, representam-se os comportamentos das potências ativas de importação e de exportação durante as inspeções.

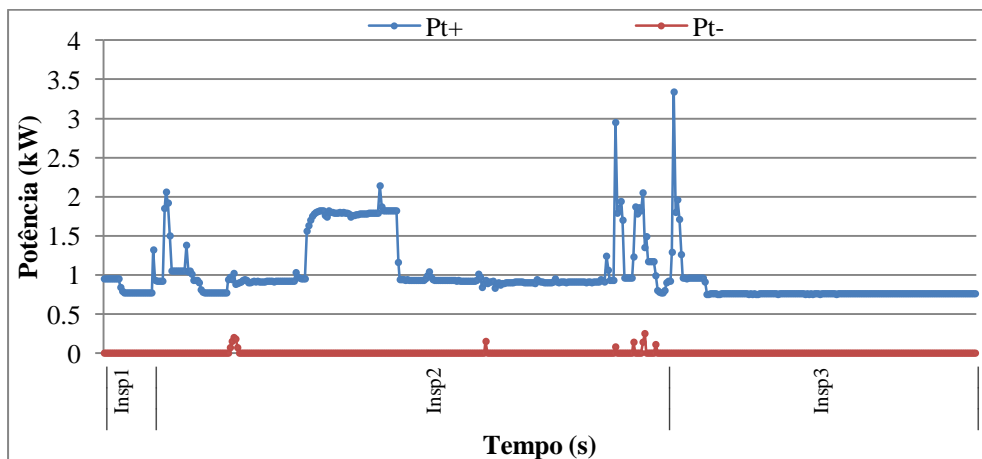


Figura 76: Potência ativa positiva e negativa nas inspeções

Fonte – Autor

Nota-se que a potência ativa de importação P_{t+} acompanha as atividades da máquina durante esta tarefa, alcançando um total de 243,47 Wh (considerando o consumo adicional de energia pela unidade de refrigeração atinge-se 266,77 Wh), enquanto que a potência ativa de exportação é quase nula (0,86 Wh), sendo que acompanha as frenagens dos servomotores.

4.2.3.3.2. Análise da potência reativa nas inspeções

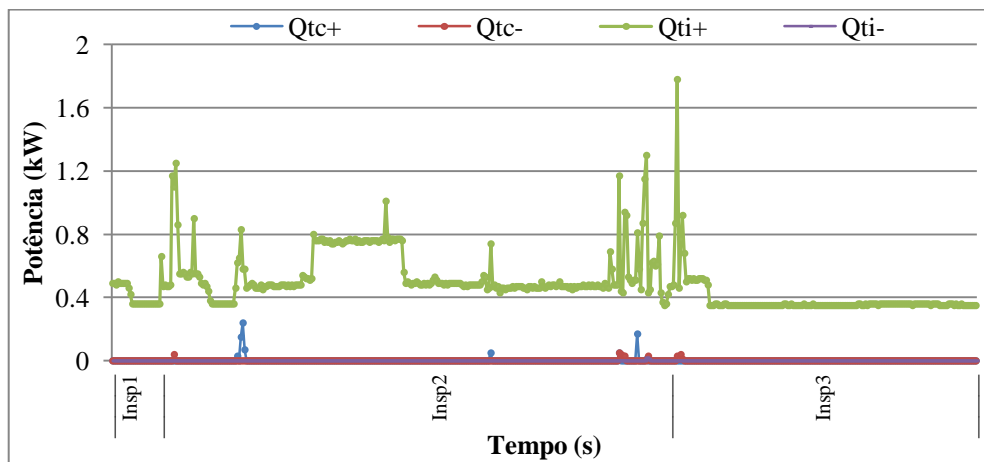


Figura 77: Potência reativa nas inspeções

Fonte – Autor

O comportamento da potência reativa indutiva de importação Q_{ti+} , representado na Figura 77 com uma curva verde, revela que o consumo ocorreu devido a elementos indutivos, como motores, luminárias com lâmpadas fluorescentes, elementos eletrônicos e bombas, entre outros, os quais foram usados durante as inspeções. Tiveram-se como consumo total em cada fluxo de energia reativa, os seguintes resultados:

Tabela 23: Consumo total de potências reativas nas inspeções

Tipos de energia reativa		Qt (kVArh)	Et (VArh)
Potência reativa indutiva	Q_{ti+}	467,08	129,74
	Q_{ti-}	0,06	0,02
Potência reativa capacitiva	Q_{tc-}	0,62	0,17
	Q_{tc+}	1,54	0,43

Fonte – Autor

Na Tabela 23, observa-se que a energia reativa consumida é do tipo indutiva de importação Q_{ti+} e foi de 129,74 VArh, sendo nos seus outros fluxos quase nula (Q_{ti-} , Q_{tc-} e Q_{tc+}). A presença mínima de potência reativa nos seus fluxos capacitivos e indutivo de exportação,

acontece devido ao acionamento dos motores em alguns instantes durante as inspeções. Sabe-se que alguns mecanismos de medição e controle durante as inspeções podem ocupar subsistemas como o TAF, o eixo-árvore, as mesas de trabalho e conseqüentemente a lubrificação, além do CNC, de forma imprevisível. Isso dificulta a definição dos elementos de acionamento que provocaram o consumo de energia reativa, já que cada plano de trabalho demanda inspeções de acordo com a complexidade do desenho da peça, das propriedades do material, do ferramental, dos sistemas de medição disponíveis e da experiência do operador.

4.2.3.3.3. Análise do fator de potência nas inspeções

A seguir têm-se os FP médios atingidos durante o período das inspeções:

Tabela 24: FP médio nas inspeções

Fator de Potência	Inspeções
Capacitivo de importação (FP_{tc+})	1,00
Indutivo de importação (FP_{ti+})	1,00
Capacitivo de exportação (FP_{tc-})	1,00
Indutivo de importação (FP_{ti-})	1,00

Fonte – Autor

O fator de potência atingiu o valor de 1 em média. Esse valor se interpreta da seguinte maneira: a tensão e a corrente estão em fase e a energia fornecida ao SMF é consumida totalmente na forma ativa durante as inspeções.

4.3. Avaliação do modelo proposto

A utilidade do modelo proposto baseia-se na possibilidade de se predefinir o consumo de energia de um plano de trabalho a ser efetuado por uma máquina-ferramenta. Dessa forma, torna-se possível julgar se o consumo de energia monitorado ocorre de acordo com os valores predefinidos mediante o modelo que foi apresentado na equação (34).

$$E = (P_0 + P_1)t_1 + (P_0 + P_2)t_2 + (P_0 + P_3 + kv)t_3 + (P_0 + P_4)t_4$$

Do modelo, os valores da potência (P_0, P_1, P_2, P_3, P_4) são constantes que mudam de valor quando da mudança das condições de operação, e os tempos são valores predeterminados pelo operador de forma estatística ou de acordo com o plano de trabalho e seus parâmetros. Nos itens a seguir se faz uma breve descrição da obtenção dos valores para P e t , das limitações e dos pressupostos que permitiram estimar o consumo de energia mediante o modelo proposto e, também compará-lo com as medições experimentais.

4.3.1. Consumo básico de energia da máquina-ferramenta (E_0)

Comprovam-se experimentalmente dois níveis de consumo de energia elétrica mínimos quando a máquina-ferramenta está em espera ou em etapas de programação:

- O primeiro ocorre quando a máquina está com a parada de emergência acionada ou quando a máquina está com a porta aberta, nível em que o consumo de energia instantâneo P_0 alcança em média $768,56 \text{ W} \pm 3,51 \text{ W}$.
- O segundo nível de consumo ocorre quando a porta da máquina está fechada, em espera e em condições de operar, nível em que a potência P_0 atinge em média $936,54 \text{ W} \pm 9,76 \text{ W}$.
- Um caso característico ocorre durante a tarefa de carregamento de ferramentas, tarefa na qual o operador deve abrir a porta cada vez que precisa colocar uma nova ferramenta e fechá-la quando guardar a ferramenta no magazine. Para esse caso especial, segundo os experimentos, a potência básica P_0 atingiu uma média de $945,00 \text{ W} \pm 7,07 \text{ W}$.

Com os valores médios estimados na base de dados dos experimentos, pode-se definir o valor de E_0 através da equação (29), $E_0 = P_0 t_n$, em que P_0 possui três constantes estimadas experimentalmente e os valores de t_n deverão ser definidos de acordo com o plano de trabalho

avaliado com esta metodologia. A dificuldade relacionada ao parâmetro E_0 surge na definição de t_n , pois o tempo não depende da máquina, mas sim do operador e da sua habilidade, pois segundo o que foi descrito, a P_0 muda seu valor em três casos distintos.

Com o intuito de avaliar a acuracidade do modelo, comparou-se este ao experimento, considerando os tempos experimentais equivalentes aos tempos do modelo. A seguir representa-se de forma gráfica o consumo de energia básico experimental durante as tarefas da máquina-ferramenta em comparação com o consumo básico calculado através do modelo proposto.

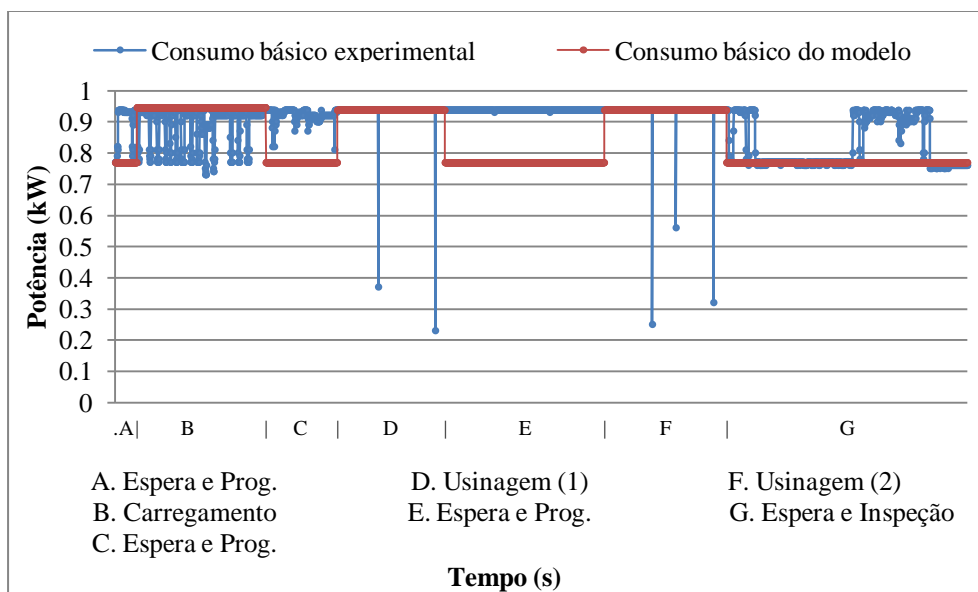


Figura 78: Consumo de E_0 experimental VS do modelo

Fonte – Autor

Na Figura 78, pode-se observar a disparidade dos valores experimentais em relação aos valores do modelo. Ao todo, tem-se um consumo básico total experimental de 1668,61 Wh e através do modelo calcula-se um valor de 1564,77 Wh. A energia básica E_0 proposta no modelo continua a ser 93,78% do valor experimental.

O consumo de energia do preparo da máquina E_1 não foi medido devido às razões explicadas na metodologia para execução dos experimentos, item 3.2.3.

4.3.2. Consumo de energia pelo carregamento de ferramentas (E_2)

Na tarefa de carregamento de ferramentas identificou-se experimentalmente a grande periodicidade do consumo, sendo então possível padronizar o consumo de energia na troca de

uma ferramenta P_2 e o tempo t_2 necessário para tal. A partir da equação (31), $E_2 = (P_0 + P_2)t_2$, com os dados estatísticos da Tabela 25 é possível definir o consumo de energia para essa tarefa.

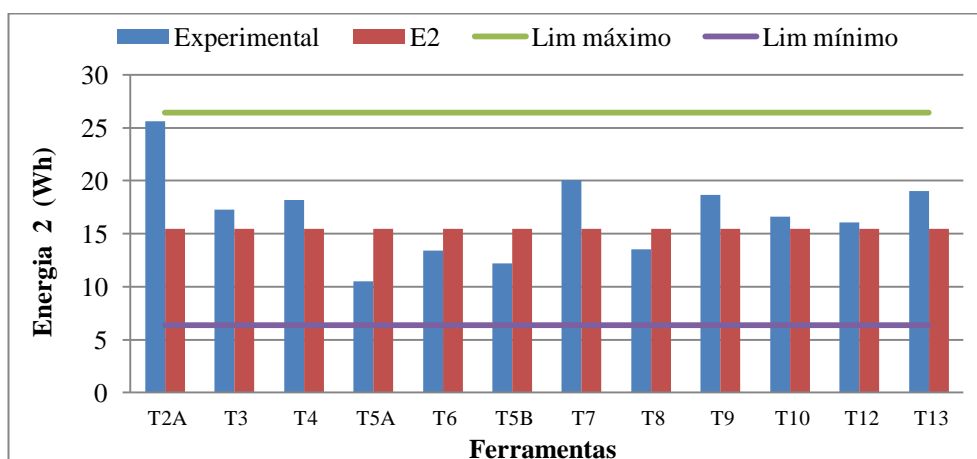
Tabela 25: Análise estatística da P_2

	1. Carregamento de ferramenta	2. Programação	3. Locação de ferramenta	Total
Tempo médio t_2 (s)	21	22	13	56
Desvio padrão do tempo (s)	± 8	± 15	± 6	
Potência média P_2 (W)	813,13	917,85	1422,47	3153,45
Desvio padrão da potência (W)	$\pm 68,42$	$\pm 23,45$	$\pm 394,92$	
E_2 (Wh)	4,66	5,65	5,17	15,47
$E_{2\text{ mínimo}}$ (Wh)	2,66	1,84	1,89	6,39
$E_{2\text{ máximo}}$ (Wh)	6,95	9,65	9,86	26,46

Fonte – Autor

Na Tabela 25, a tarefa de carregamento de ferramentas está dividida em três ações: o carregamento da ferramenta no eixo-árvore, efetuado manualmente pelo operador; a programação dos dados para o reconhecimento da ferramenta no SMF; e a locação da ferramenta no magazine com ajuda do TAF.

Partindo dos dados e da equação apresentada, na Figura 79 apresenta-se o consumo de energia pelo carregamento das distintas ferramentas, em que se comparam os valores experimentais e aqueles fornecidos pelo modelo da equação (31) junto a seus respectivos limites.

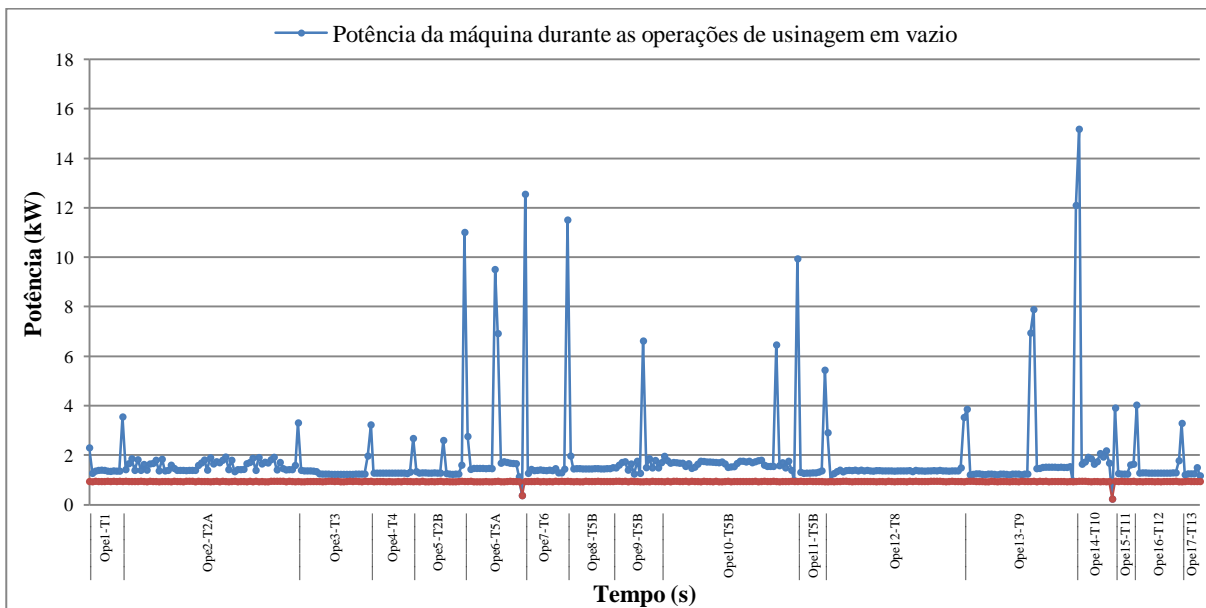
Figura 79: Consumo de E_2 no modelo VS experimental

Fonte – Autor

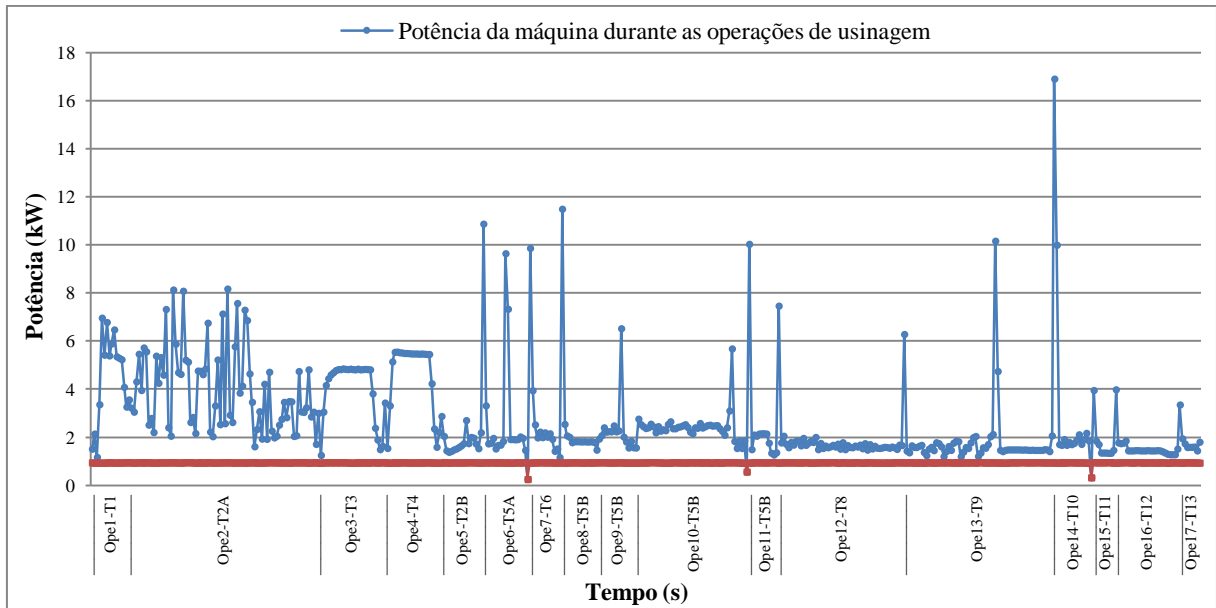
Nota-se que apesar da periodicidade observada na Figura 62 (item 4.2.1.) e dos limites estabelecidos estatisticamente para o consumo de energia pelo carregamento de uma ferramenta E_2 , apresentados na Tabela 25, o consumo de energia experimental para distintas ferramentas apresenta muita variabilidade, conforme apresentado na Figura 79. No carregamento com 13 ferramentas, o consumo total experimental foi de 201,13 Wh e o consumo total calculado através do modelo, contudo, foi de 185,66 Wh, 92,31% do valor experimental.

4.3.3. Consumo de energia pela usinagem (E_3)

Uma vez que o objetivo da usinagem é remover material, as forças presentes nesse processo são as forças de corte. Dada à complexidade de cada operação definidas no plano de trabalho em comparação às outras, o modelo propõe na equação (32), $E_3 = (P_0 + P_3 + k\dot{v})t_3$, três aspectos nos quais se gasta energia durante essa tarefa: o consumo básico da máquina, o consumo pelo suporte estrutural da usinagem, e a usinagem propriamente dita; três demandas de energia simultâneas durante um período de tempo t_3 . Para a análise desses consumos, avaliaram-se experimentalmente dois cenários de usinagem, em vazio (Figura 80-a) e com remoção (Figura 80-b), em um mesmo plano de trabalho, que contém 17 operações distintas. O monitoramento do consumo de energia durante ambos os cenários, apresenta-se na Figura 80.



(a)



(b)

Figura 80: Potência das operações em cada cenário

Fonte – Autor

De acordo com o modelo proposto, avaliam-se os valores experimentais mostrados na Figura 80 e os pressupostos feitos no modelo para validar cada tipo de potência (P_0 , P_3 e $k\dot{v}$):

- Consumo básico da máquina P_0 durante a usinagem: sabe-se que a máquina opera somente com a porta fechada e, com apoio da Figura 80, observa-se que a potência consumida pela máquina durante a usinagem em ambos os cenários, (a) e (b), é geralmente maior do que o consumo básico de energia. Sendo assim, a taxa de potência básica experimental P_0 , representada no gráfico com uma linha vermelha, é equivalente ao consumo básico E_0 calculado no modelo de 936,54W quando a porta está fechada. Entretanto, o desvio padrão de $\pm 9,76W$ do modelo, aumenta para $\pm 44,09W$ com os dados experimentais.
- Consumo de energia para atender ao suporte estrutural da usinagem, P_3 : este consumo corresponde àquela energia necessária para a movimentação rotacional e linear das mesas de trabalho, do eixo-árvore e dos elementos auxiliares. O prognóstico de P_3 depende do tipo da máquina, de sua idade e de suas condições de trabalho. A grande variedade das condições de trabalho deve ser estudada separadamente em trabalhos futuros, pois são muitas as variáveis que podem modificar o consumo de energia durante o funcionamento de uma máquina-ferramenta (condições ambientais, tempo, carga, ferramental, material removido e insumos, entre outros). Por tais razões, a presente pesquisa não estima P_3 . A somatória de P_3 e P_0 representa a potência total consumida somente pelo funcionamento

da máquina-ferramenta durante a usinagem, o que é possível de monitorar com a usinagem em vazio, sendo representada por uma curva azul no gráfico da Figura 80-a.

- Consumo de energia pela usinagem propriamente dita, $k\dot{v}t_3$: representa a energia necessária para a remoção de material, a qual se dá pelo produto do valor específico da potência k , que varia de acordo com o material da peça de trabalho (Anexo B), da taxa de remoção de material \dot{v} , que depende do tipo de operação, e do tempo t_3 em que a operação é efetuada. Esses valores permitem o prognóstico da usinagem. A respeito deste tipo de consumo de energia se levantaram algumas hipóteses que serão analisadas em itens posteriores.

Experimentalmente, na Figura 80-b, a curva azul representa o comportamento da soma dos três focos de consumo de energia durante a usinagem. A energia básica da máquina E_0 , a energia pelo trabalho de usinagem E_3 e a energia pela remoção de material $k\dot{v}t_3$. Valores que devem ser explorada em futuras pesquisas.

4.3.3.1. Análise do consumo mínimo de energia pela máquina-ferramenta durante a usinagem

Com o intuito de minimizar o consumo de energia da máquina-ferramenta, foram desativados os subsistemas auxiliares ao processo, tais como o subsistema de remoção de cavacos, de refrigeração (a unidade de refrigeração e a refrigeração da usinagem) e, conseqüentemente, o subsistema de exaustão. As condições de trabalho, portanto, são as mesmas que as para usinagem a seco.

Observando-se a Figura 82, nota-se que há dois aspectos pelos quais as operações efetuadas nos experimentos possuem muita variabilidade entre uma e outra operação no mesmo cenário: o tempo e o comportamento da potência, os quais dependem diretamente do volume de material removido, do tipo de material, das condições de corte e do ferramental.

Comprova-se experimentalmente a diferença do tempo de duração da usinagem comparado ao tempo de duração da usinagem em vazio. Em vazio foram 14 min 6 s, enquanto que com remoção foram 16 min, demorando 113,5% do tempo em vazio. A fim de visualizar a correlação do comportamento da potência da mesma operação entre um cenário e outro, mudando a escala dos eixos horizontais do gráfico na Figura 81, nota-se que, nas mesmas operações em diferentes cenários, o comportamento da potência já é muito diferente e, então, não existe correlação entre os cenários.

Quando se efetuou a usinagem em vazio, o consumo total de energia da máquina-ferramenta foi de 424,33 Wh, ao passo que quando se efetuou a usinagem a seco o consumo total foi de 725,43 Wh. Em outras palavras, a máquina-ferramenta, por si só, consome no mínimo 58,5% da energia total necessária quando efetua a usinagem a seco, isto é, quando a efetua sem serem ativados os elementos auxiliares (unidade de refrigeração, refrigeração da usinagem, exaustão de gases e remoção de cavacos). O impacto no consumo de energia da máquina pelos elementos auxiliares será avaliado a seguir no texto.

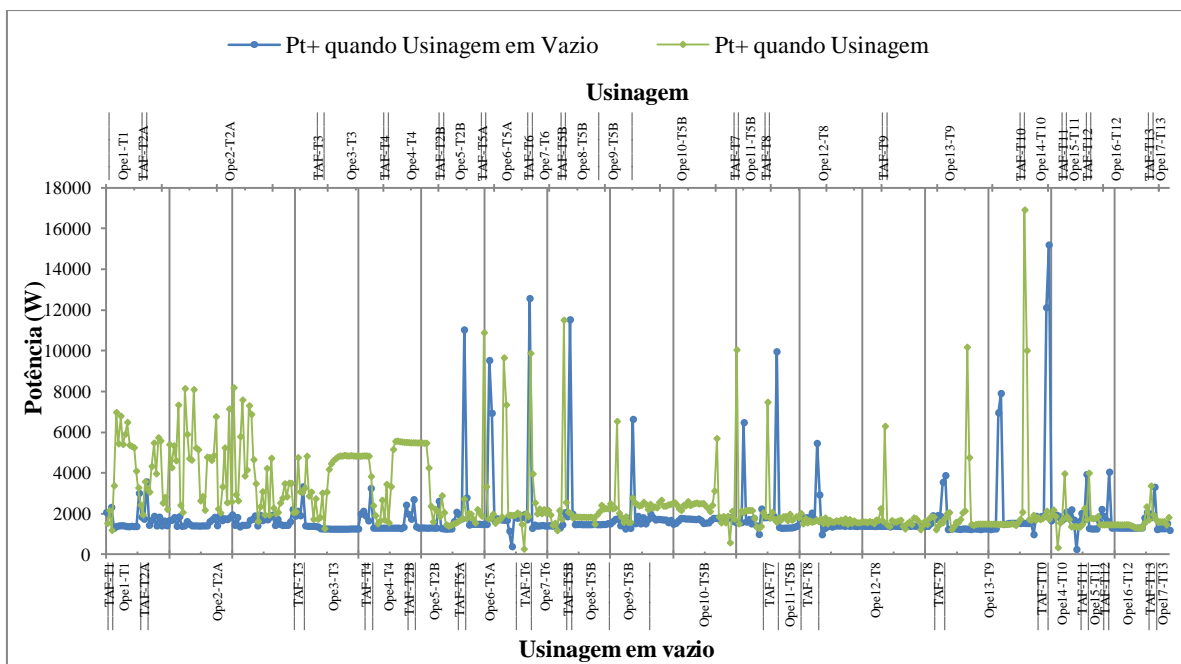
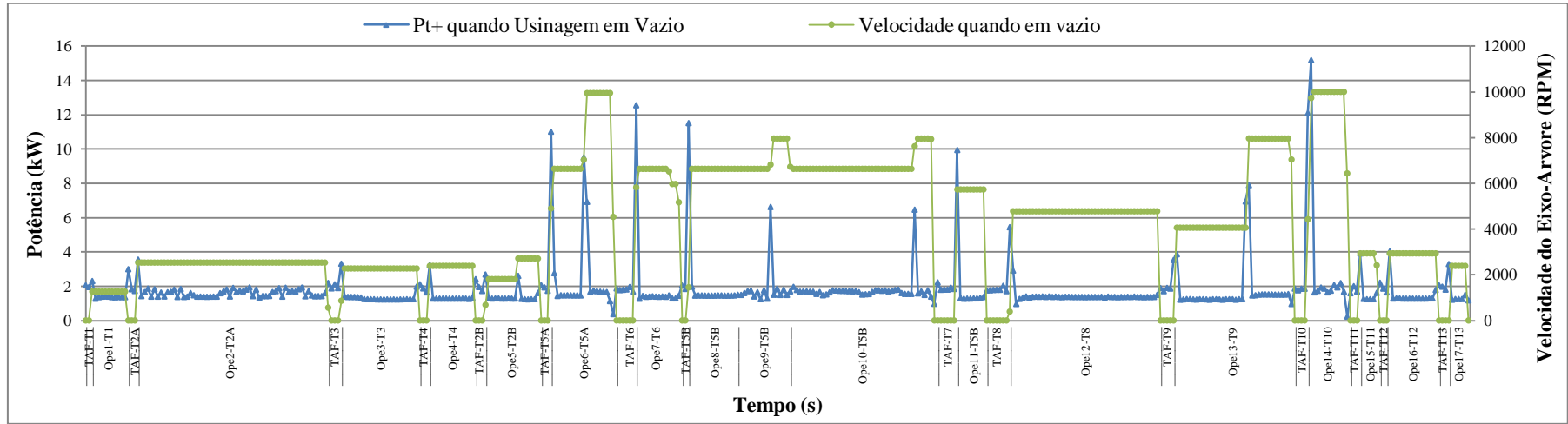


Figura 81: Consumo de energia da máquina-ferramenta durante a usinagem e a usinagem em vazio

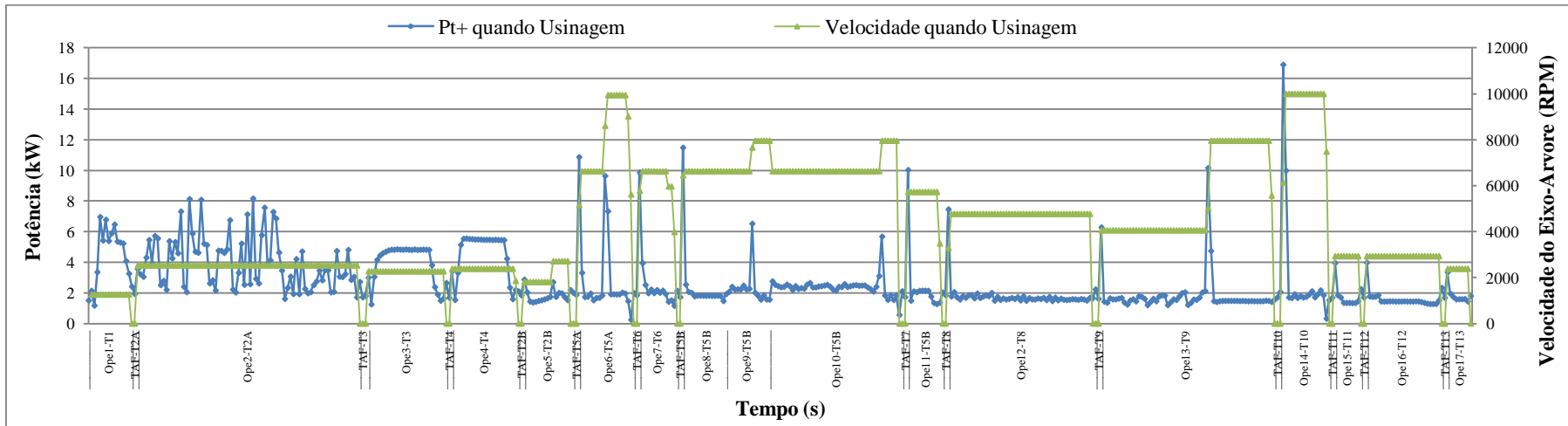
Fonte – Autor

A seguir tem-se uma análise das hipóteses levantadas a respeito de E_3 junto às observações feitas:

- Primeira hipótese: “*Altas velocidades no spindle contribuem diretamente com o consumo de energia total da máquina-ferramenta*”. A respeito desse consumo, comparam-se na Figura 82 vários níveis de velocidades em cada cenário, níveis esses que ainda são notados em uma operação só no mesmo cenário. Observa-se que, no cenário em vazio ou com remoção, as variações de velocidade estão correlacionadas com o comportamento da potência quando o *spindle* muda a velocidade. Quando ele sai da inércia e atinge uma velocidade predeterminada, um pico de consumo de alta potência emerge (corrente de partida alta); em instantes em que este acelera mais um pouco, se forma um pico menor (corrente de partida menor); e quando este freia, forma-se um vale.



(a)



(b)

Figura 82: Potência VS velocidade do *spindle* em cada cenário

Fonte – Autor

Pode ser observado que a aceleração e a variação do torque – observadas na mudança de avanço – afetam o consumo de energia, diferentemente da velocidade, a qual, quando atinge diferentes patamares em uma mesma operação, não se correlaciona com a potência, de forma que a hipótese é rejeitada. No entanto, altas velocidades permitem efetuar a usinagem em um tempo menor, e é nesse ponto que o consumo total de energia elétrica pode ser menor. Em trabalhos futuros devem-se desenvolver pesquisas direcionadas ao efeito do torque no consumo de energia elétrica quando há mudança de torque e a velocidade do motor *spindle* se mantém constante.

- Segunda hipótese: “*O volume removido ou as taxas de remoção de material são proporcionais ao consumo de energia da usinagem*”. No experimento, as diferentes operações removeram distintos volumes de material, como se mostra na Figura 83 e na Tabela 26. Esses volumes são facilmente conhecidos antes de se efetuar a usinagem através do projeto da peça e da rotina de usinagem que o programador efetua quando cria o plano de trabalho para a máquina-ferramenta. Considerando que os volumes removidos na peça de acordo com o plano de trabalho são iguais aos volumes removidos durante o experimento, calculou-se a energia teórica gasta em cada operação, com o volume e com o valor específico da potência para metais durante a usinagem (para aços de 85HB até 200HB de dureza corresponde $0,05 \text{ kW}\cdot\text{min}/\text{cm}^3$). A energia teórica é muito próxima da energia experimental de cada operação. Gráficamente isso é representado na Figura 84, que mostra a energia consumida em função do volume de material removido.

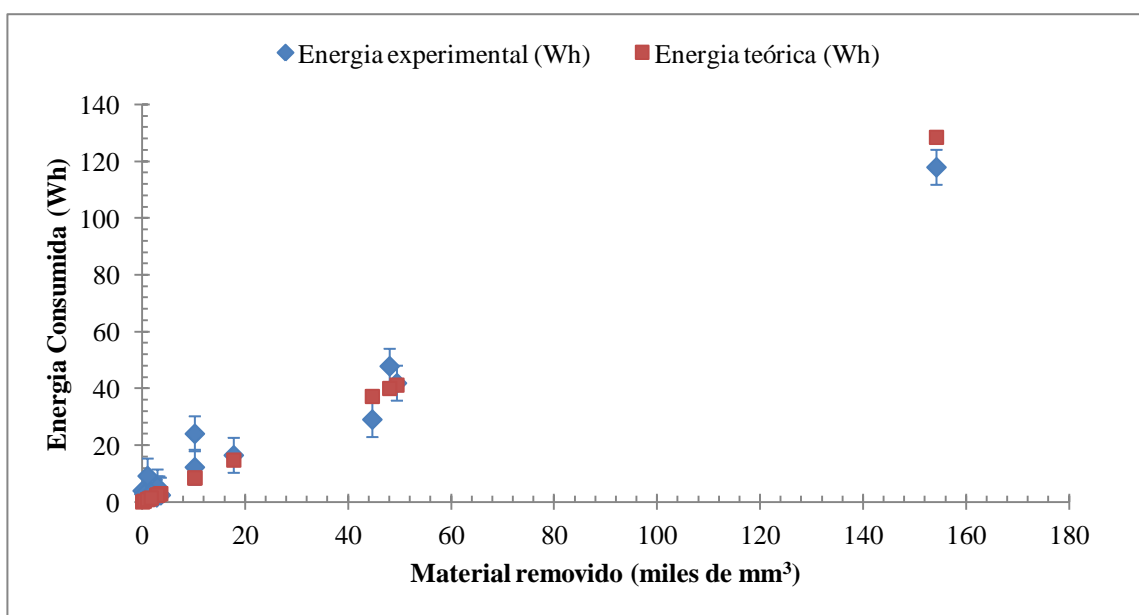


Figura 83: Avaliação de E_3

Fonte – Autor

Visivelmente, na Figura 83 os valores teóricos estão dentro dos valores experimentais medidos. Uma forma de verificar estatisticamente se os valores experimentais e teóricos são equivalentes é através do conceito de “desvio relativo”, o qual mostra a discordância percentual entre o valor experimental e o teórico ($|\text{Valor teórico} - \text{Valor experimental}| / \text{Valor experimental}$). Esses desvios são apresentados na Tabela 26, em que se podem observar valores baixos, médios e altos de desvio relativo em relação ao valor experimental. O desvio absoluto, por sua vez, foi de $\pm 6,16$ Wh e foi representado na Figura 83 com barras de erro verticais.

Tabela 26: Valores experimentais e teóricos correspondentes à usinagem

Operações de usinagem	Volume Removido (mm³)	Energia Experimental (Wh)	Energia Teórica (Wh)	Desvio Relativo (%)
Ope 14	100,19	4,00	0,083	98%
Ope 15	408,33	2,878	0,340	88%
Ope 16	1063,85	9,206	0,887	90%
Ope 5	1413,72	3,483	1,178	66%
Ope 17	1766,21	3,167	1,472	54%
Ope 6	2827,43	1,706	2,356	38%
Ope 8	2957,69	2,928	2,465	16%
Ope 11	2981,36	5,350	2,484	54%
Ope 9	3324,78	2,928	2,771	5%
Ope 7	3614,96	2,456	3,012	23%
Ope 12	10230,74	12,300	8,526	31%
Ope 13	10230,74	24,094	8,526	65%
Ope 10	17793,93	16,506	14,828	10%
Ope 1	44700,00	29,106	37,250	28%
Ope 4	48066,37	47,878	40,055	16%
Ope 3	49480,08	41,922	41,233	2%
Ope 2	154240,34	117,967	128,534	9%

Fonte – Autor

Observa-se então que a hipótese é aceita, porque se confirma que o volume removido é diretamente proporcional ao consumo de energia. Ainda, conhecendo o volume, é possível calcular a energia necessária para efetuar cada operação de usinagem.

- Terceira hipótese: “O consumo de energia por causa da usinagem é muito inferior ao consumo de energia da máquina-ferramenta”.

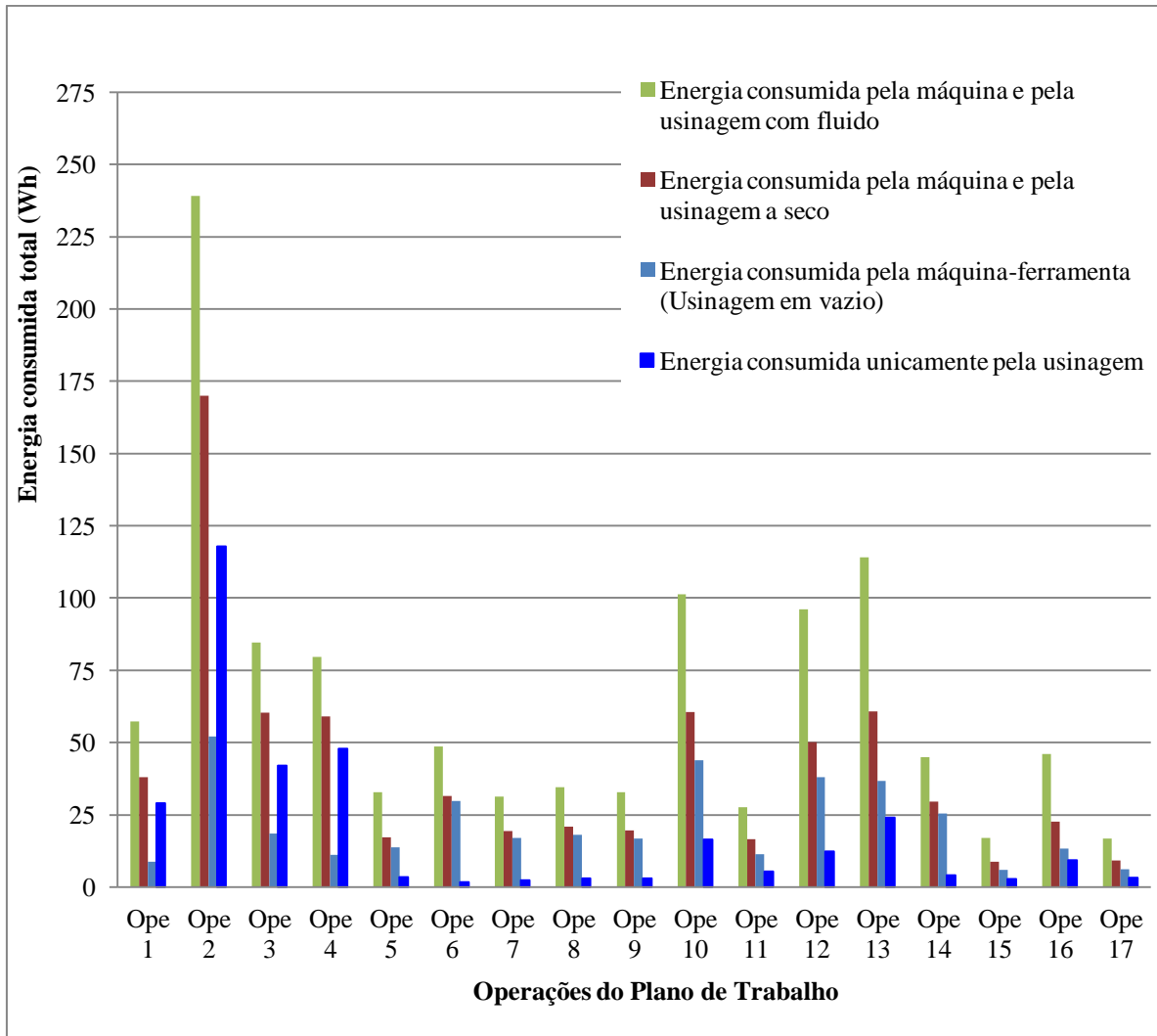


Figura 84: Consumo de energia das operações em cada cenário

Fonte – Autor

Do experimento, na Figura 84 representa-se o consumo de energia para cada operação: durante a usinagem com fluido, a energia total é demandada pela máquina-ferramenta, pelo processo de usinagem e pelos subsistemas que sustentam esse cenário. Já na usinagem a seco a energia total é a gasta pela máquina-ferramenta e pelo processo de usinagem propriamente dito. Na usinagem em vazio, o consumo é dado pela máquina-ferramenta, em que se movimentam as mesas de trabalho e os elementos auxiliares que dão o suporte básico às condições de usinagem.

O consumo por causa da usinagem define-se como a diferença entre o consumo desses dois cenários, em vazio e a seco. Os resultados obtidos foram: o consumo de energia pelas operações com fluido foi de 1 104,67 Wh, com remoção de material a seco foi de 694,09 Wh, e em vazio foi de 366,22 Wh. A diferença entre os cenários a seco e em

vazio foi de 327,87 Wh, a qual representa o consumo de energia gasto apenas pela usinagem. E, a diferença entre o cenário com fluido e a seco foi de 410,58 Wh, que representa o consumo de energia pelos subsistemas auxiliares, entre eles basicamente, o da remoção de cavacos, o da refrigeração e o da exaustão. Logo, no cenário a seco o consumo de energia pela máquina-ferramenta é de 52,76% e no cenário com fluido é de 70,32%. Com tais resultados a terceira hipótese é aceita.

4.3.3.2. Análise do impacto do consumo de energia dos elementos auxiliares na usinagem com fluido

A máquina-ferramenta, quando efetua a usinagem com uma mínima quantidade de elementos auxiliares e de suporte, permite o cenário de usinagem chamado usinagem a seco. Em um cenário oposto, chamado usinagem com fluido, são indispensáveis ativar o funcionamento de outros elementos auxiliares para a refrigeração da usinagem, a exaustão dos gases e o remoção de cavacos. O comportamento do consumo de energia de cada um dos subsistemas correspondentes a esses elementos auxiliares é apresentado graficamente na Figura 85.

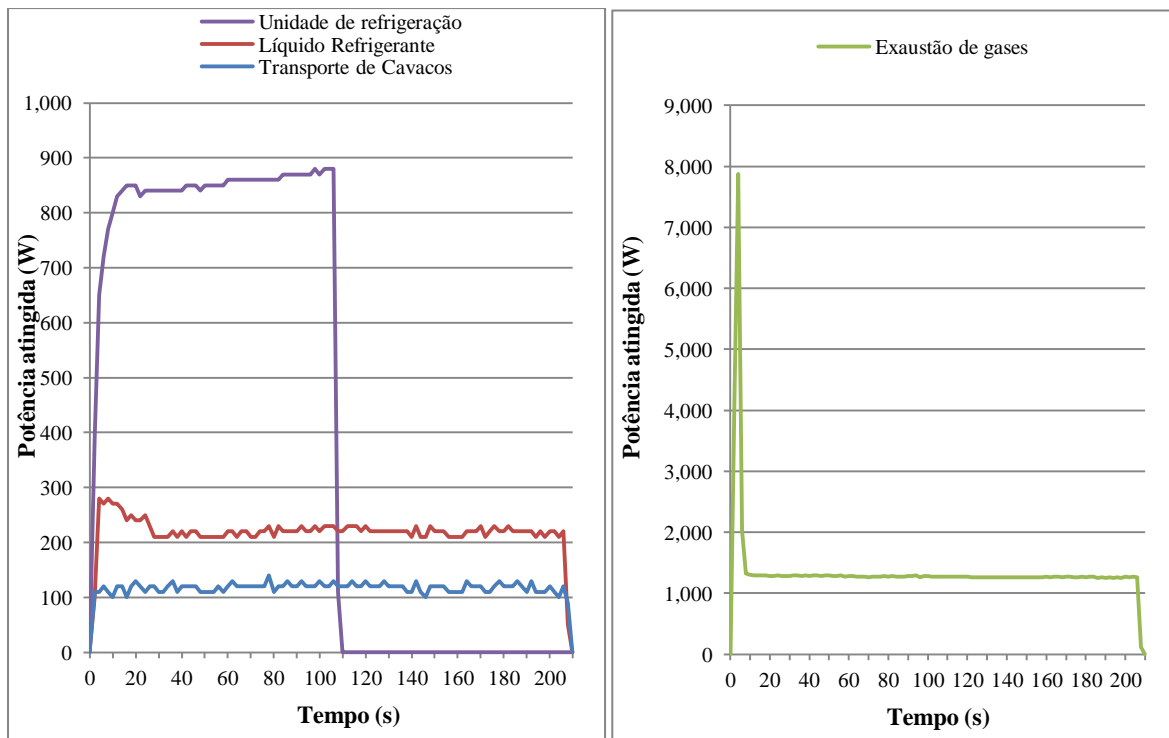


Figura 85: Consumo de energia dos subsistemas auxiliares à usinagem com fluido

Fonte – Autor

Na Figura 85 mediu-se de forma independente o consumo de tais subsistemas. Nota-se que o subsistema da remoção de cavacos é acionado por dois motores, o de refrigeração por um conjunto de bombas, e quanto à unidade e refrigeração e ao de exaustão dos gases, cada um deles é acionado por um motor diferente (Anexo A e Tabela 17).

- A remoção de cavacos atinge uma potência constante de $117,60 \text{ W} \pm 7,53 \text{ W}$. No experimento o processo de usinagem teve duração de 16 minutos, tempo durante o qual o consumo de energia desse subsistema foi de 31,36 Wh.
- A refrigeração da usinagem apresenta um comportamento da potência com maior variação devido às bombas que consomem mais na hora da partida dos motores. Isso se comprova no gráfico da Figura 85, em que as bombas que movimentam o líquido refrigerante inicialmente atingem $271,67 \text{ W}$ e logo depois a potência estabelece-se em um patamar médio de $220,85 \text{ W} \pm 9,52 \text{ W}$. Sabe-se que durante a fase da usinagem, logo após uma ou várias operações, acontece a troca de ferramenta, momento em que a refrigeração é detida, pois acompanha a usinagem, apresentando então maior consumo nos dez primeiros segundos toda vez que inicia-se a refrigeração da usinagem para cada operação. Em consequência, o tempo de operação foi de 15 min 2 s, durante o qual o consumo de energia foi de 58,15 Wh. A unidade de refrigeração faz parte desse subsistema, embora seu comportamento seja totalmente independente das tarefas da máquina-ferramenta. Contudo, o consumo desse microssistema (unidade de refrigeração) foi de 24,72 Wh, sendo que em geral permanece ligado por 1 min 50 s em média.
- O subsistema de exaustão dos gases, diferentemente do subsistema de refrigeração, fica ativada durante toda a usinagem, da mesma forma que o subsistema de remoção de cavacos, e atinge uma potência constante de $1266,67 \text{ W} \pm 54,08 \text{ W}$. No experimento, durante os 16 min de usinagem, esse subsistema consumiu 343,44 Wh de energia, atingindo um pico inicial de 7880 W, de acordo com a Figura 85.

A seguir tem-se a comparação gráfica do consumo de energia de cada operação durante as usinagens a seco e com fluido:

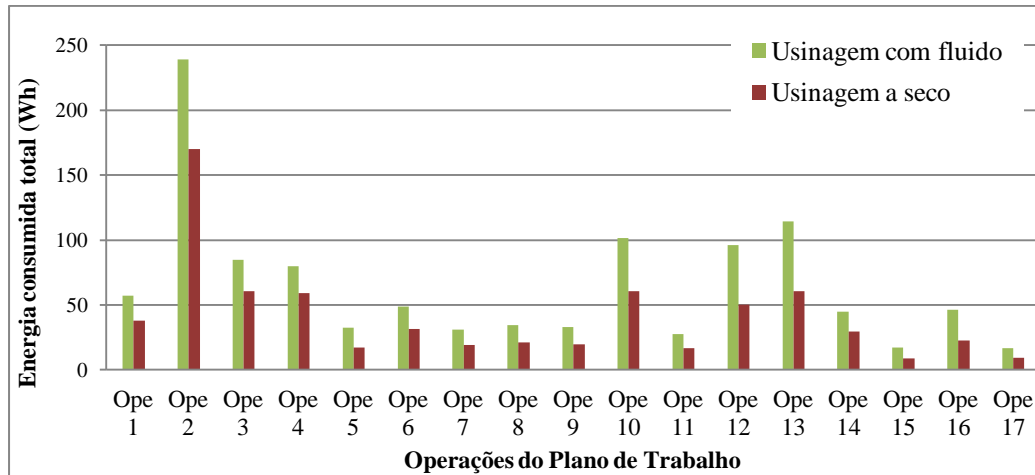


Figura 86: Energia consumida pela máquina-ferramenta e a usinagem

Fonte – Autor

Nota-se na Figura 86 que o acréscimo na energia consumida na usinagem com fluido só comparado com a usinagem a seco é o consumo de energia pelos elementos auxiliares. Os valores totais de consumo de energia para cada operação são apresentados na seguinte tabela:

Tabela 27: Consumo de energia por operação a seco e com fluido

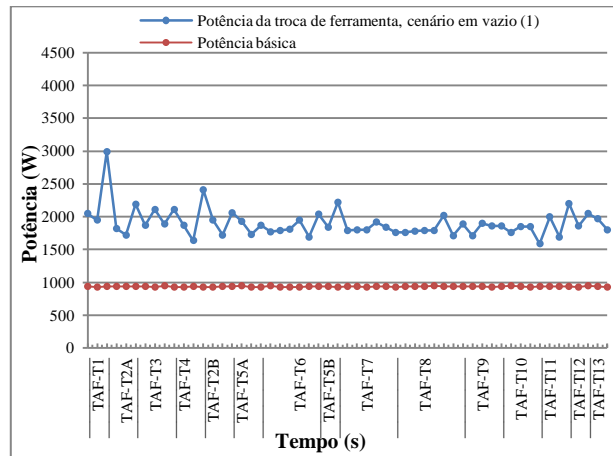
Operações	Usinagem a seco	Usinagem com fluido	CF/AS
Ope 1	37,94	57,27	151%
Ope 2	170,08	239,13	141%
Ope 3	60,39	84,54	140%
Ope 4	58,93	79,61	135%
Ope 5	17,21	32,73	190%
Ope 6	31,45	48,73	155%
Ope 7	19,38	31,19	161%
Ope 8	20,92	34,49	165%
Ope 9	19,66	32,91	167%
Ope 10	60,44	101,34	168%
Ope 11	16,66	27,72	166%
Ope 12	50,26	96,03	191%
Ope 13	60,72	114,13	188%
Ope 14	29,50	45,05	153%
Ope 15	8,71	17,03	196%
Ope 16	22,61	46,09	204%
Ope 17	9,23	16,67	181%
Total	694,09	1 104,67	159%

Fonte – Autor

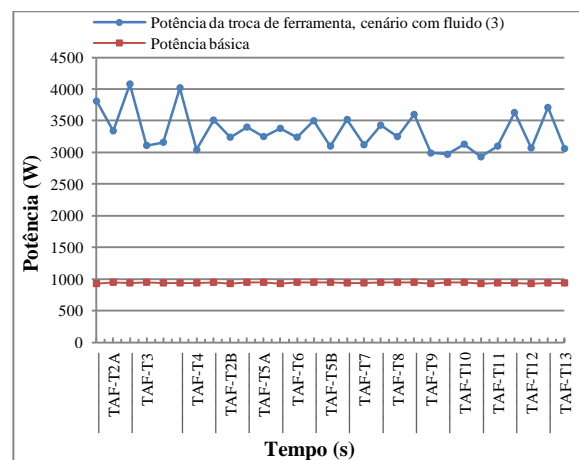
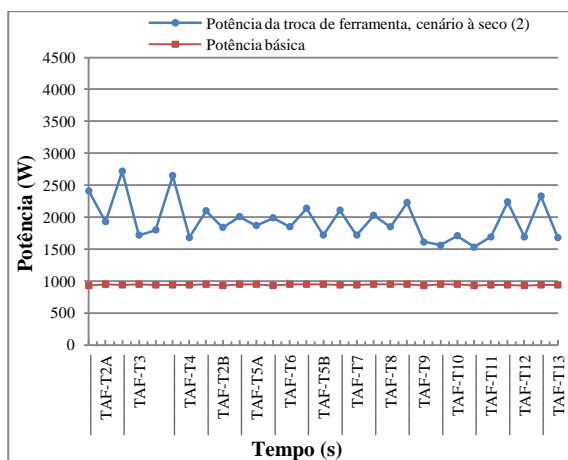
De acordo com a Tabela 27, o consumo total de energia quando a usinagem ocorre a seco é de 694,09Wh e quando as mesmas operações são efetuadas com fluido refrigerante o consumo de energia sobe até 1 104,67Wh, o que significa um acréscimo de 410,58Wh devido aos subsistemas auxiliares, que em termos percentuais é 59% adicionais em relação à usinagem a seco (valor mínimo de consumo de energia da máquina-ferramenta).

4.3.4. Consumo pela troca de ferramentas (E_4)

No experimento foram três os cenários em estudo: usinagem em vazio, usinagem a seco e usinagem com fluido. Em todos os cenários, a troca de ferramentas teve as mesmas condições: mesmo ferramental e mesmo plano de trabalho.



(a) Trocas de ferramenta na usinagem em vazio



(b) Trocas de ferramenta na usinagem

Figura 87: Potência da troca de ferramentas na usinagem em dois cenários

Fonte – Autor

De acordo com as Figuras 87-a e 87-b, o comportamento da potência forma um ou vários picos para cada troca de ferramenta, seja nos cenários em vazio ou com usinagem. Nota-se a remoção de material como a principal diferença entre ambos os cenários e a porta fechada da máquina como a característica comum. Conclui-se que se o consumo básico de energia pela máquina-ferramenta é uniforme, então a variação do consumo de energia total é provocada pelo subsistema de troca de ferramenta.

Embora, a faixa de consumo no cenário com fluido seja maior do que no cenário a seco, devido aos consumos de energia dos subsistemas auxiliares próprios desse cenário, o comportamento da potência no cenário a seco é semelhante ao cenário com fluido (Figura 87-b). Tal semelhança ocorre porque ambos os cenários efetuam a remoção de material.

Se acumulados o tempo e a energia consumida, em cada cenário de troca de ferramenta evidenciam-se as diferenças de consumo, o que se mostra na Figura 88, onde o cenário 1 corresponde à usinagem em vazio, o cenário 2 corresponde à usinagem a seco e o cenário 3 corresponde à usinagem com fluido.

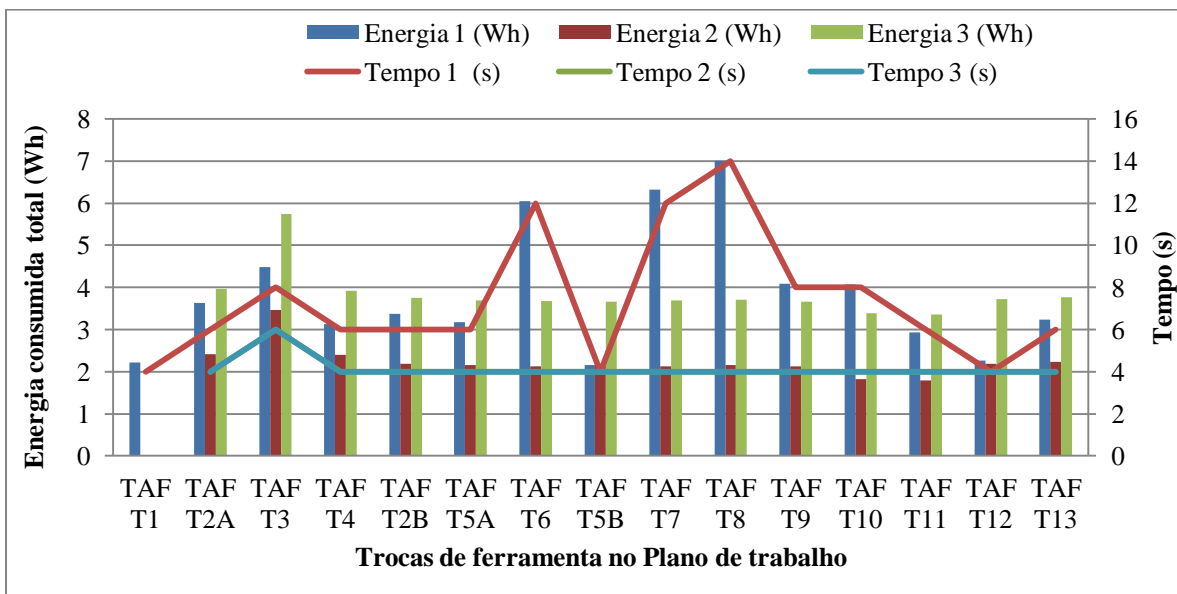


Figura 88: Comparação do consumo de energia durante a troca de ferramentas entre cenários

Fonte – Autor

Nota-se, na Figura 88, que as trocas de ferramenta são mais demoradas no primeiro cenário (Usinagem em vazio) e em consequência consomem mais energia. Já no segundo cenário (Usinagem), as trocas são mais rápidas e consomem menos energia. Observa-se que o tempo é proporcional ao consumo de energia durante a troca de ferramenta em qualquer cenário.

A razão pela qual houve variação nos tempos e, conseqüentemente, no consumo de energia em cada troca de ferramenta entre um cenário e outro, se explica pela inércia. O princípio da inércia está relacionado à resistência que todos os materiais opõem à modificação de seu estado de movimento. Nos cenários dois e três, a força aplicada pelo eixo-árvore à usinagem é maior, e isso é transferido indiretamente ao subsistema de troca de ferramentas no co-

meço dessa tarefa, pelo fato de que o eixo-árvore também é responsável por alocar a ferramenta no plano onde acontece a troca de ferramenta, ação que é feita logo após cada operação de usinagem. Pela inércia, o deslocamento do eixo-árvore do plano de usinagem até o plano de troca de ferramentas é feito com maior rapidez do que no primeiro cenário.

Tabela 28: Tempo, potência e consumo de energia da TAF

Troca Automática de Ferramenta	Cenário de usinagem em vazio			Cenário de usinagem a seco			Cenário de usinagem com fluido		
	Tempo 1 (s)	P+ 1 (W)	Energia 1 (Wh)	Tempo 2 (s)	P+ 2 (W)	Energia 2 (Wh)	Tempo 3 (s)	P+ 3 (W)	Energia 3 (Wh)
TAF T1	4	2 000,00	2,22						
TAF T2A	6	2 176,67	3,63	4	2 170,00	2,41	4	3 575 ,00	3 ,97
TAF T3	8	2 015,00	4,48	6	2 080,00	3,47	6	3 450 ,00	5 ,75
TAF T4	6	1 873,33	3,12	4	2 165,00	2,41	4	3 530 ,00	3 ,92
TAF T2B	6	2 026,67	3,38	4	1 970,00	2,19	4	3 375 ,00	3 ,75
TAF T5A	6	1 906,67	3,18	4	1 940,00	2,16	4	3 325 ,00	3 ,69
TAF T6	12	1 813,33	6,04	4	1 920,00	2,13	4	3 310 ,00	3 ,68
TAF T5B	4	1 940,00	2,16	4	1 930,00	2,14	4	3 300 ,00	3 ,67
TAF T7	12	1 895,00	6,32	4	1 915,00	2,13	4	3 320 ,00	3 ,69
TAF T8	14	1 801,43	7,01	4	1 940,00	2,16	4	3 340 ,00	3 ,71
TAF T9	8	1 840,00	4,09	4	1 920,00	2,13	4	3 295 ,00	3 ,66
TAF T10	8	1 830,00	4,07	4	1 635,00	1,82	4	3 050 ,00	3 ,39
TAF T11	6	1 760,00	2,93	4	1 610 ,00	1,79	4	3 015 ,00	3 ,35
TAF T12	4	2 030,00	2,26	4	1 965,00	2,18	4	3 350 ,00	3 ,72
TAF T13	6	1 940,00	3,23	4	2 005,00	2,23	4	3 385 ,00	3 ,76
Total	110		58,11	58		31,34	58		53,72
Porcentagem relativa	100%		100%	53,93%		52,73%	53,93%		92,45%

Fonte – Autor

Na Tabela 28, apresentam-se para cada troca de ferramenta três valores de cada cenário: o tempo de troca de ferramenta, a potência atingida em um instante e a energia consumida correspondente a cada ferramenta. O consumo total de energia no cenário em vazio foi de 58,11 Wh em 110 segundos. Já no cenário a seco, o consumo de energia foi de 31,34 Wh em 58 segundos, tendo uma diminuição de até 53,93% no consumo de energia e de até 52,73% do tempo, ambos com referência ao cenário em vazio. No cenário com fluido o consumo de energia foi de 53,72 Wh, sendo que o acréscimo em relação ao cenário a seco é causado pela presença dos subsistemas de remoção de cavacos e de exaustão, e em relação ao cenário em vazio houve uma diminuição de até 92,45% no consumo de energia.

O modelo avaliado em seus quatro focos de consumo de energia durante a usinagem, permitiu entender o comportamento do consumo de energia do SMF, as condições de trabalho que ainda precisam ser estudadas e as limitações de pesquisa que podem encaminhar à criação de uma ferramenta com base de inovação em Tecnologias de Informação que aprimorem a quantidade de energia consumida a partir do conhecimento do plano de trabalho a ser efetuado por uma máquina-ferramenta específica.

5. Conclusões

Dos estudos e medições experimentais realizados neste trabalho pode-se concluir o seguinte:

- A formulação do consumo de energia proposto no capítulo 3 é válida desde que sejam conhecidos os tempos de cada atividade. Devido à complexidade de cada tipo de energia é necessário e importante identificar experimentalmente os consumos de energia em cada estado da máquina-ferramenta. Prognósticos são possíveis a partir da validação das constantes e a identificação dos parâmetros dos processos de usinagem, inclusive a taxa de remoção de material.
- Muitas tarefas efetuadas pela máquina-ferramenta dependem da experiência e da rapidez do operador, o que faz com que seja pouco viável planejar a simulação de alguns desses períodos de tempo. O fato da simples mudança de operador pode mudar o padrão de consumo de energia da máquina-ferramenta, dado que o consumo de energia não somente depende da potência, mas também do tempo. Por isso, sugere-se que exista um constante treinamento em práticas comuns de operação da máquina, de modo a não somente se padronizar tarefas semelhantes, mas também se assegurar a qualidade dos procedimentos, visando sustentabilidade na perspectiva do trabalhador e do consumo de recursos como a energia e o tempo.
- O carregamento de ferramentas, efetuado pelo TAF e pelo magazine do centro de usinagem, é uma tarefa que consome energia elétrica para efetuar movimentos mecânicos muito rápidos e em poucos segundos. Visando a sustentabilidade do processo, a máquina deve ter em si mesma elementos que facilitem a frenagem e controlem a precisão.
- O padrão de consumo de energia em máquinas-ferramentas durante a usinagem registra valores de exportação na potência ativa e na potência reativa, características essas presentes em geradores de energia elétrica, sendo registrados, além disso, baixos fatores de po-

tência indutivos de importação. Geralmente os valores de exportação estão presentes unicamente durante as frenagens, razão pela qual se conclui que os dispositivos eletromecânicos responsáveis por elas, no caso, os *drivers*, merecem um estudo aprofundado para determinar se a energia devolvida à rede elétrica é em seu prejuízo ou se é energia regenerada a favor da rede. Ponto crítico da sustentabilidade na perspectiva do consumo de energia.

- Medir o consumo de energia durante o funcionamento de uma máquina-ferramenta pode ser simplificado através da sua medição com carga e sem carga em condições normais, as quais são as condições de funcionamento da máquina considerando a tecnologia, a idade e os insumos. Obter consumos de energia parcialmente fornece as constantes para prognosticar consumos de energia elétrica para futuros processos, dessa forma monitorar a sustentabilidade do processo.
- O modelo $E = (P_0 + P_1)t_1 + (P_0 + P_2)t_2 + (P_0 + P_3 + kv)t_3 + (P_0 + P_4)t_4$ é o começo da compreensão das variáveis que intervêm no consumo de energia em máquinas-ferramentas durante seu uso, porém precisam ser definidas as constantes com maior precisão. Com a estimativa do consumo de energia pelas máquinas-ferramentas durante seu funcionamento é possível definir com maior exatidão a capacidade dos elementos auxiliares ao processo de usinagem. E, conseqüentemente, o projeto da máquina-ferramenta será aperfeiçoado de acordo com o seu uso.
- O consumo de energia da máquina-ferramenta na usinagem em vazio representa o consumo de energia da máquina propriamente dita. No experimento deste trabalho, o cenário de usinagem a seco, ou seja, com remoção de material e sem fluido, é considerado o cenário sob condições de consumo mínimo de energia. Nessas condições o consumo de energia pela máquina-ferramenta atingiu 58,5% do consumo total.
- A velocidade do motor *spindle* é uma variável pré-definida pelo processo de usinagem e pelas condições do ferramental. Essa velocidade deve ser mantida pelo motor *spindle*, apesar das mudanças de torque por causa das mudanças nas condições de usinagem, como na velocidade de avanço e na estrutura do material, entre outros. No entanto, a velocidade não é uma variável que afete o consumo de energia elétrica.

- O volume removido ou as taxas de remoção são proporcionais à energia elétrica consumida unicamente pela usinagem. O consumo de energia pela máquina-ferramenta já é superior (52,76%) ao demandado pelo processo de usinagem (47,24%).
- Os elementos auxiliares ao processo de usinagem (subsistema de remoção de cavacos, de exaustão, de refrigeração) apenas adicionam consumo de energia elétrica sem deteriorar o fator de potência do SMF, isto é, não aumentam o consumo de energia reativa da rede, embora representem 13% do consumo total da máquina. A sustentabilidade do uso de elementos auxiliares deve ser avaliada desde seu impacto na eficiência energética e o consumo de energia do SMF.
- A troca de ferramentas é mais eficiente quando se efetua a usinagem propriamente dita do que quando ocorre em vazio.
- Tempos e valores de consumo esperados devem ser ajustados antes de serem efetuados prognósticos de consumo de energia a partir de planos de trabalho propostos.

Referências

ALLWOOD, J. *Sustainable Manufacturing*. Presentation for Cambridge University Horizon, Institute for Manufacturing, University of Cambridge, Cambridge: Cambridge University, 2004, p. 28.

ALMEIDA G., W., e F. FREITAS. *Circuitos polifásicos*. Brasília: Fundação de empreendimentos Científicos e Tecnológicos, 1995.

ANEEL. *Agência Nacional de Energia Elétrica* . <http://www.aneel.gov.br> (acesso em 27 de Outubro de 2011).

AVRAM, I.O. *Machine Tool Use Phase: Modeling and Analysis with Environmental Considerations*. Thèse, Laboratoire des Outils Informatiques pour la Conception et la Production, École Polytechnique Fédérale De Lausanne, Lausanne: École Polytechnique Fédérale De Lausanne, 2010, p. 328.

AVRAM, O., I. STROUD, e P. XIROUCHAKIS. “A multi-criteria decision method for sustainability assessment of the use phase of machine tool systems.” *Int J Adv Manuf Technol*, 13 de August de 2010: p. 18.

BOLDEA, I. “Electric Energy and Electric Generators.” Cáp. 1 em *Synchronous Generators*, por I. BOLDEA, 13. Boca raton: Taylor & Francis Group, 2006.

Bosch Rexroth AG. *Rexroth Bosch Group*. www.boschrexroth.com (acesso em 26 de Fevereiro de 2011).

Bosch Rexroth AG. “Sustainability with System: Rexroth Solutions for Energy Efficiency.” 2008.

BOYD, S., N. KRISHNAN, e D. DORNFELD. *Life Cycle Inventory of a CMOS Chip*. Berkeley: eScholarship. University of California, 2006.

BRUNTLAND, G. *Our Common Future: The World Commission on Environment and Development*. Oxford University Press, 1987.

CAMPATELLI, G. “Analysis of the environmental impact for a turning operation of AISI 1040 steel.” *Innovative Production Machines and Systems 2009 (IPROMS2009)*, 2009.

CARTER, W.T., J.S. MARTE, S.R. HAYASHI, e S.V. THAMBOO. “Challenges in Net-Shape Manufacturing of Metallic Parts.” *National Workshop on Challenges to Innovation in Advanced Manufacturing*. Niskayuna NY: National Institute of Standars and Technoloy. U.S. Departament of Commerce, 2009. p. 28.

CERVELIN, J.E. *Estudo teórico-experimental das forças de corte no processo de torneamento*. Dissertação, São Carlos: USP/EESC, 2009.

CHILDS, T., K. MAEKAWA, T. OBIKAWA, e Y. YAMANE. *Metal Machining: Theory and Applications*. London: Arnold, a member of the Hodder Headline Group, 2000.

CHRYSSOLOURIS, G. *Manufacturing Systems: Theory and Practice*. 2ª Edição. Patras: Springer, 2005.

COELHO, R, Á. MACHADO, A. ABRÃO, e M. SILVA. *Teoria da Usinagem dos Materiais*. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 2009.

CORRÊA, H., e C. CORRÊA. *Administração de Produção e Operações*. 2ª Edição. São Paulo: Atlas, 2006.

CURRAN, M.A. *Environmental Life-Cycle Assessment*. New York: McGraw-Hill Companies, Inc., 1996.

DAHMUS, J.B. *Applications of Industrial Ecology: Manufacturing, Recycling and Efficiency*. Thesis , Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2007, p. 162.

DAHMUS, J.B., e T.G. GUTOWSKI. “An environmental analysis of machining.” *Proceedings of IMECE 2004*, 2004.

DEGARMO, E.P., J.T. BLACK, e R.A. KOHSER. “Chapter 21: Fundamentals of Chip-Type Machining Processes.” In: *Materials and processes in manufacturing*, por E.P. DEGARMO, J.T. BLACK e R.A. KOHSER, 533-568. Prentice Hall, 1997.

DIAZ, N., et al. “Machine Tool Desing and Operation Strategies for Green Manufacturing.” *4th CIRP International Conference on High Performance Cutting*. Berkeley: eScholarship. University of California, 2010. p. 6.

DIAZ, N., M. HELU, S. JAYANATHAN, Y. CHEN, A. HORVATH, e D. DORNFELD. *Environmental Analysis of Milling Machine Tool Use in Various Manufacturing Environments*. Mechanical Engineering, University of California, Berkeley: eScholarship. University of California, 2010, p. 6.

DINIZ, A.E., F.C. MARCONDES, e N.L. COPPINI. *Tecnologia da Usinagem dos materiais*. 5ª Edição. São Paulo, São Paulo: Artliber Editora Ltda., 2006.

EDMINISTER, J.A., e M. NAHVI. *Circuitos eléctricos*. 3ª Edición. Madrid: McGraw-Hill, 1997.

EIA. “Annual Energy Review 2009.” *Site da U.S. Department of Energy*. U.S. Energy Information Administration. 2009. <http://www.eia.doe.gov/emeu/aer/consump.html> (acesso em 22 de Fevereiro de 2011).

EPE. *Balanço Energético Nacional: Ano base 2011*. Relatório estatístico, Ministério de Minas e Energia, Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2012, 276.

FARIAS, L. M., e M. A. SELLITTO. “Uso da energia ao longo da história: evolução e perspectivas futuras.” *Revista Liberato* v. 12, n. n. 17 (jan./jun. ; 2011): p. 7-16.

FERRARESI, D. *Fundamentos da Usinagem dos Metais*. 9ª Reimpressão. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 1995.

FITZGERALD, A.E., D.E. HIGGINBOTHAM, e A. GRABEL. *Engenharia Elétrica*. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, Ltda., 1981.

GARG, S., e D. DORNFELD. “An Indigenous Application for Estimating Carbon footprint of academia library systems based on life cycle assessment.” *International Conference of Education, Research and Innovation*. Madrid: eScholarship. University of California, 2008. p. 12.

GRANADOS, S., I.S. JAWAHIR, e J. FERNANDEZ. “A Comprehensive Criterion for Sustainability Evaluation of Machining Processes.” *Proceedings of the 7th Global Conference on Sustainable Manufacturing*. Chennai, 2009. p. 385-391.

GUSSOW, M. *Eletricidade básica*. 2ª Edição. Tradução: J.L. NASCIMENTO. Porto Alegre: Bookman, 2009.

GUTOWSKI, T., DAHMUS, J., THIRIEZ, A. “Electrical energy requirements for manufacturing processes.” *13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*. Leuven, Belgium, 2006. pp. 7.

HARRELL, C., e K. TUMAY. *Simulation made easy. A manager's guide*. Institute of Industrial Engineers, Industrial Engineering and Management Press, 1995.

HAYT, W.H., e J.A. BUCK. *Electromagnetismo*. 3ª Edição. Tradução: A. R.SAPIENZA. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2003.

HEILALA, J., et al. *Simulation-Based Sustainable Manufacturing System Design*. IEEE, 2008, p. 1922-1930.

HÉMERY, D., J. C. BEBIER, e J. DELÉAGE. *Uma História da Energia*. 2ª Edição. Tradução: Sérgio de Salvo Brito. Brasília: Universidade de Brasília, 2007.

International Energy Agency. *World Energy Outlook 2010*. Paris: International Energy Agency, 2010.

INTERNATIONAL TRADE ADMINISTRATION. *U.S. Department of Commerce*. 2007. http://trade.gov/competitiveness/sustainablemanufacturing/how_doc_defines_SM.asp (acesso em 10 de Março de 2012).

ISO, International Organization for Standardization. “Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework.” *ISO 14040*. Geneva: ISO, 2006. Cláusula 3.2.

IZARO. *Izaro Manufacturing Technology*. 27 de Setembro de ; 2011. <http://www.izaro.com/contenidos/ver.php?id=es&se=2&su=22&co=1317125435> (acesso em 2011 de Setembro de 28).

JABLONOWSKI, J. “Computer Standard To Streamline Shops.” *Production Machining*, 2007.

JAIN, S., e D. KIBIRA. “A Framework for Multi-Resolution Modeling of Sustainable Manufacturing.” *Winter Simulation Conference*. IEEEExplore, 2010. p. 3423-3434.

JARVIS, A. “*KERS in Machine Tools*,” *MS Report*. Berkeley: UC-Berkeley, 2009.

JAWAHIR, I.S., e O.W. DILLON Jr. *Sustainable Manufacturing Processes: New Challenges for Developing Predictive Models and Optimization Techniques*. Montreal: 1st International Conference on Sustainable Manufacturing, 2007.

JAYAL, A.D., F. BADURDEEN, O.W. DILLON Jr., e I.S. JA. “Sustainable manufacturing: Modeling and optimization challenges at the product, process and system levels.” *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2010.

JOHNSON, D.E., J.L. HILBURN, e J.R. JOHNSON. *Fundamentos de análise de circuitos elétricos*. 4ª Edição. Tradução: Inc. John Wiley & Sons. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2000.

KRONENBERG, J. “Life-cycle assessment (LCA) and eco-design.” Cap. 5 em *Ecological Economics and Industrial Ecology: A Case Study of the Integrated Product Policy of the European Union*, p. 128-161. Routledge, 2007.

LI, C., F. LIU, e Q. WANG. “Planning and Implementing the Green Manufacturing Strategy: Evidences from western China.” *Journal of Science and Technology Policy in China* (Emerald Group Publishing Limited) 1 (2010): p. 148-162.

LINDZUS, E. “HRB – Hydrostatic Regenerative Braking System: The Hydraulic Hybrid Drive from Bosch Rexroth.” *Bosch Rexroth AG*. <http://www.iswa.org/fileadmin/galleries/General%20Assembly%20and%20WC%202010%2011%20Hamburg/Presentations/Lindzus.pdf> (acesso em 26 de Fevereiro de 2011).

LMAS, Laboratory for Manufacturing an Sustainability. *LMAS*. 2007. <http://lma.berkeley.edu/> (acesso em 21 de Março de 2011).

LODHIA, P., e R. DRAKE. *Framework for Energy Data Collection*. Wichita State University, 2008.

LÓPEZ DE L., L.N., e A. LAMIKIZ. *Machine Tools for High Performance Machining*. Bilbao: Springer, 2009.

- LÓPEZ DE L.M., L.N., J.A. SÁNCHEZ G., e A. LAMIKIZ M. *Mecanizado de Alto Rendimiento. Procesos de arranque*. 1ª Edição. Bilbao: Ediciones Técnicas Izaro S.A., 2004.
- LOUETTE, A. *Indicadores de Nações: uma Contribuição ao Diálogo da Sustentabilidade*. São Paulo: Willis Harman House, 2007.
- MAGUEIJO, V., C. FERNANDES, H. MATOS, e C. NUNES. *Medidas de eficiência energética aplicáveis à indústria portuguesa: Un enquadramento tecnológico sucinto*. Plano Nacional de acção para a eficiência energética (PNAEE), ADENE - Agencia para a Energia, 2010.
- MORI, M., Y. FUJISHIMA, Y. INAMASU, e Y. ODA. “A study on energy efficiency improvement for machine tools.” *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2011: 145-148.
- MTConnect Institute,. *The MTConnect Institute*. 2011. <http://www.mtconnect.org/institute/mtconnect-overview/what,-how-why.aspx> (acesso em 12 de Dezembro de 2011).
- Nicolás Correa. *Aplicación del Ecodiseño a una Fresadora de Bancada Fija de Alto Rendimiento*. Caso práctico de excelencia ambiental, Nicolás Correa S.A., Legazpi: Mirandaola Servicios Medioambientales, S.L., 2007, 6.
- OMETTO, A. R. *Avaliação do ciclo de vida do álcool etílico hidratado combustível pelos métodos EDIP, Exergia e Emergia*. Tese de Doutorado, São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2005.
- ORSINI, L. *Curso de circuitos elétricos*. 2ª Edição. Vol. II. São Paulo: Egard Blucher, 2004.
- PÉREZ, R., J. ACA, A. VALVERDE, H. AHUETT, A. MOLINA, e C. RIBA. “A Modularity Framework for Concurrent Design of Reconfigurable Machine Tools.” (Springer-Verlag), n. LUO, Y. (2004): p. 87-95.
- “Using Electric Energy.” In: *Understanding Electric Utilities and De-Regulation*, por L. PHILIPSON e H. LEE W., p.119–149. Taylor & Francis Group, 2006.
- REICH-WEISER, C., A. VIJAYARAGHAVAN, e D. DORNFELD. “Metrics for Sustainable Manufacturing.” Evanston: International Manufacturing Science And Engineering Conference, 2008.
- ROMANIW, Y.A. *An Activity Based Method for Sustainable Manufacturing Modeling and Assessments in Sysml*. Georgia Institute of Technology , 2010.
- Catálogo principal*. Elenco: Sandvik Coromant. 2011.
- SHAW, M.C. *Metal Cutting Principles*. 2ª. OUP, 2005.
- SHIN, Y.C. “Machine Tools and Processes.” Pág. 186 em *The Engineering Handbook*, edição: R.C. DORF. CRC Press LLC, 2004.

- SILVA, R., R. CABRAL, e H. CARVALHO. “Máquinas CNC.” Viseu, 2001.
- SONNEMANN, G., M. SCHUHMACHER, e F. CASTELLS. “Basic Principles in Environmental Management.” 2003: p. 35.
- ULLMAN, D.G. *The Mechanical Design Process*. McGraw-Hill, 1997.
- United Nations. “Agenda 21.” U.N. Conference on Environment and Development (UNCED), Rio de Janeiro, 1992.
- VALLANCE, D.W. “Machine Tools.” Cáp. 32 em *Tribology Data Handbook: An Excellent Friction, Lubrication, and Wear Resource*. CRC Press, LLC, 1997.
- VIJAYARAGHAVAN, A., e D. DORNFELD. “Automated energy monitoring of machine tools.” *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2010.
- WAWERLA, M. *Risikomanagement von Garantieleistungen*. 1ª Edição. Karlsruhe: Shaker, 2008.
- WENZEL, H., M. HAUSCHILD, e L. ALTING. *Environmental Assessment of Products*. Bonton/Dordrecht/London: Kluwer Academic Publisehrs, 1997.
- WITTE, H. *Máquinas Ferramenta (Werkzeugmaschinen)*. Tradução: M. FERREIRA DE BRITO. Wurzburg: Hemus Editora Ltda., 1998.
- YOUSSEF, H.A., e H. EL-HOFY. “Basic Elements and Mechanisms of Machine Tools.” Cáp. 2 em *Machining Technology: Machine Tools and Operations*, por H.A. YOUSSEF e H. EL-HOFY, p. 11-57. Boca Raton: Taylor & Francis Group, LLC, 2008.
- YOUSSEF, H.A., e H. EL-HOFY. “General-Purpose Machine Tool.” Cáp. 3 em *Machining Technology: Machine Tools and Operations*, por H.A. YOUSSEF e H. EL-HOFY. Taylor & Francis Group, LLC, 2008.
- YOUSSEF, H.A., e H. EL-HOFY. “Machining Technology.” Cáp. 1 em *Machining Technology: Machine Tools and Operations*, por H.A. YOUSSEF e H. EL-HOFY, p. 1-10. Taylor & Francis Group, LLC, 2008.
- YUAN, C., e D. DORNFELD. “Embedded Temporal Difference in Life Cycle Assessment: Case Study on VW Golf A4 Car.” *Proceedings of IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology*. Phoenix, 2009.
- ZULAIKA, J., e F.J. CAMPA. “New Concepts for Structural Components.” Cáp. 2 em *Machine Tools for High Performance Machining*, por L.N. LÓPEZ DE L. e A. LAMIKIZ. Bilbao: Springer, 2009.

Apêndice(s)

APÊNDICE A – Base de dados MTConnect

Tabela 29: Comandos e instruções executados pela máquina-ferramenta

Arquivo	Hora	Comando/ descrição da instrução		Tarefa
S1 Speed	13:49:49.0886	UNAVAILABLE		
REGISTRO	14:14:08.0000	Inicio da coleta de dados da potência		
Program	14:16:57.0733	2011		
Modo	14:18:12.0718	MANUAL_DATA_INPUT		
Bloco	14:18:16.0374	O0000T2	N° de programa, ferramenta 2	Carregamento das ferramentas
Bloco	14:18:17.0780	N10M6	Libera troca de ferramenta	
Program	14:18:30.0577	2011	0	
Bloco	14:18:57.0999	O0000T3	N° de programa, ferramenta 3	
Bloco	14:19:13.0609	N10M6	Libera troca de ferramenta	
Program	14:19:29.0359	2011	0	
Bloco	14:20:05.0500	O0000T4	N° de programa, ferramenta 4	
Bloco	14:20:08.0453	N10M6	Libera troca de ferramenta	
Program	14:20:35.0469	2011	0	
Bloco	14:21:04.0860	O0000T5	N° de programa, ferramenta 5	
Bloco	14:21:06.0126	N10M6	Libera troca de ferramenta	
Program	14:21:13.0173	2011	0	
Bloco	14:21:37.0782	O0000T6	N° de programa, ferramenta 6	
Bloco	14:21:40.0032	N10M6	Libera troca de ferramenta	
Program	14:21:57.0611	2011	0	
Msg	14:21:59.0439	ABRIR PORTA DO OPERADOR		
Bloco	14:22:31.0658	O0000T5	N° de programa, ferramenta 5	
Bloco	14:22:33.0064	N10M6	Libera troca de ferramenta	
Program	14:22:42.0221	2011	0	
Bloco	14:23:38.0065	O0000T7	N° de programa, ferramenta 7	
Bloco	14:23:39.0331	N10M6	Libera troca de ferramenta	
Program	14:23:54.0940	2011	0	
Bloco	14:24:34.0597	O0000T8	N° de programa, ferramenta 8	
Bloco	14:24:36.0003	N10M6	Libera troca de ferramenta	
Program	14:24:45.0706	2011	0	
Msg	14:24:47.0675	ABRIR PORTA DO OPERADOR		
Bloco	14:25:31.0410	O0000T9	N° de programa, ferramenta 9	
Bloco	14:25:32.0535	N10M6	Libera troca de ferramenta	
Program	14:25:48.0722	2011	0	
Bloco	14:26:40.0489	O0000T10	N° de programa, ferramenta 10	

Arquivo	Hora	Comando/ descrição da instrução		Tarefa
<i>Continua...</i>				
Bloco	14:26:41.0754	N10M6	Libera troca de ferramenta	
Program	14:26:51.0458	2011	0	
Bloco	14:28:51.0053	O0000T11	Nº de programa, ferramenta 11	
Bloco	14:28:52.0318	N10M6	Libera troca de ferramenta	
Program	14:29:07.0928	2011	0	
Bloco	14:29:45.0334	O0000T12	Nº de programa, ferramenta 12	
Bloco	14:29:55.0881	N10M6	Libera troca de ferramenta	
Program	14:30:07.0132	2011	0	
Bloco	14:31:05.0788	O0000T13	Nº de programa, ferramenta 13	
Bloco	14:31:07.0070	N10M6	Libera troca de ferramenta	
Program	14:31:18.0039	2011	0	
Bloco	14:33:20.0821	O0000T1	Nº de programa, ferramenta 1	
Bloco	14:33:23.0634	N10M6	Libera troca de ferramenta	
Bloco	14:33:34.0181	O0000T2	Nº de programa, ferramenta 2	
Bloco	14:33:35.0587	N10M6	Libera troca de ferramenta	
Program	14:33:50.0072	2011	0	Espera
Msg	14:33:54.0868	Cuidado a máquina está em modo setup, de segurança		
Bloco	14:43:01.0890	O2011 (EVENTO NU-MA)	Programa	
Bloco	14:43:12.0016	T1	Chama ferramenta 1	Troca de ferramenta T1
Bloco	14:43:12.0437	M6	Libera troca de ferramenta	
Y comando	14:43:16.0656	85.4890000000	0	Operação 1
Bloco	14:43:16.0656	G0X43.071Y-40.071S1263M3	Liga eixo sentido horário, 1263 rpm	
Bloco	14:43:17.0078	G43H1D1Z25.000	Correção da ferramenta	
S1Speed	14:43:38.0594	1235.0000000000	Ultima instante da Operação 1	
X load	14:43:38.0594	6.0000000000	0	
Bloco	14:43:38.0594	G53G0Z-110H0G49M5	Rápido, o sistema de coordenadas da máquina detém o <i>spindle</i>	
Bloco	14:43:39.0594	T2	Chama ferramenta 2	Troca de ferramenta T2
Bloco	14:43:40.0016	M6	Libera troca de ferramenta	
Bloco	14:43:44.0235	G0X-24.118Y121.349S2532M3	Liga eixo sentido horário, 2532 rpm	Operação 2
Bloco	14:43:51.0969	G1G64X-22.750Y88.338Z-6.000	Interpolação Linear e Modo de corte	
Bloco	14:44:00.0407	G1G64X129.350Y172.750Z-6.000	Interpolação Linear e Modo de corte	Operação 2
Bloco	14:44:02.0797	G1G64X172.750Y24.892Z-6.000	Interpolação Linear e Modo de corte	
Bloco	14:44:36.0407	G1G64X-22.750Y125.108Z-12.000	Interpolação Linear e Modo de corte	
Bloco	14:44:47.0517	G1G64X172.750Y24.892Z-12.000	Interpolação Linear e Modo de corte	
Bloco	14:44:58.0501	G1G64X-22.750Y51.569Z-12.000	Interpolação Linear e Modo de corte	
Bloco	14:45:36.0892	G2X0.224Y87.551I-43.664J43.664	Ultima tarefa Operação 2	

Arquivo	Hora	Comando/ descrição da instrução		Tarefa
<i>Continuação...</i>				
X atual	14:45:39.0986	5.3660000000	0	
Bloco	14:45:40.0267	G53G0Z-110H0G49M5	Rápido sistema de coordenadas da máq. Para o <i>spindle</i>	
Bloco	14:45:41.0674	M6	Libera troca de ferramenta	Troca de ferramenta T3
Bloco	14:45:49.0689	G0X98.298Y115.546S22 74M3	Liga eixo sentido horário, 2274 rpm	
Bloco	14:46:34.0690	G1X96.863Y103.113Z- 0.500	Ultima tarefa da operação 3, Interpolação linear, define coordenadas	Operação 3
Z load	14:46:35.0252	74.0000000000	0	
Bloco	14:46:35.0674	G53G0Z-110H0G49M5	Rápido sistema de coordenadas da máq. Para o <i>spindle</i>	
Bloco	14:46:37.0080	M6	Libera troca de ferramenta	Troca de ferramenta T4
Bloco	14:46:42.0002	/G5.1Q1	Modo de controle AI de previsão avançada ativo	
Bloco	14:46:42.0705	G43H4D4Z25.000	Correção da ferramenta	Operação 4
Bloco	14:47:10.0284	G0Z25.000	Ultima instrução da operação 4, rápido a Z 25000	
Bloco	14:47:11.0409	G53G0Z-110H0	Rápido sistema de coordenadas da máq.	
Bloco	14:47:11.0831	M6	Libera troca de ferramenta	Troca de ferramenta T2
Z load	14:47:15.0909	72.0000000000	0	
Bloco	14:47:17.0175	G0X106.113Y106.113S1 809M3	Liga eixo sentido horário, 1809 rpm	Operação 5
Y load	14:47:50.0784	8.0000000000	Ultima instrução da operação 5	Operação 5
Bloco	14:47:50.0784	T5	Chama ferramenta 5	Troca de ferramenta T5
Bloco	14:47:51.0206	M6	Libera troca de ferramenta	Troca de ferramenta T5
Z load	14:47:56.0831	75.0000000000	0	Troca de ferramenta T5
Bloco	14:47:57.0112	G0X33.487Y48.887S663 1M3	Liga eixo sentido horário, 6631 rpm	Operação 6
Bloco	14:47:58.0237	G43H5D5Z25.000	Correção da ferramenta	Operação 6
Bloco	14:48:33.0129	G0Z25.000	Ultima instrução da operação 6	Operação 6
Y load	14:48:33.0269	5.0000000000	0	Operação 6
Bloco	14:48:33.0410	G53G0Z-110H0G49M5	Rápido sistema de coordenadas da máq. Para o <i>spindle</i>	Operação 6
Bloco	14:48:36.0644	(PLUNGE MILLING)	0	Programa
Bloco	14:48:37.0066	M6	Libera troca de ferramenta	Troca de ferramenta T6
Z load	14:48:48.0457	75.0000000000	0	Troca de ferramenta T6
Bloco	14:48:48.0457	G0X126.548Y61.494S66 31M3	Liga eixo sentido horário, 6631 rpm	Operação 7
Bloco	14:48:49.0582	G43H6D6Z5.000	Correção da ferramenta	Operação 7
Bloco	14:48:56.0754	G1G64X112.989Y59.108 Z0.105F1061	Interpolação Linear e Modo de corte	Operação 7
Bloco	14:49:02.0801	G1G64X97.521Y43.640Z 0.105F1061	Interpolação Linear e Modo de corte	Operação 7
Bloco	14:49:08.0848	G0X138.316Y67.363S59 68M3	Liga eixo sentido horário, Mudou a velocidade 5968 rpm, do tempo 14:48:48	Operação 7
Bloco	14:49:13.0488	G3X84.228Y27.659I1.37 9J-1.379F234	Ultima instrução da operação 7	Operação 7
X atual	14:49:14.0473	85.5370000000	0	Operação 7

Arquivo	Hora	Comando/ descrição da instrução	Tarefa	
<i>Continuação...</i>				
Bloco	14:49:14.0613	G53G0Z-110H0G49M5	Rápido sistema de coordenadas da máq. Para <i>o spindle</i>	Operação 7
Bloco	14:49:16.0160	T5	Chama ferramenta 5	Troca de ferramenta T5
Bloco	14:49:16.0442	M6	Libera troca de ferramenta	Troca de ferramenta T5
Y comandado	14:49:20.0660	61.9170000000	0	Troca de ferramenta T5
Bloco	14:49:20.0660	G0X130.826Y55.944S66 31M3	Liga eixo sentido horário, 6631 rpm	Operação 8
Bloco	14:49:21.0785	G43H5D5Z25.000	Correção da ferramenta	Operação 8
Bloco	14:49:23.0051	G1G64G94X130.826Y55. 944Z-10.000F3382	Interpolação Linear e Modo de corte, G94 Avanço mm/min	Operação 8
S1Speed	14:49:51.0036	6630.0000000000	Ultima instrução da operação 8	Operação 8
Bloco	14:49:51.0176	Z-14.860	primeira instrução operação 9	Operação 9
Bloco	14:50:21.0723	G3X82.778Y26.210I2.82 8J-2.828F668	Ultima instrução da operação 9	Operação 9
Bloco	14:50:23.0130	G3X62.868Y127.813I- 77.312J117.994F3244	primeira instrução operação 10	Operação 10
Bloco	14:51:47.0787	G3X67.552Y89.331I0.96 0J5.923F836	Ultima instrução Operação 10	Operação 10
Z load	14:51:48.0349	65.0000000000	0	Operação 10
Bloco	14:51:49.0193	G53G0Z-110H0G49M5	Rápido sistema de coordenadas da máq. Para <i>o spindle</i>	Operação 10
Bloco	14:51:52.0146	M6	Libera troca de ferramenta	Troca de ferramenta T7
X atual	14:52:04.0959	93.5120000000	0	Operação 11
Bloco	14:52:05.0522	G43H7D7Z25.000	Correção da ferramenta	Operação 11
Bloco	14:52:06.0647	G1G64G94X96.920Y53.0 80Z0.832F1031	Interpolação Linear e Modo de corte, G94 Avanço mm/min, ...preset pra deixar preci- so, velocidade, avanço, definição geomé- trica da peça	Operação 11
Bloco	14:52:21.0272	G0Z25.000	Ultima instrução Operação 11, desloca- mento rápido a Z 25	Operação 11
Bloco	14:52:21.0553	G53G0Z-110H0G49M5	Rápido sistema de coordenadas da máq. Para <i>o spindle</i>	Operação 11
Bloco	14:52:23.0381	M6	Libera troca de ferramenta	Troca de ferramenta T8
Z load	14:52:36.0600	76.0000000000	0	Troca de ferramenta T8
Bloco	14:52:37.0584	G0X23.831Y118.536S47 75M3	Liga eixo sentido horário, liga eixo a 4775 rpm, desde 14:51:49	Operação 12
Bloco	14:52:38.0288	G43H8D8Z1.0	Correção da ferramenta	Operação 12
Bloco	14:52:41.0803	G1G64G94X36.334Y131. 038Z-14.309F5730	Interpolação Linear e Modo de corte, G94 Avanço mm/min	Operação 12
Bloco	14:52:48.0569	G1G64X36.352Y131.487 Z-15.031	Interpolação Linear e Modo de corte	Operação 12
Bloco	14:53:43.0569	G1G64X35.635Y132.125 Z-21.604	Interpolação Linear e Modo de corte	Operação 12
Bloco	14:53:47.0366	G1G64X35.504Y132.232 Z-22.007	Interpolação Linear e Modo de corte	Operação 12
Bloco	14:54:08.0054	G0Z10.0	Deslocamento rápido a de Z -25 a Z-10, última instrução da operação 12	Operação 12
Z load	14:54:08.0195	76.0000000000	0	Operação 12
Bloco	14:54:08.0195	G53G0Z-110H0G49M5	Rápido sistema de coordenadas da máq. Para <i>o spindle</i>	Operação 12
Bloco	14:54:09.0882	M6	Libera troca de ferramenta	Troca de ferramenta T9

Arquivo	Hora	Comando/ descrição da instrução	Tarefa	
<i>Continuação...</i>				
S1Speed	14:54:10.0445	0.0000000000	0	Troca de ferramenta T9
Bloco	14:54:18.0320	G43H9D9Z1.0	Correção da ferramenta	Operação 13
Bloco	14:55:27.0524	X136.918Y30.759Z-25.000	Ultima instrução operação 13	Operação 13
Bloco	14:55:28.0368	G53G0Z-110H0G49M5	Rápido sistema de coordenadas da máq. Para o <i>spindle</i>	Operação 13
Bloco	14:55:31.0180	M6	Libera troca de ferramenta	Troca de ferramenta T10
X load	14:55:38.0211	0.0000000000	0	Troca de ferramenta T10
Bloco	14:55:38.0633	G0X62.474Y85.404S999M3	Liga eixo sentido horário, liga eixo a 9999 rpm, desde 14:54:08	Operação 14
Bloco	14:55:41.0165	G43H10D10Z10.000	Correção da ferramenta	Operação 14
Bloco	14:55:52.0837	X71.637Y43.887I-27.750J0.0	Ultima instrução operação 14	Operação 14
Bloco	14:55:54.0665	N13(CHAMFERING 1)	Programa	Programa
Bloco	14:55:57.0196	G0X18.383Y121.182S999M3	Liga eixo sentido horário, 9999rpm, muda direção 1	Operação 14
Bloco	14:55:59.0446	G0X115.350Y24.215S999M3	Liga eixo sentido horário, liga eixo a 9999rpm, mudou direção 2 com o mesmo rpm, mudança pode ter acontecido entre 14:55:57	Operação 14
Bloco	14:56:01.0696	G53G0Z-110H0G49M5	Rápido sistema de coordenadas da máq. Para o <i>spindle</i>	Operação 14
Bloco	14:56:05.0212	M6	Libera troca de ferramenta	Troca de ferramenta T11
Bloco	14:56:10.0977	G0X92.608Y23.524S2934M3	Liga eixo sentido horário, 2934 rpm	Operação 15
Bloco	14:56:12.0805	G1G64G94X84.936Y15.852Z-9.660F748	Interpolação Linear e Modo de corte, G94 Avanço mm/min	Operação 15
Bloco	14:56:20.0415	G1X20.264Y89.349Z-9.660	Ultima instrução operação 15	Operação 15
Bloco	14:56:21.0681	G53G0Z-110H0G49M5	Rápido sistema de coordenadas da máq. Para o <i>spindle</i>	Operação 15
Bloco	14:56:22.0946	M6	Libera troca de ferramenta	Troca de ferramenta T12
S1Speed	14:56:23.0227	173.0000000000	Velocidade do <i>O spindle</i> 173	Operação 16
Bloco	14:56:28.0712	G43H12D12Z35.132	Correção da ferramenta	Operação 16
Bloco	14:56:56.0009	X64.657Y44.672Z0.518	Ultima instrução operação 16	Operação 16
Z load	14:56:56.0290	80.0000000000	0	Operação 16
Bloco	14:56:57.0134	G0Z50.868	Posicionamento rápido do Z de 0.518 a 0.868	Operação 16
Bloco	14:56:58.0259	T13	Chama ferramenta 13	Troca de ferramenta T13
Bloco	14:56:58.0681	M6	Libera troca de ferramenta, troca ..., eixo detido desde 14:56:21	Troca de ferramenta T13
Bloco	14:57:06.0134	G43H13D13Z10.000	Correção da ferramenta	Operação 17
S1Speed	14:57:06.0275	2387.0000000000	0	Operação 17
Bloco	14:57:07.0681	G1G64G94X54.181Y136.206Z-10.500F955	Interpolação Linear e Modo de corte, G94 Avanço mm/min	Operação 17
Bloco	14:57:09.0369	G2X147.125Y65.100I41.012J-41.012	0	Operação 17

Arquivo	Hora	Comando/ descrição da instrução	Tarefa	
<i>Continuação...</i>				
Bloco	14:57:15.0978	G53G0Z-110H0G49M5	Rápido sistema de coordenadas da máq. Para <i>o spindle</i>	Operação 17
Bloco	14:57:16.0822	O2011(EVENTO NU- MA)	0	Programa
Bloco	15:16:46.0085	O2011(EVENTO NU- MA)	0	Programa
Bloco	15:16:58.0741	M6	Libera troca de ferramenta, Detido desde 14:57:15	Troca ferra- menta T1
S1Speed	15:16:59.0163	0.0000000000	0	Espera
Bloco	15:17:11.0257	G43H1D1Z25.000	Correção da ferramenta	Espera
S1Speed	15:17:11.0398	1263.0000000000	0	Espera
Bloco	15:17:23.0210	G1G64G94X36.000Y- 33.000Z0.0F2274	Interpolação Linear e Modo de corte, G94 Avanço mm/min, ...preset pra deixar preci- so, velocidade, avanço	Espera
S1Speed	15:17:44.0585	0.0000000000	0	Espera
Bloco	15:18:09.0351	O2011(EVENTO NU- MA)	0	Programa
Bloco	15:18:13.0429	T2	Chama ferra- menta 2	Chama ferra- menta T2
Bloco	15:18:13.0992	G0X43.071Y- 40.071S1263M3	Liga eixo sentido horário, 1263 rpm, desde 15:56:21	Operação 1
S1Speed	15:18:14.0414	1263.0000000000	0	Operação 1
Bloco	15:18:14.0976	G43H1D1Z25.000	Correção da ferramenta	Operação 1
Bloco	15:18:17.0929	G1G64G94X36.000Y- 33.000Z0.0F2274	Interpolação Linear e Modo de corte, G94 Avanço mm/min	Operação 1
S1Speed	15:18:40.0711	1263.0000000000	0	Operação 1
S1Speed	15:18:42.0258	0.0000000000	0	Operação 1
Bloco	15:18:42.0539	M6	Libera troca de ferramenta	Troca de ferramenta T2
S1Speed	15:18:46.0617	0.0000000000	0	Troca de ferramenta T2
Bloco	15:18:47.0461	G43H2D2Z25.000	Correção da ferramenta	Operação 2
S1Speed	15:18:47.0602	2532.0000000000	0	Operação 2
S1Speed	15:19:15.0180	2524.0000000000	0	Operação 2
Bloco	15:20:09.0759	G1G64X20.650Y- 22.750Z-12.000	Interpolação Linear e Modo de corte	Operação 2
Bloco	15:20:12.0149	G1G64X- 22.750Y51.569Z-12.000	Interpolação Linear e Modo de corte	Operação 2
S1Speed	15:21:18.0275	2532.0000000000	0	Operação 2
Bloco	15:21:20.0103	G53G0Z-110H0G49M5	Rápido sistema de coordenadas da máq. Para <i>o spindle</i>	Operação 2
S1Speed	15:21:20.0807	0.0000000000	0	Operação 2
Bloco	15:21:21.0369	M6	Libera troca de ferramenta	Troca de ferramenta T3
S1Speed	15:21:25.0447	0.0000000000	0	Operação 3
Bloco	15:21:26.0150	G43H3D3Z25.000	Correção da ferramenta	Operação 3
S1Speed	15:21:26.0432	2274.0000000000	0	Operação 3
S1Speed	15:22:18.0744	2274.0000000000	0	Operação 3
S1Speed	15:22:20.0573	0.0000000000	0	Operação 3
Bloco	15:22:20.0854	M6	Libera troca de ferramenta	Troca de ferramenta T4
S1Speed	15:22:21.0276	0.0000000000	0	Troca de ferramenta T4

Arquivo	Hora	Comando/ descrição da instrução	Tarefa	
<i>Continuação...</i>				
Bloco	15:22:25.0213	G0X32.881Y39.759S238 7M3	Liga eixo sentido horário, 2387 rpm, detido desde 15:21:20	Operação 4
Bloco	15:22:25.0635	G43H4D4Z25.000	Correção da ferramenta	Operação 4
S1Speed	15:22:25.0916	2387.0000000000	0	Operação 4
S1Speed	15:23:04.0448	2387.0000000000	0	Operação 4
Bloco	15:23:09.0229	G53G0Z-110H0G49M5	Rápido sistema de coordenadas da máq. Para o <i>spindle</i>	Operação 4
Bloco	15:23:10.0354	M6	Libera troca de ferramenta	Troca de ferramenta T2
S1Speed	15:23:10.0917	0.0000000000	0	Troca de ferramenta T2
Bloco	15:23:14.0854	G0X106.113Y106.113S1 809M3	Liga eixo sentido horário, 1809 rpm	Operação 5
S1Speed	15:23:15.0276	1809.0000000000	0	Operação 5
Bloco	15:23:16.0261	G1G64G94X106.113Y10 6.113Z-18.000F1357	Interpolação Linear e Modo de corte,G94 Avanço mm/min	Operação 5
Bloco	15:23:34.0542	G0Z25.000D1S2713M3G 17	Liga eixo sentido horário e seleciona o plano XY, 2713 rpm, mudou velocidade e direção desde 15:23:14	Operação 5
S1Speed	15:23:34.0683	2086.0000000000	0	Operação 5
S1Speed	15:23:35.0105	2713.0000000000	0	Operação 5
S1Speed	15:23:40.0589	2713.0000000000	0	Operação 5
Bloco	15:23:47.0198	G53G0Z-110H0G49M5	Rápido sistema de coordenadas da máq. Para o <i>spindle</i>	Operação 5
Bloco	15:23:48.0323	M6	Libera troca de ferramenta	Troca de ferramenta T5
S1Speed	15:23:48.0886	0.0000000000	0	Operação 6
S1Speed	15:23:52.0402	0.0000000000	0	Operação 6
Bloco	15:23:52.0683	G0X33.487Y48.887S663 1M3	Liga eixo sentido horário, 6631 rpm	Operação 6
S1Speed	15:23:53.0667	5158.0000000000	0	Operação 6
S1Speed	15:23:54.0792	6633.0000000000	0	Operação 6
S1Speed	15:24:13.0089	9948.0000000000	0	Operação 6
S1Speed	15:24:26.0605	9947.0000000000	0	Operação 6
Bloco	15:24:27.0168	G53G0Z-110H0G49M5	Rápido sistema de coordenadas da máq. Para o <i>spindle</i>	Operação 6
S1Speed	15:24:30.0121	0.0000000000	0	Operação 6
Bloco	15:24:30.0402	M6	Libera troca de ferramenta	Troca de ferramenta T6
S1Speed	15:24:34.0480	0.0000000000	0	Troca de ferramenta T6
S1Speed	15:24:35.0886	5782.0000000000	0	Operação 7
Bloco	15:24:35.0886	G43H6D6Z5.000	Correção da ferramenta	Operação 7
S1Speed	15:24:37.0152	6629.0000000000	0	Operação 7
Bloco	15:24:38.0277	G1G64X122.305Y65.737 Z0.045F1061	Interpolação Linear e Modo de corte	Operação 7
Bloco	15:24:48.0121	G1G64X95.312Y41.430Z 0.105F1061	Interpolação Linear e Modo de corte	Operação 7
S1Speed	15:24:53.0043	6633.0000000000	0	Operação 7
Bloco	15:24:58.0387	G53G0Z-110H0G49M5	Rápido sistema de coordenadas da máq. Para o <i>spindle</i>	Operação 7
Bloco	15:25:00.0074	M6	Libera troca de ferramenta	Troca de ferramenta T5

Arquivo	Hora	Comando/ descrição da instrução		Tarefa
<i>Continuação...</i>				
S1Speed	15:25:00.0637	0.0000000000	0	Troca de ferramenta T5
Bloco	15:25:04.0434	G0X130.826Y55.944S6631M3	Liga eixo sentido horário, 6631 rpm desde 15:24:27	Operação 8
Bloco	15:25:05.0418	G43H5D5Z25.000	Correção da ferramenta	Operação 8
S1Speed	15:25:05.0981	6453.0000000000	0	Operação 8
S1Speed	15:25:52.0122	6631.0000000000	0	Operação 8
S1Speed	15:25:55.0075	7957.0000000000	0	Operação 8
Bloco	15:25:57.0465	G1G64X133.867Y68.813Z-10.000	Interpolação Linear e Modo de corte	Operação 9
S1Speed	15:26:04.0497	7958.0000000000	0	Operação 9
S1Speed	15:26:06.0044	6629.0000000000	0	Operação 9
Bloco	15:26:52.0888	G1G64X49.283Y85.638Z-9.628	Interpolação Linear e Modo de corte	Operação 9
Bloco	15:26:57.0810	G1G64X18.767Y87.035Z-14.628	Interpolação Linear e Modo de corte	Operação 9
Bloco	15:27:16.0247	G1G64X41.578Y86.907Z-14.628	Interpolação Linear e Modo de corte	Operação 10
S1Speed	15:27:21.0310	6638.0000000000	0	Operação 10
S1Speed	15:27:22.0576	7976.0000000000	0	Operação 10
S1Speed	15:27:33.0404	7958.0000000000	0	Operação 10
Bloco	15:27:33.0545	G53G0Z-110H0G49M5	Rápido sistema de coordenadas da máq. Para o <i>spindle</i>	Operação 10
S1Speed	15:27:35.0795	0.0000000000	0	Troca de ferramenta T7
Bloco	15:27:36.0076	M6	Libera troca de ferramenta	Troca de ferramenta T7
S1Speed	15:27:36.0357	0.0000000000	0	Operação 11
Bloco	15:27:40.0170	G0X93.512Y56.488S5730M3	Liga eixo sentido horário, 5730 rpm	Operação 11
Bloco	15:27:41.0154	G43H7D7Z25.000	Correção da ferramenta	Operação 11
S1Speed	15:27:41.0435	5730.0000000000	0	Operação 11
S1Speed	15:28:01.0404	5730.0000000000	0	Operação 11
Bloco	15:28:02.0811	G53G0Z-110H0G49M5	Rápido sistema de coordenadas da máq. Para o <i>spindle</i>	Operação 11
Bloco	15:28:04.0373	M6	Libera troca de ferramenta	Troca de ferramenta T8
S1Speed	15:28:04.0936	0.0000000000	0	Troca de ferramenta T8
Bloco	15:28:08.0170	T9	Chama ferramenta 9	
Bloco	15:28:08.0873	G0X23.831Y118.536S4775M3	Liga eixo sentido horário, 4775 rpm	Operação 12
S1Speed	15:28:10.0561	4775.0000000000	0	Operação 12
Bloco	15:28:39.0811	G1G64X35.872Y131.920Z-18.178	Interpolação Linear e Modo de corte	Operação 12
Bloco	15:29:28.0608	G1G64X35.858Y131.932Z-22.306	Interpolação Linear e Modo de corte	Operação 12
S1Speed	15:29:48.0155	4774.0000000000	0	Operação 12
Bloco	15:29:49.0702	M6	Libera troca de ferramenta	Troca de ferramenta T9
S1Speed	15:29:50.0265	0.0000000000	0	Troca de ferramenta T9
Bloco	15:29:54.0202	G0X118.266Y32.871S4058M3	Liga eixo sentido horário, 4058 rpm	Operação 13
Bloco	15:29:54.0765	G43H9D9Z1.0	Correção da ferramenta	Operação 13

Arquivo	Hora	Comando/ descrição da instrução		Tarefa
<i>Continuação...</i>				
S1Speed	15:29:55.0046	4058.0000000000	0	Operação 13
S1Speed	15:31:06.0641	4058.0000000000	0	Operação 13
S1Speed	15:31:11.0141	7958.0000000000	0	Operação 13
S1Speed	15:31:49.0547	7958.0000000000	0	Operação 13
Bloco	15:31:52.0641	G53G0Z-110H0G49M5	Rápido sistema de coordenadas da máq. Para o <i>spindle</i>	Operação 13
S1Speed	15:31:54.0891	0.0000000000	0	Troca de ferramenta T10
Bloco	15:31:55.0032	M6	Libera troca de ferramenta	Troca de ferramenta T10
Bloco	15:31:59.0532	G0X62.474Y85.404S999 9M3	Liga eixo sentido horário, 9999 rpm	Operação 14
S1Speed	15:32:04.0454	9998.0000000000	0	Operação 14
Bloco	15:32:14.0016	G3G64G94X71.284Y43.8 87I-0.061J5.000F3565	Interpolação Circular, G94 Avanço mm/min	Operação 14
S1Speed	15:32:24.0001	9998.0000000000	0	Operação 14
Bloco	15:32:24.0704	G3G64G94X11.314Y121. 009I-3.448J-3.621F3565	Interpolação Circular, G94 Avanço mm/min	Operação 14
Bloco	15:32:26.0954	G0X115.350Y24.215S99 99M3	Liga eixo sentido horário, 9999rpm, mu- dou de direção 4 desde 15:31:59	Operação 14
Bloco	15:32:29.0767	G53G0Z-110H0G49M5	Rápido sistema de coordenadas da máq. Para o <i>spindle</i>	Operação 14
Bloco	15:32:33.0001	M6	Libera troca de ferramenta	Troca de ferramenta T11
S1Speed	15:32:33.0423	0.0000000000	0	Troca de ferramenta T11
Bloco	15:32:37.0642	G43H11D11Z10.000	Correção da ferramenta	Operação 15
S1Speed	15:32:37.0782	2934.0000000000	0	Operação 15
Bloco	15:32:38.0626	G1G64G94X84.936Y15.8 52Z-9.660F748	Interpolação Linear e Modo de corte, G94 Avanço mm/min	Operação 15
Bloco	15:32:53.0548	G53G0Z-110H0G49M5	Rápido sistema de coordenadas da máq. Para o <i>spindle</i>	Operação 15
S1Speed	15:32:54.0814	0.0000000000	0	Operação 15
Bloco	15:32:59.0595	G43H12D12Z35.132	Correção da ferramenta	Operação 15
S1Speed	15:32:59.0876	2934.0000000000	0	Operação 15
S1Speed	15:33:22.0517	2934.0000000000	0	Operação 15
Bloco	15:33:49.0799	G53G0Z-110H0G49M5	Rápido sistema de coordenadas da máq. Para o <i>spindle</i>	Operação 15
S1Speed	15:33:50.0502	0.0000000000	0	Troca e fer- ramenta T12
Bloco	15:33:50.0783	M6	Libera troca de ferramenta	Troca e fer- ramenta T12
Bloco	15:33:55.0424	G43H13D13Z10.000	Correção da ferramenta	Operação 16
S1Speed	15:33:55.0705	2387.0000000000	0	Operação 16
Bloco	15:34:10.0049	G53G0Z-110H0G49M5	Rápido sistema de coordenadas da máq. Para o <i>spindle</i>	Operação 16
S1Speed	15:34:10.0611	0.0000000000	0	
Bloco	15:50:56.0498	O0000T2	N° de programa	
Bloco	15:50:58.0326	N10M6	Libera troca de ferramenta	
Bloco	15:59:11.0628	N10M6	Libera troca de ferramenta	

Arquivo	Hora	Comando/ descrição da instrução		Tarefa
<i>Conclusão</i>				
S1Speed	15:59:21.0894	0.0000000000	0	Troca de ferramenta T13
Bloco	15:59:33.0285	M6	Libera troca de ferramenta	Troca de ferramenta T13
S1Speed	15:59:42.0566	1263.0000000000	0	Operação 17
Bloco	15:59:42.0707	G43H1D1Z25.000	Correção da ferramenta	Operação 17
Bloco	15:59:47.0066	G1G64G94X36.000Y-33.000Z0.0F2274	Interpolação Linear e Modo de corte, G94 Avanço mm/min	Operação 17
Bloco	15:59:56.0066	O2011(EVENTO NU-MA)	0	Programa
S1Speed	15:59:56.0629	0.0000000000	0	
Bloco	16:00:12.0520	O0000T0	Nº de programa, preset?	Inspeção com Preset
Bloco	16:00:15.0051	N10M6	Libera troca de ferramenta	Liberação do preset
Bloco	16:05:48.0273	UNAVAILABLE	Máquina desligada	Máquina desligada
S1Speed	16:05:48.0273	UNAVAILABLE	Máquina desligada	Máquina desligada

Fonte - Autor

APÊNDICE B – Análise da composição química da peça

Laboratório de Engenharia de Materiais
Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo
Assistência técnica: Gustavo

A espectrometria de emissão óptica é uma técnica analítica considerada universal e usada para determinar a composição química de ligas, em qualquer fase do processo de produção que exista a necessidade de análise instantânea do material. Graças à precisão do método e ao curto tempo de análise, representa um sistema de controle da produção válido em todos os campos da indústria: siderúrgica, fundição, metal-mecânica e montadoras, entre outros.^a

Em termos físicos, o espectrômetro mede a intensidade das longitudes de onda ou as únicas cores produzidas por cada elemento no plasma, isto é, a análise de amostras no estado líquido. Na análise praticada o equipamento de medição utilizado foi o um espectrômetro por emissão óptica ou atômica com plasma induzido em argônio da marca ANACOM, Modelo ARL 34000. Esse equipamento usa a fonte de centelha para criar o plasma.

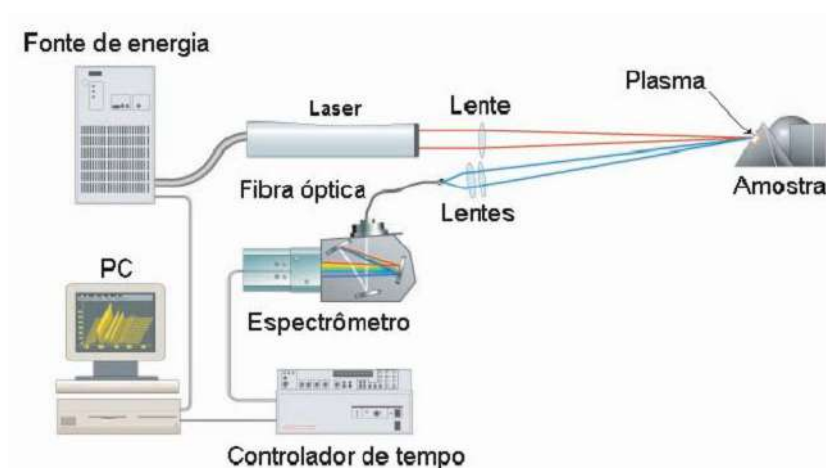


Figura 89: Esquema de um espectrômetro LIBS
Fonte – Adaptada de www.appliedphotonics.co.uk

^a <http://www.gnrbrasil.net/sistemas.htm>

O procedimento começa com a preparação da peça. A superfície dessa peça onde a centelha irá atingir deve estar limpa e lisa. A amostra é colocada na câmara de combustão (ambiente de argônio) assim como apresentado na Figura 89. A formação de plasma inicia-se quando se proporciona uma descarga elétrica na região de entrada do argônio do plasma. A excitação da amostra ocorre por eletrodos quando se usa a centelha como fonte. A passagem de eletricidade do eletrodo pela amostra fornece a energia necessária para atomizar a amostra e excitar os átomos resultantes para um estado eletrônico mais alto.^b As análises são feitas com base na tensão em cada fotomultiplicadora (componente óptico responsável pela leitura do espectro de luz em cada elemento). O controle do nível de tensão em cada fotomultiplicadora é determinado manualmente através da regulagem dos atenuadores de tensão (componente eletrônico).

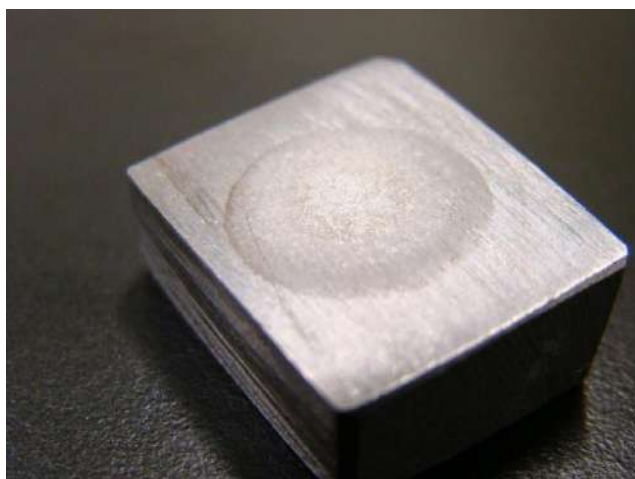


Figura 90: Zona do plasma na amostra

Na Figura 90 observa-se uma zona circular em que a centelha atingiu por alguns segundos para a formação do plasma e onde se fez a leitura dos elementos da composição química do aço. Se fizeram 4 leituras, onde a zona era lixada sucessivamente até o surgimento de uma superfície adequada para uma nova aplicação da centelha. Considera-se como resultado a média das leituras feitas.

^b SKOOG, D. A. Principles of Instrumental Analysis. 3ª Edição. Estados Unidos da América. Editora Saunders College Publishing. 1985. 548 p.

Tabela 30: Conformidades segundo a norma ABNT/SAE/AISI 1045

Parâmetro	Norma/Limite	Resultados	Método de ensaio
Composição química (% em peso)			Espectrômetro de emissão ótica
C	0,43/0,50	0,469 – Conforme	
Mn	0,60/0,90	0,789 – Conforme	
Si	0,15/0,30	0,253 – Conforme	
P(Max)	0,030	0,018 – Conforme	
S(Max)	0,035	0,009 – Conforme	
Cu(Max)	0,20	0,009 – Conforme	
Al		0,014	
Nb		0,003	
Cr(Max)	0,15	0,028 – Conforme	
V		0,003	
Ni(Max)	0,15	0,020 – Conforme	
Mo		0,001	
Ti		0,005	
B		0	
Sn(Max)	0,060	0,007 – Conforme	
As		0,003	
Nível de intensidade de tensão (mV)			
Fe		8 236,750	

Fonte – Autor

Conclusão: A amostra não apresenta inconformidades quanto aos teores de alguns elementos e quanto aos microconstituintes permitidos segundo a norma ABNT/SAE/AISI 1045.

Tabela 31: Influência dos elementos de liga no aço

Teores residuais	Influência dos elementos de liga
C	
Mn	Aumenta a dureza e a resistência mecânica do aço, com menor prejuízo para a soldabilidade e para a ductilidade do aço. O maior teor de Mn no aço carbono é de 1,6%. Ainda o Mn combate o efeito nocivo do enxofre e aumenta a tenacidade do aço, promovendo uma diminuição da transição dúctil frágil.
Si	É usado como desoxidante do aço. Favorece sensivelmente a resistência mecânica (limite de escoamento e de resistência) e a resistência à corrosão, reduzindo, porém a soldabilidade.
P(Max)	Aumenta o limite de resistência, favorece a resistência à corrosão e a dureza, prejudicando, contudo, a ductilidade e a soldabilidade. Quando ultrapassa certos teores, o fósforo torna o aço quebradiço.
S(Max)	É extremamente prejudicial aos aços. Desfavorece a ductilidade, em especial o dobramento transversal, e reduz a soldabilidade. Nos aços comuns, o teor de enxofre é limitado a valores abaixo de 0,05%.
Cu	Aumenta de forma sensível a resistência à corrosão atmosférica dos aços, em adições de até 0,35%. Aumenta também a resistência à fadiga, mas reduzem, de forma discreta, a ductilidade, a tenacidade e soldabilidade.
Al	Assim como o silício, funcionam como desoxidantes, que se combinam com o oxigênio, removendo as bolhas de gás que se formam na solidificação do metal em fusão. Os aços totalmente desoxidados são chamados aços acalmados. Um aço semi acalmado tem uma quantidade insuficiente de Al ou Si para a desoxidação.
Nb	É um elemento muito interessante, quando se deseja elevada resistência mecânica e boa soldabilidade; teores baixíssimos deste elemento permitem aumentar o limite de resistência e, de forma notória, o limite de escoamento. É um componente, quase obrigatório nos aços de alta resistência e de baixa liga; além de não prejudicar a soldabilidade, permite a diminuição dos teores de carbono e de manganês, melhorando, portanto, a soldabilidade e a tenacidade. Entretanto, o seu efeito sobre a ductilidade é desfavorável.
Cr	Aumenta a resistência mecânica à abrasão e à corrosão atmosférica. Reduz, porém, a soldabilidade. O cromo melhora o desempenho do aço a temperaturas elevadas.
V	
Ni	O níquel aumenta a resistência mecânica, a tenacidade e resistência à corrosão. Reduz a soldabilidade.
Mo	Eleva a dureza a quente, a resistência a quente e a fluência. Melhora a resistência à corrosão dos aços inoxidáveis. Forma partículas resistentes à abrasão.
Ti	Aumenta o limite de resistência, a resistência à abrasão e melhora o desempenho do aço a temperaturas elevadas. É utilizado também quando se pretende evitar o envelhecimento precoce.

APÊNDICE C – Análise da estrutura metalográfica da peça

Laboratório de Engenharia de Materiais
Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo
Assistência técnica: Eliezer Dias Francisco

O controle de qualidade estrutural de um produto metalúrgico preocupa-se com o material que forma a peça, sua composição e sua estrutura, entre outros. Esse controle pode ser físico, químico e metalográfico. O ensaio metalográfico procura relacionar a estrutura íntima do material com as suas propriedades físicas, pode ser macrográfico e micrográfico e aplica-se a todos os materiais metálicos ferrosos. O procedimento do ensaio metalográfico aplicado no corpo de prova foi o seguinte:

(a) Amostra

- Peça de aço que compunha a peça de trabalho usada no experimento de dimensões:
22mm x 20mm x 7mm.
- As dimensões da superfície a se analisar eram suficientemente grandes, de forma que não foi necessário o embutimento.



Figura 91: Corpo de prova não embutido

Fonte – Autor

(b) Lixamento

Operação que tem por objetivo eliminar riscos e marcas mais profundas da superfície, dando um acabamento a esta superfície, preparando-a para o polimento. Dois processos de lixamento foram aplicados: manual (seco) e automático. A técnica de lixamento manual consiste em se lixar a amostra sucessivamente com lixas de granulometria cada vez menor, mudando-se de direção (90°) em cada lixa subsequente até desaparecerem os traços da lixa anterior. A sequência de lixas para o trabalho metalográfico com a amostra foi o recomendado: 80, 120, 220, 320, 400, 600 e 1200.

Lixa: Folha com material abrasivo destinado a dar abrasão à peça. As lixas utilizadas tiveram como grão abrasivo o óxido de alumínio. A numeração da lixa descreve o tipo de granulação. Quanto maior a numeração, mais fina a granulação.



Figure 92: Lixamento semiautomático

(c) Secar a peça

Com o intuito de eliminar os possíveis riscos da lixa nº 1200, se utilizou óxido de cromo e imediatamente limpou-se com álcool a 98%.

(d) Ataque químico

Operação que permite a identificação (visualização) dos contornos de grão e as diferentes fases na microestrutura através de um reagente que causará a corrosão da superfície. O reagente ácido é colocado em contato com a superfície da peça por certo tempo. Na análise aplicou-se Nital a 2%, cuja composição é 2ml de HNO_3 em 98ml de álcool etílico a 95%; e

sua aplicação é recomendada em ataques microscópicos de ação profunda para tornar visível constituintes especiais da estrutura em aços e ferros (carbonetos, eutético fosforoso) não ligados e de baixa liga assim como também em casos isolados como reativo para microscopia de alta liga. O ataque durou 30 segundos.

(e) Microscopia

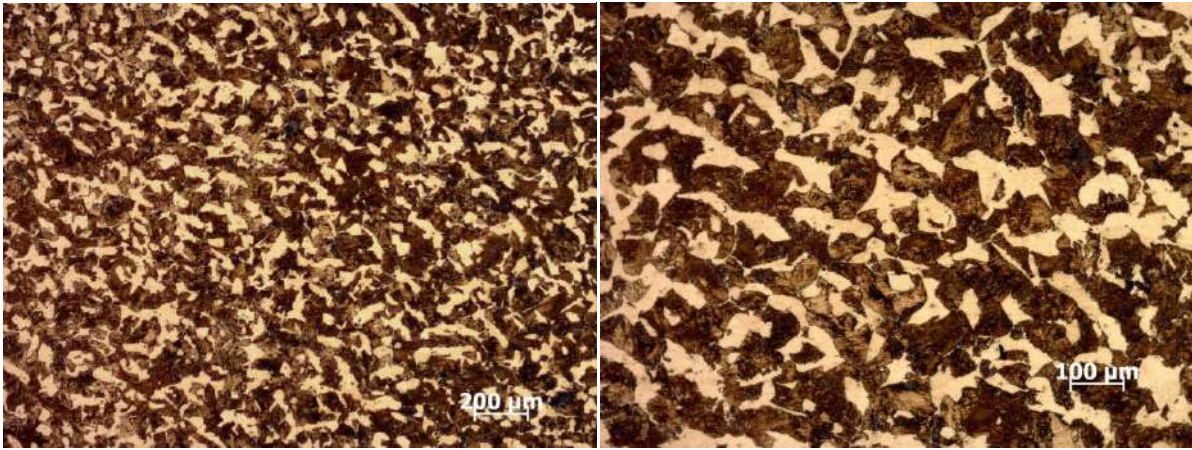
O exame microscópico, com seus fatores de aumento, exige principalmente equipamento muito preciso e altamente especializado. Na análise foi utilizado um microscópio da marca Carl Zeiss, modelo Axio Lab.A1.

Tableau 32: Fotos metalográfica

Foto nº	Data	Realizado por	Descrição	Caracterização do material
Foto – 01	15/02/2012	Eliezer	50x	Presença de perlita e ferrita
Foto – 02	15/02/2012	Eliezer	100x	Presença de perlita e ferrita
Foto – 03	15/02/2012	Eliezer	200x	Presença de perlita, ferrita e incrustações
Foto – 04	15/02/2012	Eliezer	500x	Presença de perlita, ferrita e incrustações
Foto – 05	15/02/2012	Eliezer	1000x	SAE 1045
Foto – 06	15/02/2012	Eliezer	1000x	SAE 1045

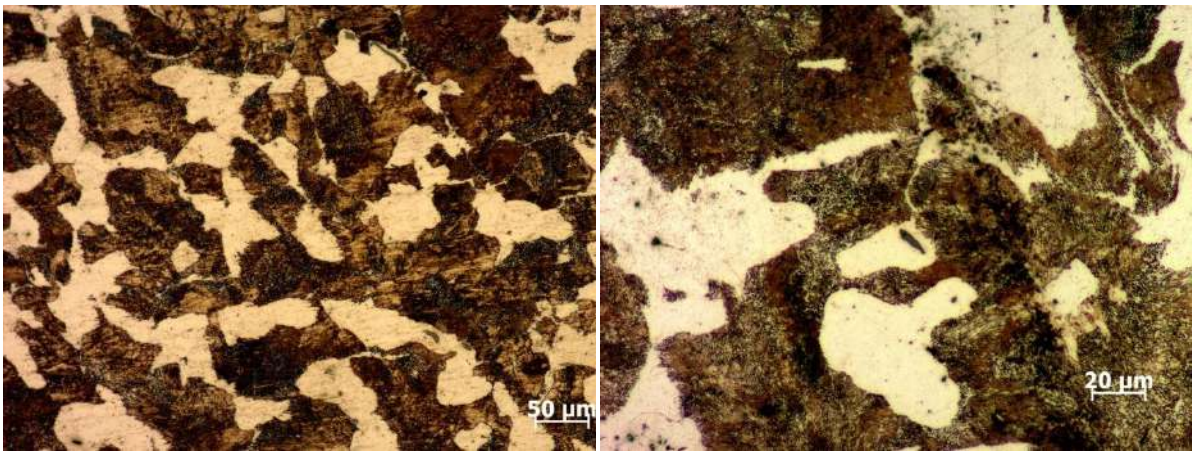
Fonte – Autor

Nas fotos da Figura 93, identifica-se a coloração cinza como perlita, a coloração branca como ferrita, as marcas pretas são de enxofre e incrustações de sujeira. Quando apresenta desenhos semelhantes à impressão digital, trata-se de um aço comum SAE 1045-1050. Isto se observa com maior clareza nas fotografias 05 e 06 da Figura 93.



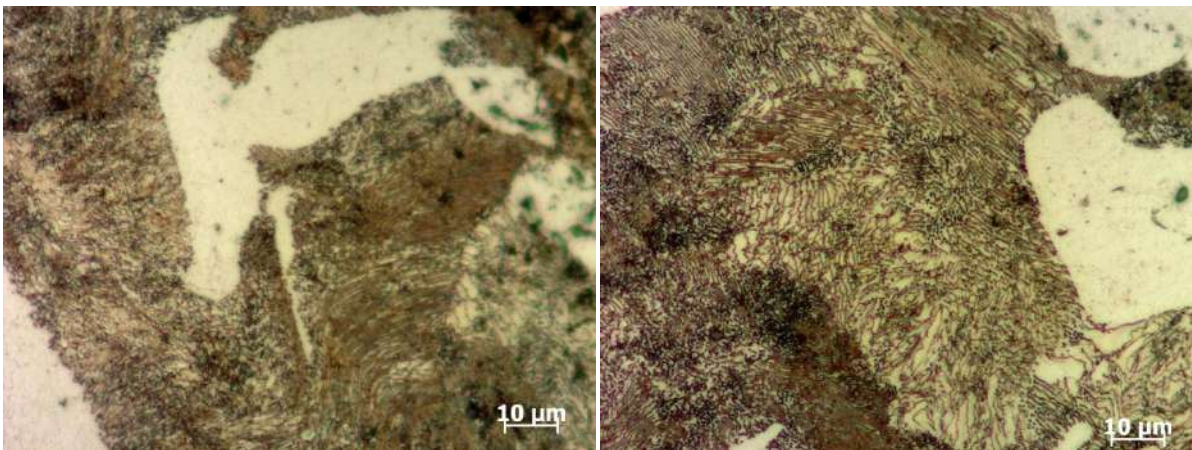
(a) Foto – 01 50X

(b) Foto – 01 100X



(c) Foto – 03 200X

(d) Foto – 04 500X



(e) Foto – 05 1000X

(f) Foto – 06 1000X

Figura 93: Fotos metalográficas

Fonte – Autor

APÊNDICE D – Estudo de dureza

O ensaio de dureza mede a resistência de um material à penetração de outro material, o chamado penetrador. No ensaio feito para determinação da dureza real da peça usada nos experimentos, usou-se um penetrador do tipo esférico (esfera de aço temperado) que deve ser mais duro que o aço a ser penetrado, conforme esquema da Figura 94. A profundidade até onde penetra esse material fornece um valor tabulado segundo a medida da dureza.



Figura 94: Penetrador esférico

O teste aplicado foi o Rockwell em uma durômetro da marca Leco, modelo LT-240. O procedimento acontece da seguinte forma: aplica-se primeiro uma carga pequena (menos de 10 kg) o que faz que o penetrador chegue até uma profundidade específica; em seguida aplica-se a carga maior (100 kg). A profundidade da impressão produzida pela carga maior é a base de medida do ensaio Rockwell. Veja a representação esquemática na Figura 95.

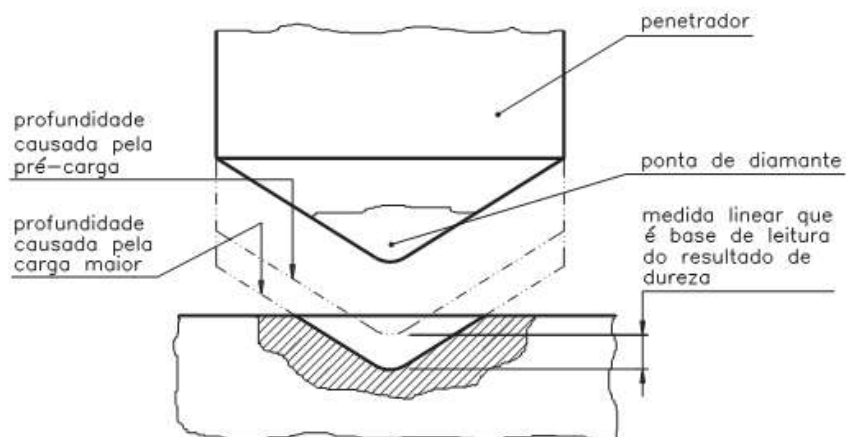


Figura 95: Profundidade produzida por um penetrador cônico de diamante

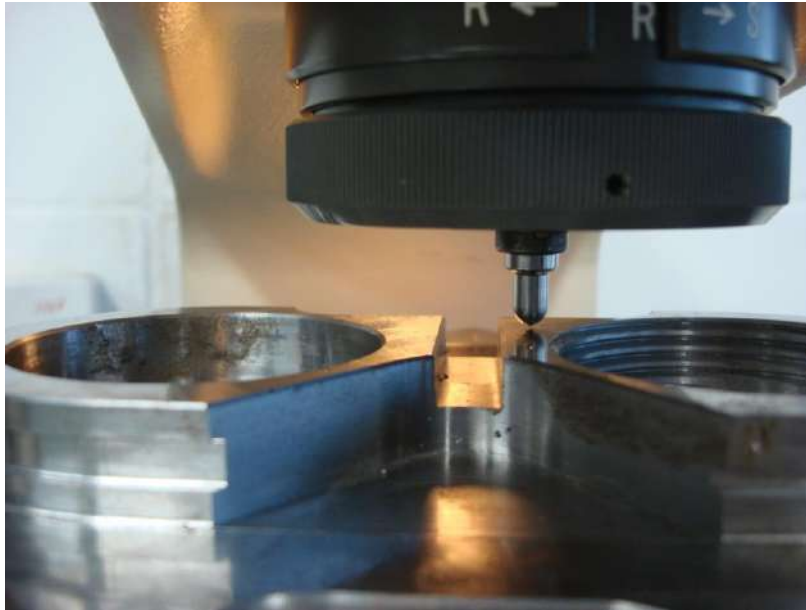


Figura 96: Penetrador e peça

Fonte - Autor

Na Figura 96, se mostra o penetrador encostado na peça, pronto para efetuar a penetração e medir a dureza do material.



Figura 97: Durómetro

Fonte – Autor

Na Figura 97 se mostra o equipamento utilizado para a medição da dureza da peça trabalhada no experimento.

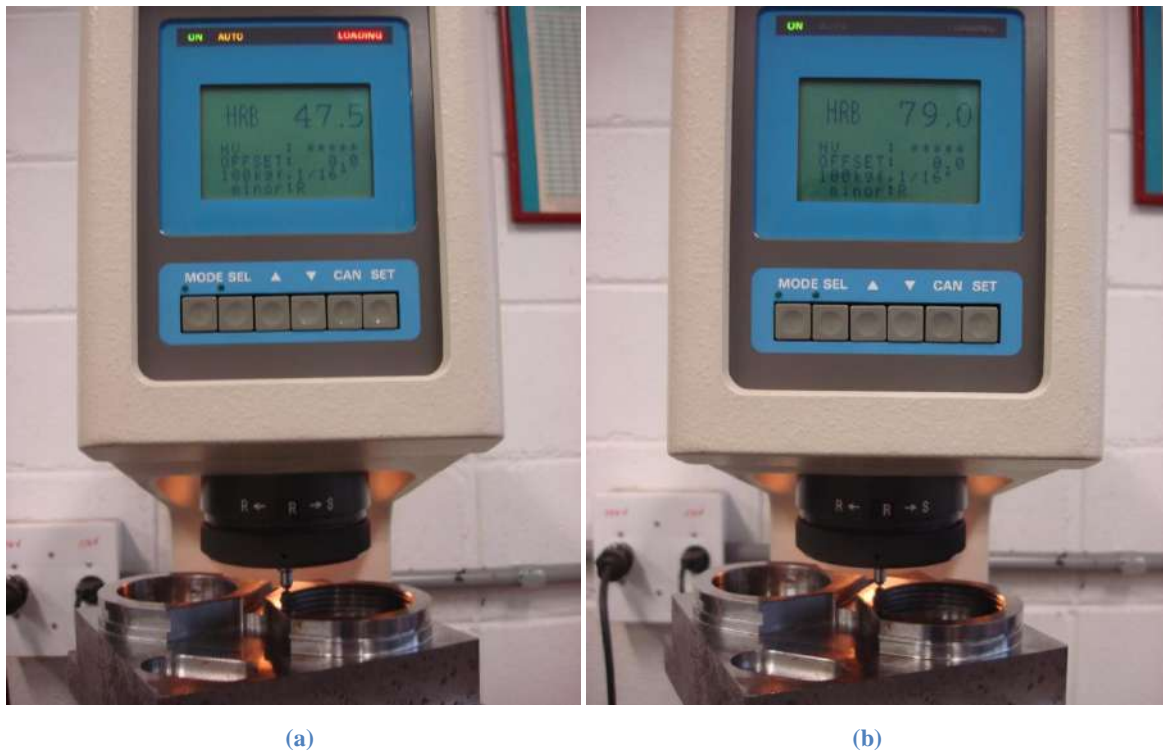


Figura 98: Medição da dureza

Fonte – Autor

A Figura 98 mostra o durômetro com a maior carga (100 kg) encostada na superfície da peça. O durômetro calcula o valor da dureza (Figura 98-a) enquanto o penetrador se aprofunda na peça (98-b). De acordo com a literatura de medição e análise de dureza nos metais, a média de 10 pontos pode ser considerada como o valor da dureza do material analisado.

Tabela 33: Conversão de durezas

HRA Diamante 60 Kg. preta	HRB Esf. 100 Kg. verm.	HRC Diamante 150 Kg. preta	HRF Esf. 1/16" 60 Kg. verm.	HRG Esf. 150 Kg. verm.	HRK Esf. 1/8150 Kg. verm.	15T Esf. 1/16" 15 Kg. superfi	30T Esf. 1/16" 30 Kg. superfi	45T Esf. 1/16" 45 Kg. superfi	HV 10 Kg. direta	HB Esf. 25mm. 187 Kg. Direta
46	74		99	39	85		66	47.5	140	130
46.5	75		99.5	41	86	85	67	48.5	142	132
47	76			42.5	87		67.5	49	146	136
48	77			44	88	85.5	68	50	147	137
48.5	78	10		46	88.5	86	69	51	149	139
49	79			47.5	89.5		69.5	52	151	141
49.5	80			49.5	90.5	86.5	70	53	154	144
50	81	11		51	91	87	71	54	157	147
50.5	82	12		52.5	92		71.5	55	160	150
51	83			54	93	87.5	72	56	163	153
52	84	13		56	94	88	73	57	166	156

Na Tabela 33 localiza-se o valor medido da dureza de 79 em escala HRB equivalente ao valor de 141 na escala HB.

ANEXO A – Mecanismos de acionamento da D800

Tabela 34: Principais mecanismos de acionamento e elementos de consumo de energia elétrica

Mecanismo	Tipo	Potência Ativa	Unidade
Eixo-árvore (S1)	<i>Spindle</i>	11.00	kW (S1)
Eixo-árvore (S2)		15.00	kW (S2)
Eixo X	Servomotor	2.70	kW
Eixo Y	Servomotor	2.70	kW
Eixo Z	Servomotor	2.70	kW
Refrigeração	Bomba	0.34	kVA
Magazine 20 ferramentas	Motor	0.27	kVA
Refrigeração pelo centro do eixo-árvore – 7bar	Bomba	2.25	kVA
Refrigeração pelo centro do eixo-árvore – 15bar	Bomba	4.11	kVA
Refrigeração pelo centro do eixo-árvore – 50bar	Bomba	6.82	kVA
Bomba de alimentação para refrigeração 50bar	Bomba	2.25	kVA
Bomba de abastecimento da troca de filtro	Bomba	0.34	kVA
Troca de filtro	Bomba	0.43	kVA
Wash gun	Bomba	1.26	kVA
Limpeza de Proteções	Bomba	2.25	kVA
Exaustor de névoa	Motor	2.17	kVA
Transportador de cavacos	Motor	0.68	kVA
Transportador de cavacos helicoidal	Motor	0.50	kVA
Refrigeração do cabeçote	Bomba	2.48	kVA
Hidráulico	Motor	2.29	kVA
Braço do TAF	Motor	1.14	kVA
Ventilador do Eixo-árvore	Motor	0.05	kVA
Climatização do PE	Motor	0.10	kVA
Lubrificação	Bomba	0.01	kVA
Tomada de serviço		0.44	kVA
Luminária		0.07	kVA
Ar condicionado	Motor	0.57	kVA
Diagnóstico remoto		0.00	kVA
Skimmer	Motor	0.14	kVA
Bobina do contator principal		0.03	kVA
Ventilador da Refrigeração do Cabeçote	Motor	0.00	kVA
Magazine 30 ferramentas	Motor	0.59	kVA
Fonte 24 Vcc		0.24	kVA
Fonte 24 Vcc		0.24	kVA

ANEXO B – Energia específica de corte e o fator de remoção de material

A energia consumida em remover uma unidade de volume de material é chamada energia específica de corte, E . A energia ou trabalho E é proporcional à força F_c e a distância L sobre a qual atua a força e inversamente proporcional ao volume do material removido V .

$$E = \frac{F_c L}{V} \quad [\text{W.s/mm}^3]$$

Por outro lado, o fator de remoção de material k é o recíproco da energia específica de corte e indica a potência necessária para a remoção de uma unidade de volume de material. Para aços o valor da energia específica de corte gira entre 2,7 e 9,3 Ws/mm³, dependendo da dureza do material.

Tabela 35: Valor específico de potência para metais durante a remoção de material

Material	Dureza	Energia Específica	
		kW.min/cm ³	kW.s/mm ³
Aços...	85-200	0,050	0,00300
	35-40Rc	0,064	0,00384
	40-50Rc	0,068	0,00408
	50-55Rc	0,091	0,00546
	55-58Rc	0,155	0,00930

Fonte - (SHAW 2005)

Os valores específicos de potência para metais não podem ser simplesmente utilizadas nos cálculos, pois dependem dos parâmetros do processo, tais como espessura do cavaco não deformado, ângulo de inclinação e velocidade de corte.