

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
NÍVEL MESTRADO**

TIAGO MIGUEL BLOS

**ESTUDO DE INDICADORES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA USINAGEM
INTEGRANDO MONITORAMENTO DE ENERGIA COM SISTEMA DE
EXECUÇÃO DE MANUFATURA**

São Leopoldo 2020

B656e Blos, Tiago Miguel.

Estudo de indicadores de eficiência energética na usinagem integrando monitoramento de energia com sistema de execução de manufatura / Tiago Miguel Blos. – 2020.

104 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2020.

“Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Mendes Moraes ; coorientador: Prof. Dr. Paulo Ricardo da Silva Pereira”.

1. Eficiência energética. 2. E-KPI. 3. Monitoramento energético. 4. Usinagem. 4. MES.I. Título.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Bibliotecário: Flávio Nunes – CRB 10/1298)

TIAGO MIGUEL BLOS

**ESTUDO DE INDICADORES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA USINAGEM
INTEGRANDO MONITORAMENTO DE ENERGIA COM SISTEMA DE
EXECUÇÃO DE MANUFATURA**

Dissertação apresentada como pré-requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Mendes Moraes

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Ricardo da Silva Pereira

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Paulo Wander
Prof. Dr. Walter Andrey Fontana
Prof. Dr. André Luis Korzenowski

**São Leopoldo
2020**

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Carlos Moraes que foi um mentor e me fez enxergar o valor do meu trabalho nos momentos em que eu estava desacreditado. Com muita paciência e habilidade soube me conduzir para esta realização me orientando com palavras de apoio e quando necessário com choque de realidade para que eu voltasse a direcionar meu foco à pesquisa e não priorizasse minhas responsabilidades profissionais. Ao Professor Paulo Ricardo que me orientou nas questões relacionadas ao monitoramento energético e me auxiliou na montagem do aparato para que os ensaios pudessem ser realizados no Torno CNC do Laboratório da Unisinos.

Ao Clayton Santos, que me auxiliou nos ensaios e me aturou por diversas tardes descascando aço simplesmente para medir o consumo de energia.

À Iara, minha amada esposa, pela paciência e compreensão com minhas limitações e pelo apoio incondicional.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
1.1 OBJETIVOS.....	12
1.1.1 <i>Objetivo Geral</i>	12
1.1.2 <i>Objetivos Específicos</i>	12
1.2 JUSTIFICATIVA.....	13
1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA.....	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 CONSUMO DE ENERGIA NA USINAGEM.....	15
2.1.1 <i>Usinagem</i>	15
2.1.2 <i>Movimentos de máquinas-ferramentas CNC</i>	18
2.2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	20
2.3 INDICADORES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	22
2.3.1 <i>Indicadores termodinâmicos</i>	22
2.3.2 <i>Indicadores físico-termodinâmicos</i>	23
2.3.3 <i>Indicadores econômico-termodinâmicos</i>	23
2.3.4 <i>Indicadores econômicos</i>	24
2.4 MONITORAMENTO DE ENERGIA NA MANUFATURA.....	24
2.4.1 <i>Nível de produto</i>	26
2.4.2 <i>Nível de recurso produtivo</i>	26
2.4.3 <i>Nível de linha de produção</i>	28
2.4.4 <i>Sistemas de monitoramento de energia elétrica</i>	28
2.5 E-KPIS PARA A MANUFATURA.....	29
2.5.1 <i>e-KPIs para usinagem</i>	30
2.6 KPIS NA GESTÃO DA PRODUÇÃO.....	41
2.6.1 <i>OEE - Eficácia Global do Equipamento</i>	41
2.6.2 <i>OEE Classe Mundial</i>	42
2.6.3 <i>O papel do MES no monitoramento da produção</i>	43
3 MATERIAIS E MÉTODOS	46
3.1 MATERIAIS.....	46
3.2 MÉTODOS.....	46
3.2.1 <i>Etapa 1 - Selecionar indicadores de eficiência energética</i>	47
3.2.2 <i>Etapa 2 – Caso de estudo experimental</i>	50
3.2.3 <i>Etapa 3 – Compilação dos resultados – Nível de Produto e Nível de Processo</i>	56
3.2.4 <i>Etapa 4 – Compilação dos resultados – Nível de Produção</i>	58
3.2.5 <i>Etapa 5 – Apresentar indicadores calculados e discutir resultados</i>	60
4 RESULTADOS	61
4.1 ETAPA 1 - SELEÇÃO DOS E-KPI'S.....	61

4.2	FINALIDADES E SELEÇÃO DOS INDICADORES.....	62
4.2.1	<i>Finalidade A - Conhecer o custo energético do produto.....</i>	62
4.2.2	<i>Finalidade B - Melhorar a eficiência energética do processo a nível de produto</i>	64
4.2.3	<i>Finalidade C - Obter dados para Benchmarking interno da eficiência energética entre máquinas.....</i>	65
4.2.4	<i>Finalidade D - Obter dados para avaliação e comparação da eficiência energética com diferentes peças de diferentes geometrias</i>	66
4.2.5	<i>Finalidade E - Tornar visível perdas e desperdício energético relacionados aos eventos da produção ...</i>	67
4.2.6	<i>Finalidade F - Ter visão do resultado global da energia em relação à produção.....</i>	70
4.3	PERFIL DE CONSUMO.....	71
4.4	AVALIAÇÃO DOS INDICADORES (E-KPI'S).....	74
4.4.1	<i>Energia direta.....</i>	74
4.4.2	<i>Energia específica consumida (SEC) por passe</i>	82
4.4.3	<i>Eficiência da máquina.....</i>	83
4.4.4	<i>Energia específica consumida (SEC) do processo</i>	85
4.4.5	<i>Eficiência energética na Qualidade</i>	86
4.4.6	<i>Eficiência energética no Desempenho.....</i>	88
4.4.7	<i>Eficiência energética na Disponibilidade</i>	91
4.4.8	<i>EOEE.....</i>	93
5	CONCLUSÃO	95
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	95
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	96
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	98

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Estados de um recurso produtivo	27
Quadro 2.2 - Indicadores na manufatura	30
Quadro 2.3 - Seis grandes perdas	41
Quadro 2.4 - Funções do MES e possíveis indicadores de energia.....	45
Quadro 3.1 - Finalidades dos indicadores	49
Quadro 3.2 - Cartão do e-KPI.....	49
Quadro 3.3 - Distribuição dos fatores na matriz L9	50
Quadro 3.4 - Variáveis da etapa experimental	51
Quadro 3.5 - Valores para cada nível na matriz L9.....	53
Quadro 3.6 - Quadro de relacionamento entre eventos, estados e perdas	59
Quadro 4.1 - Finalidades dos indicadores	61
Quadro 4.2 - Cartão do indicador de Energia direta.....	63
Quadro 4.3 - Cartão do indicador de SEC por passe	64
Quadro 4.4 - Cartão do indicador de eficiência da máquina	65
Quadro 4.5 - Cartão do indicador de SEC por processo.....	66
Quadro 4.6 - Cartão do indicador de eficiência energética na qualidade	68
Quadro 4.7 - Cartão do indicador de eficiência energético no desempenho	69
Quadro 4.8 - Cartão do indicador de eficiência energética na disponibilidade.....	70
Quadro 4.9 - Cartão do indicador de EOEE	71
Quadro 4.10 - Parâmetros de corte e tempo de ciclo para cada amostra.....	74
Quadro 4.11 - Análise DOE Taguchi	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Condições de corte	16
Figura 2.2 - Esquema dos sistemas consumidores de energia de uma máquina CNC.....	19
Figura 2.3 - Perfil de consumo de uma máquina CNC	20
Figura 2.4 - Perfil de potência na usinagem.....	31
Figura 2.5 - Consumo de energia nos estados da máquina	32
Figura 2.6 - Diagrama de consumo de uma máquina CNC	35
Figura 2.7 - Diagrama de energia na produção	39
Figura 2.8 - Diagrama de tempos na produção	42
Figura 2.9 - Diagrama de um sistema MES	43
Figura 3.1 - Fluxograma da metodologia.....	47
Figura 3.2 - Seleção dos e-KPIs.....	48
Figura 3.3 - Sistema de monitoramento de energia	52
Figura 3.4 - Registro gerado pelo analisador de energia.....	54
Figura 3.5 - Blocos de eventos de máquina	55
Figura 3.6 - Blocos de evento com tempo e consumo	55
Figura 3.7 - Exemplo de extração do tempo de ciclo.....	56
Figura 3.8 - Perfil de consumo total da Amostra 9	57
Figura 3.9 - Perfil de consumo durante o corte da Amostra 9	57
Figura 3.10 - Linha do tempo de uma amostra do cenário 2	60
Figura 3.11 - Linha do tempo de uma amostra do cenário 3	60
Figura 4.1 - Estados de máquina e perfil de potência de um processo de usinagem	63
Figura 4.2 - Perfil de potência em um processo.....	72
Figura 4.3 - Perfil de potência na usinagem para cada amostra.....	73
Figura 4.4 - Perfil de potência do corte para cada amostra.....	73
Figura 4.5 - Gráfico de Consumo x Tempo de ciclo.....	75
Figura 4.6 - Gráfico de Tempo de Ciclo x Energia direta e Potência Média.....	77
Figura 4.7 - Tempo de Ciclo x Profundidade de Corte.....	78
Figura 4.8 - Tempo de Ciclo x Avanço.....	79
Figura 4.9 - Tempo de Ciclo x Velocidade de Corte	79
Figura 4.10 - Gráfico média Sinal/Ruído.....	81
Figura 4.11 - Gráfico do efeito das médias	81
Figura 4.12 - Gráfico MRV x SEC por passe	82

Figura 4.13 - Eficiência da máquina x Energia consumida.....	84
Figura 4.14 - Eficiência da máquina x Energia no corte	84
Figura 4.15 - Gráfico Ap x SEC.....	85
Figura 4.16 - Indicador de Qualidade para o cenário 1 – Peças boas x Peças ruins.....	86
Figura 4.17 - Indicador de Qualidade para o cenário 2 – Peças boas x Peças ruins.....	87
Figura 4.18 - Comparativo de SEC cenário 1 e 2.....	88
Figura 4.19 - Gráfico Desempenho x SEC nos cenários 1 e 2	89
Figura 4.20 - Indicador de Desempenho	89
Figura 4.21 - Detalhamento das paradas	90
Figura 4.22 - Gráfico do Desempenho para cada amostra nos cenários 1 e 2.....	90
Figura 4.23 - SEC médio x SEC ideal para as amostras 1 e 9.....	91
Figura 4.24 - Indicador de Disponibilidade (Base Energia x Base Tempo).....	92
Figura 4.25 - Indicador de Disponibilidade.....	93
Figura 4.26 - Indicadores para as amostras 1 e 9 em todos os cenários	94

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Ap – Profundidade de corte
 CNC - Comando Numérico Computadorizado
 DOE – *Design of Experiments* (Planejamento Experimental)
 E – Energia
 E_fD – Eficiência energética na Disponibilidade
 EOEE – Eficácia energética global do equipamento
 E_fP – Eficiência energética no Desempenho
 E_fQ – Eficiência energética na Qualidade
 e-KPI – *Energy Key Performance Indicator* (Indicadores de Desempenho em Energia)
 $E_{peça}$ – Energia direta para fabricação de uma peça
 E_{passe} – Energia consumida em um passe de usinagem
 ERP – *Enterprise Resource Planning*
 Fn – Avanço
 IEA – *International Energy Agency*
 KPI – *Key Performance Indicator* (Indicador de Desempenho)
 MES – *Manufacturing Execution System* (Sistema de execução de manufatura)
 MESA – *Manufacturing Enterprise Solutions Association*
 MRP II – *Manufacturing Resource Planning*
 MRR – *Material Removal Rate* (Taxa de Remoção de Material)
 MRV – *Material Removal Volume* (Volume de Material Removido)
 MRV_{passe} – Volume de Material Removido em um passe de usinagem
 $MRV_{peça}$ – Volume de Material Removido na usinagem de uma peça
 OEE – *Overall Equipment Effectiveness* (Eficácia Global do Equipamento)
 P – Potência
 PCP – Planejamento e Controle de Produção
 PIB – Produto Interno Bruto
 SEC – *Specific energy consumption* (Energia específica consumida)
 SEC_{passe} – Energia específica consumida no passe
 $SEC_{peça}$ – Energia específica consumida na usinagem de uma peça
 TPM – *Total Productive Maintenance*
 Vc – Velocidade de corte

RESUMO

A eficiência energética na manufatura é um assunto cada vez mais discutido na busca da redução de custos com energia e redução do impacto ambiental negativo dos processos industriais. Com isto, busca-se produzir mais com menos energia e para isto é essencial ter o conhecimento das informações de consumo na produção. Para se trabalhar na melhoria da eficiência energética na manufatura é necessário ter uma gestão da energia e para isto é importante que se tenha um monitoramento energético dos recursos produtivos. Para avaliação de dados coletados pelo monitoramento, são necessários indicadores de desempenho (KPIs) que tragam subsídios para a tomada de decisão em relação às melhorias de processo fomentando melhor eficiência energética. Estes KPIs de eficiência energética podem receber informação cruzando bases de dados de sistemas de monitoramento energético com sistemas de monitoramento de produção, como o *Manufacturing Execution System* (MES), que possuem informações de status dos recursos produtivos em tempo real. Neste contexto, este trabalho propôs a aplicação de oito KPIs que pudessem ser utilizados integrando dados de um sistema de monitoramento energético com um MES. Foi realizado um estudo dos principais KPIs de energia na manufatura e, para validação destes indicadores, foi realizado um estudo experimental que gerou dados para alimentar os indicadores e que permitiu uma avaliação e discussão da sua relevância. O estudo experimental foi dividido em duas partes, sendo a primeira para validação dos indicadores a nível de produto e processo e a segunda a nível de produção em um processo de usinagem. A construção do estudo experimental foi realizada com a metodologia de *Design of Experiments* (DOE) de Taguchi em nove amostras com diferentes combinações de valores para três diferentes parâmetros de corte (profundidade de corte (A_p), avanço (F_n) e velocidade de corte (V_c)). Os resultados obtidos mostram que os KPIs de maior relevância foram o indicador de energia direta e o indicador de eficiência energética no desempenho. O KPI de energia direta tem a amostra com condições de corte mais severas e com menor tempo de ciclo como a de melhor eficiência energética, com um consumo de energia 167 Wh menor que a amostra de condições de corte mais brandas. Já o indicador de eficiência energética no desempenho apresentou o impacto do desperdício de energia quando se tem baixo desempenho na produção e o resultado da amostra com tempo de ciclo mais curto apresentou eficiência de 64 pontos percentuais maior que a amostra com tempo de ciclo mais longo.

Palavras-chave: Eficiência energética. e-KPI. Monitoramento energético. Usinagem. MES

ABSTRACT

Energy efficiency in manufacturing is an increasingly discussed issue in the pursuit of reducing energy costs and reducing the negative environmental impact of industrial processes. Thus, it seeks to produce more with less energy and for this it is essential to have full knowledge of consumption in production. In order to work on energy efficiency improvement in manufacturing, it is necessary to have energy management and, to reach that, is important to have an energy monitoring of productive resources. To evaluate collected data by monitoring system, are needed Key Performance Indicators (KPIs) that can provide decision-making support for process improvement that promote better energy efficiency. These energy efficiency KPIs can receive information by cross-checking energy monitoring system databases with production monitoring systems such as the Manufacturing Execution System (MES), which can provide real-time information of the resources, products and production. In this context, this work proposed the application of eight KPIs that could be used integrating data from an energy monitoring system with a production monitoring system. Firstly, was made a study of the main energy KPIs in manufacturing and to validate these eight indicators, an experimental study was conducted to generate data that would feed these indicators and allow an evaluation and discussion of their relevance. The experimental study of this work was divided into two parts, the first for validation of indicators at product and process level and the second at production level in a machining process. The construction of the experimental study was carried out using Taguchi's Design of Experiments (DOE) methodology in nine samples with different combinations of values for three different cutting parameters (depth of cut (A_p), feed (F_n) and cutting speed (V_C)). The results obtained show that the most relevant KPIs were the indicator of direct energy and the indicator of energy efficiency in performance. The direct energy KPI has the sample with the most severe cutting conditions and the shortest cycle time as the one with the best energy efficiency, with 167 Wh less energy consumption than the sample with milder cutting conditions. The energy efficiency indicator on performance, on the other hand, presented the impact of energy waste when there is low performance in production and the result of the sample with a shorter cycle time shown an efficiency of 64 percentage points higher than the sample with a longer cycle time.

Keywords: Energy efficiency. e-KPI. Energy monitoring. Machining. MES

1 INTRODUÇÃO

Eficiência energética é uma temática cada vez mais valorizada dentro das empresas do setor produtivo, devido ao aumento do custo da energia, pela discussão ambiental que envolve aquecimento global e pelo incentivo a práticas sustentáveis promovidos pelos órgãos governamentais (ABELE; PANTEN; MENZ, 2015). O mercado também está atento ao comportamento das empresas e muitos consumidores dão preferência a produtos sustentáveis, mesmo que tenham que pagar a mais na sua compra (BUNSE et al., 2011). Outro ponto de grande relevância é o aumento do custo da energia que gera a necessidade de se ter cada vez menos uso energético para se produzir produtos competitivos (WIPPERMANN et al., 2020).

O setor industrial representa o maior consumo de energia e matéria-prima, superando os setores comercial, residencial e o de transporte. Por ter a maior demanda por estes recursos, o setor produtivo é o mais adequado campo para se buscar soluções de eficiência energética e sustentabilidade (MARTÍNEZ, 2015). Para aumentar a eficiência energética as empresas têm duas opções. A primeira é investir em equipamentos com melhor eficiência energética, ou seja, aumentar a produção com menor consumo de energia. A segunda opção é investir em estratégias de melhor uso da energia, reduzindo desperdícios e utilizando a energia de forma inteligente (MARTÍNEZ, 2015). Para a segunda opção é necessário ter uma gestão do uso da energia e para isto é preciso que se tenha um monitoramento contínuo do uso da energia dentro dos recursos e processos produtivos.

Um passo importante para se buscar uma melhor eficiência energética é desenvolver sistemas para entender e caracterizar o consumo de energia (VIJAYARAGHAVAN; DORNFELD, 2010). Raramente as empresas possuem dados confiáveis de consumo energético das máquinas e produtos, porém existe uma tendência para monitoramento com o objetivo de obter maior transparência na avaliação da eficiência energética. Monitorar estes dados de consumo de energia e organizá-los de forma com que se possa tomar decisões para melhorar a eficiência energética dos processos, identificando fontes de perda e desperdício de energia é essencial (ABELE; PANTEN; MENZ, 2015).

O MES (*Manufacturing Execution System*) é um sistema que integra os sistemas de gestão da empresa com os recursos do chão-de-fábrica. Com o MES é possível ter informações de todos os recursos produtivos da fábrica, bem como as peças que estão sendo processadas em cada máquina. Além disso, o MES monitora os estados das máquinas, armazenando registros que são usados para alimentar indicadores de produtividade, como o *Overall Equipment*

Effectiveness (OEE), ou Eficácia Global do Equipamento, por exemplo (UGARTE; ARTIBA; PELLERIN, 2009).

Os KPIs são indicadores de desempenho, ferramentas essenciais para as empresas terem o entendimento do que ocorre em seus processos e serve como guia para controlar as ações planejadas e atingir as metas estabelecidas. Com o nível atual de competitividade na indústria, é importante que as empresas tenham informações sobre o consumo de energia dos seus processos, bem como indicadores adequados que facilitem a interpretação destes dados (BARLETTA et al., 2014).

Este sistema pode ser usado para o monitoramento do consumo de energia e matéria-prima, coletando dados do uso destes recursos de acordo com as fases do processo produtivo. Estes dados, quando cruzados com os dados da produção, geram uma grande base de informações que pode ser utilizada para alimentar indicadores, além da produtividade, da eficiência energética de cada produto e em cada etapa do processo produtivo.

1.1 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho estão descritos a seguir.

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é propor um sistema de avaliação de indicadores de desempenho em energia na usinagem compostos por dados provenientes de uma integração de um sistema de monitoramento de produtividade com um sistema de monitoramento de energia.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

1. Avaliar os principais indicadores de desempenho em energia para um processo de usinagem;

2. Definir os principais indicadores que se ajustam aos sistemas de monitoramento de produtividade e energia;
3. Avaliar os indicadores selecionados em resultados experimentais, com diferentes cenários, para avaliar sua efetividade.

1.2 JUSTIFICATIVA

Dentro da indústria de manufatura, a usinagem é um processo que consome uma quantidade significativa de energia e outros recursos que geram um impacto ambiental considerável. Monitorar e reduzir o consumo de energia dos recursos produtivos da indústria torna possível melhorar a eficiência energética e o desempenho ambiental, resultando em uma redução do impacto ambiental do produto acabado (MONTEIRO, 2013). A evolução da tarifa da energia elétrica na última década é outro fator que destaca a importância de estudos da melhoria da eficiência energética para que as empresas possam reduzir o consumo de energia e ter maior competitividade (FIESC, 2018) (WIPPERMANN et al., 2020).

O sistema MES, destinado a monitorar os recursos produtivos, possui o objetivo de coletar dados da produção para medir produtividade, eficiência e qualidade e são fontes de dados para tomada de decisões em favor de melhores resultados no campo da produção. Este sistema têm o potencial de trabalhar juntamente com um sistema de monitoramento de energia para gerar dados de consumo dos processos produtivos e promover melhorias em processos que levem à redução do consumo energético.

Neste contexto, é importante um estudo para avaliação dos indicadores de eficiência energética que melhor se enquadram numa integração entre um sistema de monitoramento de energia com um sistema de monitoramento da produtividade na manufatura. Com isto, os dados gerados podem apresentar resultados objetivos e alinhados com os objetivos estratégicos das empresas.

A proposição da aplicação do sistema MES integrado com sistemas de monitoramento de energia em recursos produtivos não é um assunto novo no cenário acadêmico e já foi abordado por alguns autores como Bougain et al. (2015), Abele; Panten; Menz (2015), Bunse et al. (2011), Lee et al. (2014) e Barletta (2012), porém a avaliação dos dados gerados pela integração entre estes sistemas é pouco explorada. Além disso, este trabalho traz uma avaliação

através de dados de consumo de energia gerados a partir de ensaios práticos, obtendo o consumo real de energia para etapa do processo de usinagem. Esta característica pouco explorada em outros trabalhos representa a relevância dos resultados.

1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos. O primeiro, introdutório, descreve a justificativa, objetivos. O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica necessária ao embasamento fundamental sobre os assuntos referentes ao tema do trabalho. Após, a terceira parte traz a metodologia usada, materiais e métodos. No quarto capítulo são apresentados os resultados e discussões. Por fim, no quinto capítulo foi realizado um fechamento do trabalho com a conclusão.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta revisão bibliográfica necessária ao embasamento dos assuntos referentes ao tema deste trabalho.

2.1 CONSUMO DE ENERGIA NA USINAGEM

Para entender o consumo de energia elétrica nos processos de usinagem, inicialmente é necessário entender como ocorre o processo, as máquinas que executam o processo e os sistemas consumidores de energia presentes nestas máquinas. Neste subcapítulo são apresentadas as informações básicas destes tópicos que balizaram este trabalho.

2.1.1 Usinagem

A usinagem convencional é um processo de fabricação realizado em máquinas ferramenta e é caracterizado pela remoção de material realizada pela penetração de uma ferramenta que desliza sobre a peça realizando a remoção do material o corte por cisalhamento. O material removido no processo é chamado de cavaco (GROOVER, 2012).

A formação do cavaco ocorre pela penetração de uma ferramenta com formato de uma cunha cortante que exerce uma pressão na superfície da peça, ao realizar o deslocamento linear paralelo à superfície a ser cortada, gerando uma força de cisalhamento. Quando esta pressão supera a resistência do material usinado, o material residual sofre uma deformação seguida de uma ruptura por cisalhamento e é separado da peça. Este material residual, dependendo das condições de corte, geometria da ferramenta e do material da peça, pode ser contínuo ou descontínuo (MACHADO et al., 2009).

O processo de usinagem convencional ocorre com uma combinação de movimentos entre peça e ferramenta, que resulta na operação de corte, como apresentado na Figura 2.1. Estes movimentos definem os parâmetros de corte, ou seja, as variáveis do processo de usinagem, que podem definir o tempo de processamento e a quantidade de material removido, também definidos como condições de corte. A velocidade de corte (V_c) é a velocidade em que

a superfície a da peça se desloca em relação à ferramenta no sentido de giro do corte, ou seja, é a velocidade tangencial do diâmetro externo da peça em rotação, medido em metros por minuto, e é calculada conforme Equação (2.1) (BLACK; KOHSER, 2011).

$$V_c = \frac{\pi d n}{1000} \left[\frac{m}{min} \right] \quad (2.1)$$

Onde:

d: Diâmetro da peça

n: Número de rotações por minuto (rpm)

O Avanço (F_n) é a velocidade em que a ferramenta se desloca na direção de corte a cada rotação da peça, caracteriza a quantidade de material removida a cada volta da peça em seu próprio eixo, conforme Equação (2.2) (SINGH, 2006).

$$F_n = [mm/rev] \quad (2.2)$$

A profundidade de corte (A_p) representa o quanto a ferramenta penetra na peça para remover material perpendicularmente ao plano de trabalho, conforme Equação (2.3) (CERVELIN, 2009).

$$A_p = [mm] \quad (2.3)$$

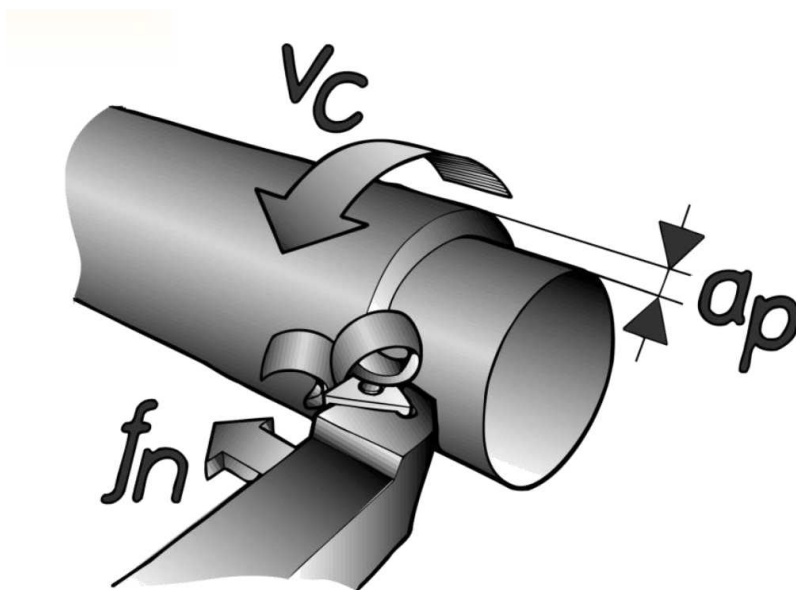


Figura 2.1 - Condições de corte

Fonte: Valio (2014)

Estas três dimensões são usadas para o cálculo da taxa de remoção de material (MRR - *Material Removal Rate*). O MRR é a taxa de remoção de material expressa em cm^3 por minuto e expresso pela Equação (2.4), ou seja, corresponde ao volume de material removido em um determinado intervalo de tempo (BLACK; KOHSER, 2011).

$$MRR = Vc Fn Ap \left[\frac{\text{cm}^3}{\text{min}} \right] \quad (2.4)$$

Estes três parâmetros de corte definem diversas características no processo de usinagem, como o tempo de usinagem, a taxa de remoção de material e a vida útil da ferramenta. A velocidade de corte é a variável que mais influência na durabilidade da ferramenta e quanto menor a vida útil da ferramenta, maior é o número de paradas para troca do inserto. Com isto, muitas vezes, aumentar a velocidade de corte em processo de usinagem seriada de peças, pode causar um prejuízo à produtividade, mesmo que a velocidade reduza o tempo de processo, esta pode provocar a necessidade de troca mais frequente da ferramenta (MACHADO et al., 2009).

Em alguns casos o tempo de troca da ferramenta supera o tempo de usinagem e com isto uma velocidade de corte alta deixa de ser um fator de produtividade e passa a interferir negativamente neste aspecto, gerando maiores custos por improdutividade e maior uso de ferramentas de corte. Com isto, em alguns casos é recomendável aumentar a profundidade de corte ou o avanço, que também aumentam a produtividade sem comprometer a vida útil da ferramenta, como um aumento na velocidade de corte (MACHADO et al., 2009).

Groover (2012), em seu estudo com uma combinação específica de material de ferramenta e material de peça, observou que um aumento de 50% na velocidade de corte provocou uma queda de 90% no tempo de vida útil da ferramenta. Já um aumento de 50% no avanço gerou uma perda de 60% na vida útil da ferramenta e um aumento de 50% na profundidade de corte ocasionou uma redução de apenas 15% no tempo de vida útil da ferramenta.

A variação desta combinação de fatores leva a uma necessidade de otimização para se obter a melhor produtividade e menor custo com uso de ferramentas, chegando à uma condição econômica de corte. Segundo Machado et al. (2009), a principal variável a ser aumentada com o objetivo de se aumentar a produtividade é a profundidade de corte, seguida pelo avanço e então a velocidade de corte.

2.1.2 Movimentos de máquinas-ferramentas CNC

As máquinas ferramenta são consideradas máquinas mãe, pois têm a capacidade de fabricarem peças para outras máquinas. Esta classe de equipamento pode ser dividida em dois grandes grupos de máquina: máquinas de corte e máquinas de conformação. As máquinas de corte se caracterizam pela formação da geometria das peças, seus produtos, com a remoção de material, com o exemplo de máquinas de usinagem. Já as máquinas de conformação obtêm suas peças sem a remoção de material e atuam na deformação da matéria-prima transformando-a na geometria final, como o exemplo das prensas (SUH et al., 2008). As máquinas ferramentas podem ser manuais, também chamadas de convencionais ou podem ser programadas por computador, chamadas máquinas CNC (Comando Numérico Computadorizado), o que torna a operação automatizadas.

As máquinas de corte operam com movimentos que realizam as operações para a formação do produto. Segundo Lv et al. (2016) estes movimentos são diferentes nos diversos estados de máquina e apresentam um perfil de consumo de energia específico. Estes movimentos podem ser classificados em três categorias de acordo com o estado da máquina no processo: Movimentos básicos e auxiliares, Movimentos em vazio e Movimentos para remoção de material.

Os movimentos básicos e auxiliares correspondem aos sistemas auxiliares que estão ligados quando a máquina está em estado de espera ou em estado de pronta para operação. Esta categoria de movimentos possui sistemas consumidores de energia necessários para o início da operação e devem estar ligados e preparados para que a máquina possa iniciar o serviço. Dentro destes sistemas estão os sistemas hidráulicos e sistemas de refrigeração que estão ativos sempre mesmo que a máquina não esteja operando (DELGADO MONTES, 2012).

Os movimentos em vazio são os movimentos realizados pela máquina para iniciar e finalizar a operação de corte, porém durante estes movimentos não há remoção de material. Nesta categoria se enquadram como sistemas consumidores o motor do eixo árvore que inicia rotação antes da remoção do material, movimentos dos eixos X, Y e Z, para posiciona a ferramenta no ponto de início de remoção de material (PAVANASKAR, 2014).

Os movimento de remoção de material são os mesmos que em vazio, porém passam a ser considerados a partir do momento em que a ferramenta inicia o contato com a peça removendo material (CAI et al., 2017a).

O diagrama da Figura 2.2 apresenta os sistemas consumidores de energia para cada estado de máquina de uma máquina-ferramenta CNC.

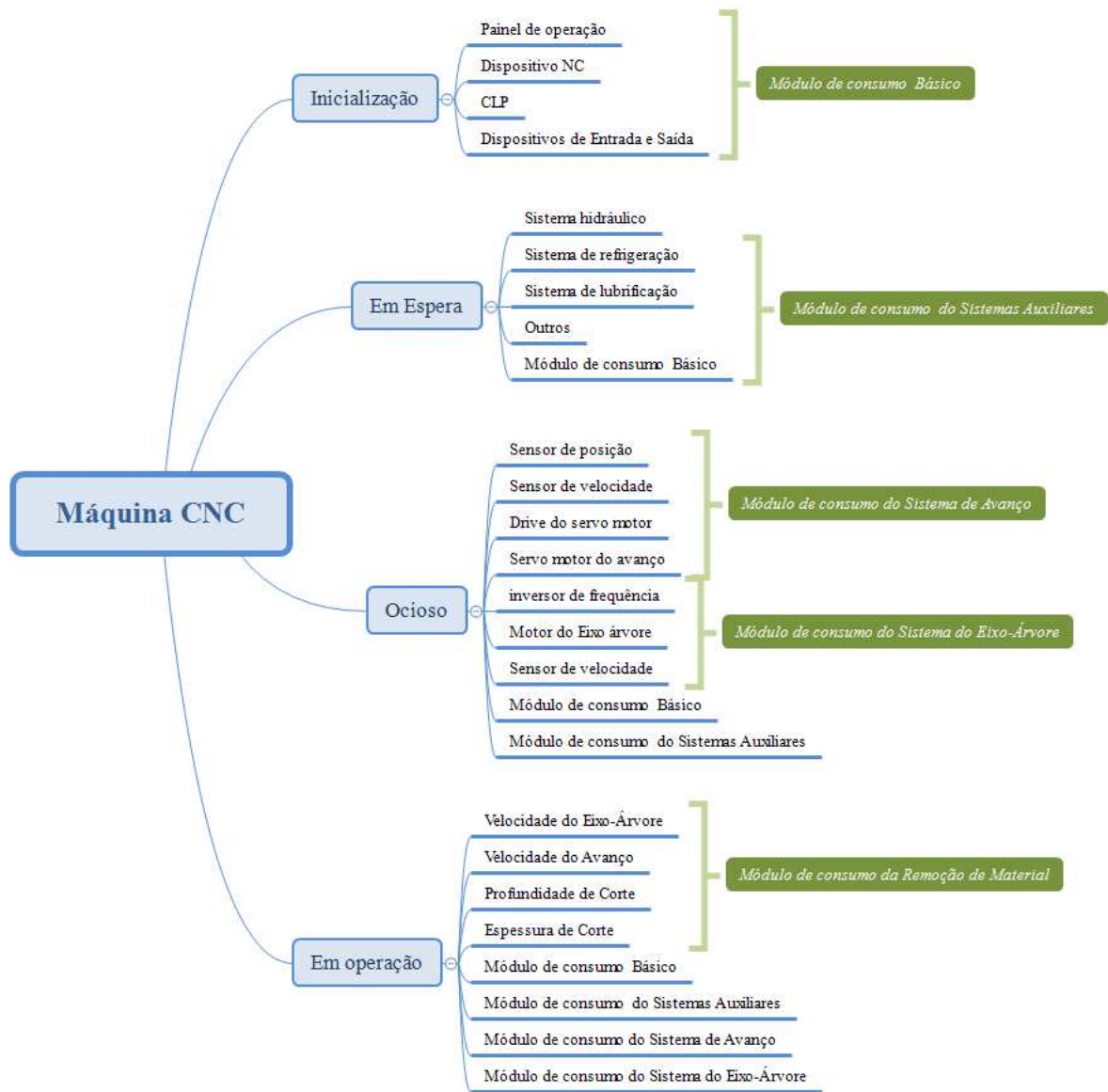


Figura 2.2 - Esquema dos sistemas consumidores de energia de uma máquina CNC

Fonte: Deng et al. (2017)

O perfil de potência de uma máquina CNC varia de acordo com os estados de máquina e as etapas da operação. Como pode ser visto na Figura 2.3, cada degrau de potência corresponde ao somatório de diversos sistemas da máquina que são ativados para realizar as operações. Mesmo em estado de Espera, a máquina apresenta um consumo básico de energia devido aos sistemas eletrônicos da máquina que devem estar ligados antes de iniciar qualquer operação. Por causa dos sistemas auxiliares, quando a máquina está realizando movimentações

sem remoção de material, em vazio, também há uma potência demandada somada aos consumidores básicos. Por fim, quando a máquina inicia o corte, são agregadas as potências necessárias para a remoção do material.

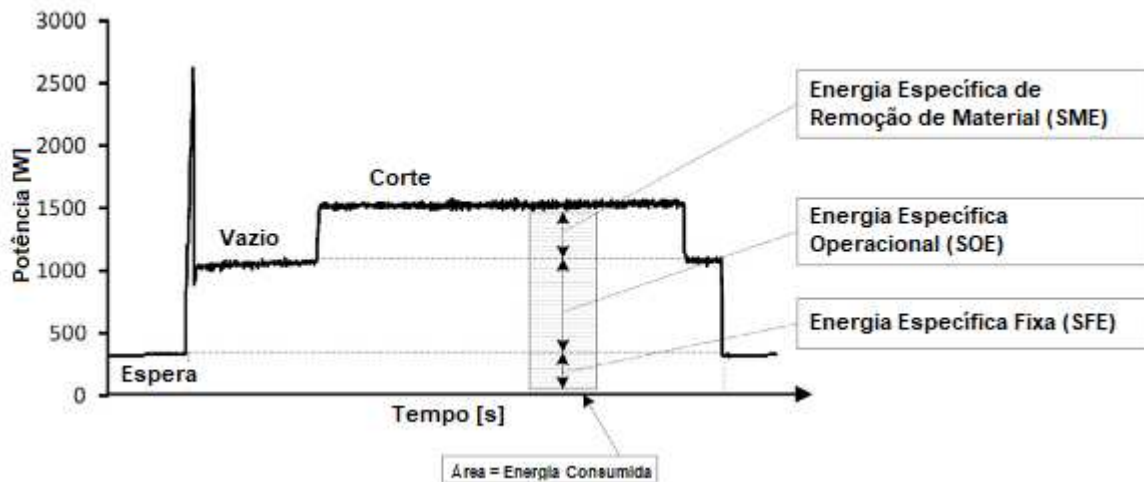


Figura 2.3 - Perfil de consumo de uma máquina CNC

Fonte: Zhong, Tang e Peng (2017)

2.2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Eficiência, de maneira geral, é representada pela razão entre qualquer saída de um processo, por sua entrada, conforme Equação (2.5) (THIEDE, 2012).

$$Eficiência\ Energética_{Geral} = \frac{Desempenho, bens, serviços\ ou\ energia\ de\ saída}{Energia\ de\ entrada} \quad (2.5)$$

Segundo IEA (2007), a definição de eficiência energética é a obtenção de serviços energéticos, como produção, transporte e calor, por unidade de energia utilizada. Esta definição pode mudar de acordo com as circunstâncias, como por exemplo, na engenharia, a eficiência energética é caracterizada termodinamicamente pela razão entre a energia de saída e a energia de entrada de um sistema, Equação (2.6).

$$Eficiência\ Energética_{Termodinâmica} = \frac{Energia\ de\ saída}{Energia\ de\ entrada} \quad (2.6)$$

Avaliando a eficiência energética na manufatura, uma abordagem físico-termodinâmica é empregada, aplicando a razão dos valores produzidos pela energia de entrada do processo, conforme Equação (2.7) (THIEDE, 2012).

$$Eficiência\ Energética_{Sist.Manuf} = \frac{Produção\ de\ saída}{Energia\ total\ de\ entrada} \quad (2.7)$$

Segundo EPE (2010), eficiência energética é a relação entre a energia útil no sistema e a quantidade de energia final utilizada de um bem produzido ou serviço realizado. Isto significa que para se ter uma melhor eficiência energética, é necessário reduzir a energia de entrada de um processo para se obter o mesmo serviço, conforme Equação (2.8).

$$\eta = \frac{E_{útil}}{E_{utilizada}} = \frac{E_{utilizada} - Perdas}{E_{utilizada}} \quad (2.8)$$

Estas definições são generalizações da razão dos dados de entradas e saídas de um processo e variam muito para diferentes processos. Para uma melhor avaliação da eficiência energética dos sistemas produtivos é importante definir corretamente os limites do sistema, ou seja, se é uma avaliação a nível de recurso produtivo (máquina), fábrica, ou até mesmo a nível de país. Também é importante definir as possíveis variáveis de entrada e saída e suas respectivas unidades de medida. Um exemplo são os indicadores de eficiência energética na usinagem, que se define por um processo de remoção de material, então o produto do processo é o volume de material removido. Essa característica é específica deste processo, ao contrário de processos aditivos, como impressão 3D ou até mesmo injeção em molde, em que o material é adicionado e as variáveis para definir a eficiência energética são outras.

2.3 INDICADORES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Patterson (1996) classifica os indicadores de eficiência energética em quatro grupos distintos, de acordo com a forma em que as energias de entrada e saída são medidas. Estes grupos são: Termodinâmico, Físico-Termodinâmico, Econômico-Termodinâmico e Econômico.

2.3.1 Indicadores termodinâmicos

A eficiência energética do ponto de vista termodinâmico, tem seus indicadores baseados nos processos energéticos que envolvem conceitos como calor e trabalho e são medidos através dos termos da termodinâmica, como Entropia, Entalpia e Exergia, por exemplo. Os indicadores termodinâmicos provêm de medidas para uma determinada função de estado de acordo com as condições física de um processo, como temperatura e pressão. Com isto a eficiência energética do ponto de vista da entalpia é definida pela razão da entalpia na entrada, ou seja, a soma de toda energia empregada no processo, pela entalpia na saída, que corresponde a soma de toda energia útil na saída do processo, baseado na primeira lei da termodinâmica, conforme Equação (2.9) (LI, 2015).

$$\eta_{\Delta H} = \frac{\Delta H_{saída}}{\Delta H_{entrada}} \quad (2.9)$$

Na indústria, em processos que não envolvem apenas funções de estado relacionadas ao calor, uma abordagem puramente termodinâmica é limitada para definir a eficiência energética. No processo de usinagem, por exemplo, é difícil de determinar a eficiência energética por meio puramente termodinâmico porque as variações de temperatura na zona de formação do cavaco mudam muito com diferentes materiais da peça produzida, ferramenta de corte, parâmetros de corte (ZEIN, 2012).

2.3.2 Indicadores físico-termodinâmicos

Os indicadores de eficiência energética termodinâmicos não representam medidas de saída para serviços ou processos. Eles representam a eficiência energética em termos de calor e trabalho, ao contrário do que se busca em um sistema produtivo, em que se utiliza a eficiência energética em unidades físicas específicas para determinar os valores de saída dos processos, como unidade de massa produzida por unidade de energia [kg/Wh], por exemplo. Os indicadores físico-termodinâmicos são empregados justamente para contornar esta deficiência nos indicadores termodinâmicos e são aplicados para melhor avaliar a eficiência energética global de um processo. Normalmente estes processos têm sua eficiência energética ligada à produtividade, ou seja, uma máquina que produz determinada quantidade de peças utiliza uma certa quantidade de energia no processo (MONTEIRO, 2013).

No processo de usinagem o principal objetivo é a fabricação de peças, porém este processo se resume na remoção de material para dar forma ao produto. A eficiência do processo de usinagem, do ponto de vista da produtividade, é dada pelo número de peças produzidas por unidade de tempo [peças/h], esta mesma lógica poderia ser utilizada para a eficiência energética, calculando o número de peças produzidas pela unidade de energia empregada. Contudo, devido à característica do processo de usinagem, seu indicador de eficiência energética mais apropriado é baseado no *Material Removal Volume* (MRV) ou volume de material removido [cm³] por unidade de energia [Wh], chamado de *Specific Energy Consumption* (SEC), ou Energia Específica Consumida. Este indicador é mais adequado, pois a matéria-prima para fabricação da peça pode ser levada em consideração e serve de parâmetro para comparar a eficiência energética de processos semelhantes para fabricação de diferentes peças (BALOGUN; MATIVENGA, 2013).

2.3.3 Indicadores econômico-termodinâmicos

Os indicadores econômico-termodinâmicos relacionam os valores de energia de entrada do processo em termos termodinâmicos e os valores de saída em termos de valores do mercado econômico. Estes indicadores de eficiência energética são utilizados a nível de país ou por setor e muitas vezes são relacionados com o Produto Interno Bruto (PIB) para se ter um parâmetro de eficiência energética de uma região ou de um setor inteiro (MONTEIRO, 2013).

2.3.4 Indicadores econômicos

Os indicadores de eficiência energética econômico-termodinâmicos relacionam valores de entrada de energia em termos termodinâmicos e os valores de saída em termos monetários ou econômicos, os indicadores puramente econômicos relacionam em ambos os lados, entrada e saída, com valoração de mercado. Em resumo, considera-se o valor monetário referente ao custo da energia consumida, com os valores em bens produzidos. Existe uma discussão se este indicador pode ser classificado como um indicador de eficiência energética, ou deve ser considerado apenas como um macro indicador econômico (PATTERSON, 1996).

Para estudos na engenharia, os indicadores puramente termodinâmicos e os indicadores físicos-termodinâmicos são mais aplicáveis, enquanto os outros indicadores econômicos são importantes para estudos em macroeconomia e políticas econômicas (LI, 2015).

2.4 MONITORAMENTO DE ENERGIA NA MANUFATURA

Métodos apropriados para medição de consumo de energia e eficiência energética são necessários para auxiliar na tomada de decisão na indústria de manufatura e com isto surge a necessidade de avaliar este parâmetro em diferentes níveis para se ter uma boa gestão de energia (MAY et al., 2013).

Os sistemas de manufatura, dentro da indústria, são os principais consumidores de energia. A energia consumida por estes sistemas pode ser classificada e categorizada em uma hierarquia de camadas de acordo com o nível de abrangência do sistema avaliado. Para Wójcicki, Bianchi e Tolio (2018), os sistemas de produção podem ser divididos em nível de componente, nível de processo, nível de máquina ferramenta e nível de sistema de manufatura.

Neugebauer et al (2011) apresentam um outro ponto de vista mais completo em relação à avaliação da energia em um sistema produtivo, incluindo as decisões a partir do nível de produto. As camadas abordadas pelos autores são: definição de produto, definição de processo, componentes da máquina ferramenta, máquina ferramenta, linha de produção e fábrica.

Uma abordagem mais simples é apresentada por Thiede (2012), que divide os sistemas de manufatura em apenas dois níveis, sendo o nível de máquina, em que são considerados os parâmetros de projetos da máquina, como o princípio de funcionamento, estrutura e o correto

dimensionamento e seleção dos componentes. Ainda a nível de máquina, o autor inclui os sistemas de controle da máquina, em que considera um fator com grande potencial de redução de consumo ao melhorar a lógica e a interação entre os componentes do equipamento. Além das variáveis citadas, os parâmetros de processo podem representar grande influência no consumo energético a nível de máquina, como a velocidade de processamento que em alguns casos quando aumentada acaba por aumentar o consumo específico de energia. O outro nível apresentado pelo autor é o nível de Planejamento e Controle de Produção (PCP). Este nível tem como objetivo principal avaliar e redistribuir o consumo de energia evitando alto consumo em período de pico e sobretaxas, focando principalmente na eficiência do custo da energia do que na redução do consumo ou na eficiência energética.

Alvandi et al (2015), para estudar o fluxo de materiais e energia, definem a hierarquia estrutural de um sistema de manufatura em quatro níveis. Observando a estrutura do sistema de baixo para cima, os autores identificam o nível de componente, onde observam o recurso produtivo com seus subsistemas necessários para realizar as operações de processamento, como sistema de refrigerações, motores, unidade hidráulica, e unidade pneumática.

O segundo nível é o nível de unidade de processo, ou seja, a nível de máquina, onde são identificados os estados da máquina durante o processamento de uma peça, como Partida, Inicialização, Pré-produção, Pós-produção e Falha. Cada estado possui um consumo de energia determinado e é importante identificar e estratificar este consumo para que seja possível uma avaliação e tomada de decisão quanto à eficiência energética do processamento. Além disso, medindo o consumo específico em cada estado, é possível identificar o uso da energia em estados que não agregam valor, como Pré-produção, onde a peça e as ferramentas estão sendo posicionadas para executar a Produção e Pós-produção, quando a máquina executa movimentos após finalizar a operação em uma peça e continua consumindo energia com seus sistemas auxiliares (ALVANDI et al., 2015).

O terceiro nível corresponde à cadeia de processo, equivalente à linha de produção, em que são avaliados o consumo de energia multimáquinas. Em uma fábrica que produz diversos produtos diferentes, pode-se existir diversas cadeias de processo, uma para cada tipo de produto, com diversas rotas diferentes. Neste nível é possível monitorar a energia direta necessária para produzir uma peça do início ao fim do processo, sendo uma importante ferramenta para medição da energia em uma avaliação de ciclo de vida (ALVANDI et al., 2015).

O quarto nível, nível de fábrica, traz uma abordagem global do consumo de energia pelos sistemas auxiliares da fábrica, as instalações prediais e os outros departamentos que atuam

para manter a fábrica, desde iluminação, ventilação, refrigeração, ar comprimido, sistemas de transporte e o planejamento e controle de produção, que correspondem ao uso indireto da energia para a produção (ALVANDI et al., 2015).

O foco deste trabalho é nos aspectos da eficiência energética ligados à produção, para justificar a integração de um sistema de monitoramento de energia com um MES. Com isto, a abordagem deste estudo foca em monitorar o uso da energia nos níveis produto, máquina e produção contextualizados a seguir.

2.4.1 Nível de produto

Alguns autores consideram o nível de produto observando os aspectos de decisão das rotas na fábrica desde o conceito e design até a conclusão dos processos de fabricação, como parte da hierarquia do sistema de manufatura. Apesar de não ser possível avaliar especificamente o consumo de energia direta derivado dos aspectos do projeto no desenvolvimento do produto, com um monitoramento de energia nas outras camadas é possível estudar alterações no design do produto, em relação à geometria, materiais, processos e acabamentos. Estes aspectos refletem diretamente na seleção dos processos de produção que podem ser monitorados e usados como base para um estudo a nível de conceito e design do produto tendo em vista uma melhor eficiência energética em seu processo produtivo (NEUGEBAUER et al., 2011).

2.4.2 Nível de recurso produtivo

É no nível de recurso produtivo que podem ser avaliados diversos aspectos, como parâmetros de processamento, velocidades, ferramentas, temperaturas, dependendo do tipo de processo (SALONITIS; BALL, 2013).

Segundo Apostolos, Alexios e Georgios (2013), o estudo dos processos permite o entendimento das possíveis transformações energéticas durante a produção.

Apesar do consumo energético proveniente da operação de usinagem em uma máquina CNC corresponder ao maior percentual do uso da energia, o consumo dos sistemas auxiliares torna-se uma fração representativa. Com isto, o tempo de processamento, que está vinculado

aos parâmetros do processo, impacta diretamente no consumo (TAHA et al. (2010). Sendo assim, em alguns casos é mais eficiente usar velocidades maiores para reduzir o tempo de processamento, o que pode resultar em um consumo menor de energia, mesmo que exija uma potência um pouco maior.

Conforme Alvandi et al. (2015), neste mesmo nível, é possível observar os estados do recurso produtivo. Os estados de máquina classificados pelo autores são: *Off* (máquina desligada); *Change over* (máquina em *Setup*); *Ramp Up* (Inicialização da Máquina, provoca um pico de consumo); *Preproduction* (fixação da peça e movimentos de posicionamento da ferramenta); *Production* (máquina em operação); *Postproduction* (máquina ativa após a produção, consumindo energia); *Failure* (máquina parada em manutenção por quebra).

Neste contexto, algumas das ações possíveis para a redução do consumo de energia é o desligamento de componentes quando não necessários, planejamento da produção para evitar que a máquina fique ociosa com os sistemas auxiliares ligados, assim reduzindo o consumo quando estiver fora de produção, deixar a máquina em *Standby* após a produção e o desligamento nos períodos em que não há planejamento de utilização do equipamento (THIEDE; BOGDANSKI; HERRMANN, 2012).

May et al. (2015) apresentam uma caracterização dos estados de energia, ou perfil de potência, de um recurso produtivo, de acordo com seu estado de produção, conforme Quadro 2.1.

Quadro 2.1 - Estados de um recurso produtivo

Estado	Descrição	Potência
Off	Máquina ferramenta está desligada: Não demanda potência	Constante
Desligando (<i>Ramp-Down</i>)	Energia consumida para desligamento	Variável
Espera (<i>Standby</i>)	Máquina tem a maior parte dos componentes desligados e não está pronta para entrar em operação. Apenas alguns componentes demandam potência para reduzir o tempo de ativação.	Constante
Manutenção	Máquina está sendo consertada e precisa de potência para algumas ações específicas.	Constante
Ociosa (<i>Idling</i>)	Máquina não está processando peças, está com todos os seus componentes ativos e prontos para entrar em produção, consumindo energia.	Constante
<i>Setup</i>	Máquina está em setup, em preparação para entrar em produção, trocando ferramenta, etc.	Variável
Ligando (<i>Ramp-Up</i>)	Energia é consumida para iniciar a máquina	Variável
Produção (<i>Processing</i>)	Máquina está produzindo peças	Variável

Fonte: May et al. (2015).

Neste trabalho, para se valer do conceito do sistema MES, foram utilizados os estados de *setup*, correspondente à preparação da máquina, *cutting material*, quando a máquina efetivamente está realizando as operações de produção, *idling*, quando o equipamento está parado em espera por algum motivo, como manutenção, inspeção, aguardando matéria-prima, aguardando operador, e *off*, quando a máquina estiver desligada. Estes são estados de máquina que serão associados aos eventos de produção para a formação de indicadores de eficiência energética.

2.4.3 Nível de linha de produção

O nível de linha de produção ou cadeia de processamento é o nível, em que pode ser avaliada a sequência de processamento, eficiência energética por peça produzida, quantidade de energia utilizada para fabricação de uma peça, distribuição da produção para evitar picos ou qualquer modificação no planejamento da produção com objetivo de reduzir o consumo de energia ou aumentar a eficiência energética (MAY et al., 2015).

Para avaliar o consumo de energia neste nível é necessário levar em consideração as máquinas envolvidas na produção de uma peça, o fluxo de material, que envolve o leiaute da fábrica e os equipamentos de movimentação, como esteira, transportadores, empilhadeiras etc. Outro fator importante é o planejamento da produção que pode organizar e limitar a produção de acordo com os picos dentro dos períodos em que o custo da energia é menor e controlar a demanda de energia utilizando a programação da produção (ALVANDI et al., 2015).

2.4.4 Sistemas de monitoramento de energia elétrica

A energia consumida durante a manufatura se dá por dois fatores, a potência consumida pela máquina durante o processo e o tempo de consumo. Como a potência destes processos não é constante, o cálculo da energia consumida se dá pela integralização da potência no tempo. A potência elétrica (P) é obtida medindo a tensão (V) e a corrente (I) demandada em cada instante (KORDONOWY, 2002).

Com isso, o monitoramento do consumo de energia, é realizado por equipamentos de medição específicos para monitoramento e análise de qualidade de energia. Estes equipamentos

têm a capacidade de realizar medições em intervalos de tempo menores que 1s, registrando os dados em um banco de dados interno, para futura avaliação (DELGADO MONTES, 2012).

2.5 e-KPIS PARA A MANUFATURA

Um indicador de desempenho nada mais é que uma forma de representação de uma medida de desempenho. Os indicadores de performance são apresentados na literatura como ferramentas para quantificar a eficiência e o resultado de uma ação implementada. Com isto, este desempenho é a eficiência e a efetividade da ação em um grau de atendimento às necessidades de um cliente. De maneira geral os indicadores de performance são ferramentas de representação e avaliação das medições de parâmetros utilizados para auxiliar na gestão (FRIEDRICHS, 2013).

Os indicadores de performance na manufatura tradicionalmente levam em consideração critérios relacionados a custo, tempo e qualidade. Porém com o crescimento da preocupação com custos relacionados ao consumo de energia e também o da preocupação com aspectos ambientais do negócio, as empresas têm focado cada vez mais em obter informações relacionadas a eficiência energética, objetivando redução de custos e perdas energéticas e também o impacto ambiental de seus produtos (SCHMIDT et al., 2016).

Patterson (1996) iniciou estudos de aplicação de KPIs para avaliação da eficiência energética com foco em indicadores termodinâmicos e econômicos voltados à aplicação de políticas econômicas.

Kanako Tanaka (2008) aborda os indicadores de eficiência energética focados na indústria, mas ainda com objetivo de discutir suas vantagens e desvantagens em relação ao seu papel relacionado aos modelos políticos.

Bunse et al. (2011) e Lindberg et al. (2015) apresentaram trabalhos focados integrando as métricas de eficiência na gestão da produção com métricas de gestão da energia.

Bunse, Sachs e Vodicka (2010) selecionaram em sua revisão uma série de indicadores de eficiência energética na manufatura e classificaram de acordo com seu tipo e aplicação, conforme Quadro 2.2.

Quadro 2.2 - Indicadores na manufatura

Referência	Indicador	Tipo	Aplicação	Fórmula / Unidade
(PHYLIPSEN; BLOK; WORRELL, 1997)	Intensidade energética	Econômico	Nível agregado	Consumo de energia / Termo econômico
	Consumo de energia específica	Físico	Nível desagregado	GJ / t
(IRREK; THOMAS, 2006)	Intensidade energética	Macroeconômico	Nível agregado	Consumo de energia / Variáveis monetárias (PIB)
	Grau de eficiência	Engenharia	Nível agregado	Energia líquida / Energia primária utilizada
	Melhoria na eficiência energética final	Físico	Nível nacional	Economia anual em energia
(FARLA; BLOK; SCHIPPER, 1997)	Medição em eficiência energética	Econômico	Setor de atividade	Consumo de energia / Valor agregado
	Consumo de energia específica	Físico	Nível de processo	Energia utilizada / unidade física produzida
	Consumo absoluto de energia	Físico	Com indicação de volume de produção	Valor energético
	Taxa de difusão de um equipamento	Físico	Foco na tecnologia de eficiência energética específica	Taxa de implementação da tecnologia
(KANAKO TANAKA, 2008)	Intensidade energética industrial	Físico	Comparação de dados de eficiência em um subsetor	Energia utilizada / Unidade de saída industrial [GJ / t]
(IEA, 2007b)	Consumo de energia específica	Físico	A nível de setor	[GJ / t]
(BOYD; DUTROW; TUNNESSEN, 2008)	Indicador de desempenho energético	Estatístico	Nível de fábrica	Ranking percentual de eficiência energética

Fonte: Bunse, Sachs e Vodicka (2010)

Bunse et al. (2011) destacam que é preciso critérios específicos para realizar comparações em relação a indicadores de eficiência energética a nível internacional comparando diferentes indústrias, setores e empresas, devido à grande variedade de produtos. Não existe um indicador único que pode ser aplicado em todos os casos. É necessário definir o indicador de acordo com o tipo de decisão a ser tomada e à ferramenta a ser aplicada.

Schmidt et al. (2016) citam os seguintes KPIs para consumo de energia, vinculados à manufatura, desenvolvidos para uma indústria na área da saúde: Custo de energia por volume ou massa de bens produzidos e Energia consumida por volume ou massa de bens produzidos.

Como este trabalho é focado no estudo de indicadores para o processo de usinagem, o estudo aprofundado dos indicadores de performance foi realizado apenas para esta família de processo de manufatura.

2.5.1 e-KPIs para usinagem

A energia total em um processo de usinagem é obtida através do monitoramento do equipamento contabilizando a potência utilizada em um determinado intervalo de tempo. Esta

contabilização se dá pela integralização da potência instantânea no intervalo de tempo do processo, conforme Equação (2.10) (LI, 2015).

$$E = \int_{t_1}^{t_2} P_t dt \quad (2.10)$$

A Figura 2.4 apresenta o perfil de potência de um determinado processo, em que os sucessivos patamares de potência correspondem à potência utilizada em cada estado da máquina. O consumo total é obtido através da integralização de consumo de cada estado (SCHUDELEIT et al., 2016).

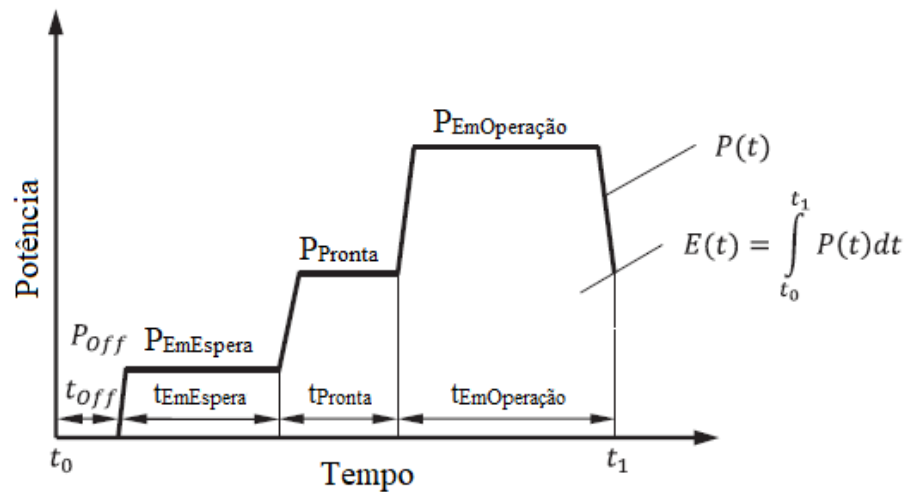


Figura 2.4 - Perfil de potência na usinagem

Fonte: Schudeleit et al. (2016).

Segundo Stock e Seliger (2015), que avaliou o consumo energético de uma máquina ferramenta, a nível de máquina, podem ser observados quatro estados principais, (1) em produção, quando a máquina está executando os ciclos de usinagem para a fabricação de uma peça e (2) ociosa, quando a máquina está ativa e pronta para entrar em operação, com todos seus sistemas prontos para entrar no estado em produção. Além destes dois estados, o equipamento ainda pode estar em *Standby* Em espera (3), quando a máquina está ligada, mas seus sistemas auxiliares estão desativados e não estão prontos para entrarem em produção. O último estado possível é desligado, quando a máquina está totalmente desligada sem a possibilidade de entrar em produção e não aparece no registro de consumo de energia.

Cai et al. (2019) observam que a energia total para a fabricação de uma peça é calculada pelo somatório da energia consumida em cada estado da máquina durante o processo de

fabricação, conforme Equação (2.11). Os estados avaliados pelo autor são: Em Espera (*Stand by*) [sb], Inicialização (*Starting*) [st], Ociosa (*Idling*) [id] e corte de material (*cutting material*) [cm]. O índice n corresponde ao número de vezes que a máquina entrou no estado específico.

$$E_{peça} = \sum_{i=1}^{n_{sb}} E_{sbi} + \sum_{i=1}^{n_{st}} E_{sti} + \sum_{i=1}^{n_{id}} E_{idi} + \sum_{i=1}^{n_{cm}} E_{cmi} \quad (2.11)$$

A Figura 2.5 representa um gráfico de consumo por tempo, em que é possível observar a variação da energia consumida em cada estado. Quando a máquina está em Em Espera, apenas alguns componentes elétricos estão ativos, representando uma baixa demanda de potência. Na Inicialização da máquina os sistemas auxiliares são ativados provocando um pico de demanda e logo estabilizando. O seguinte estado após o pico de inicialização, a máquina está Ociosa, ou seja, está pronta para iniciar o processo, com todos os sistemas auxiliares ativos. O quarto estado apresentado na figura é quando a máquina inicia o processo de corte de material, é este o ponto de maior consumo e é o tempo em que se está efetivamente gerando valor agregado à peça.

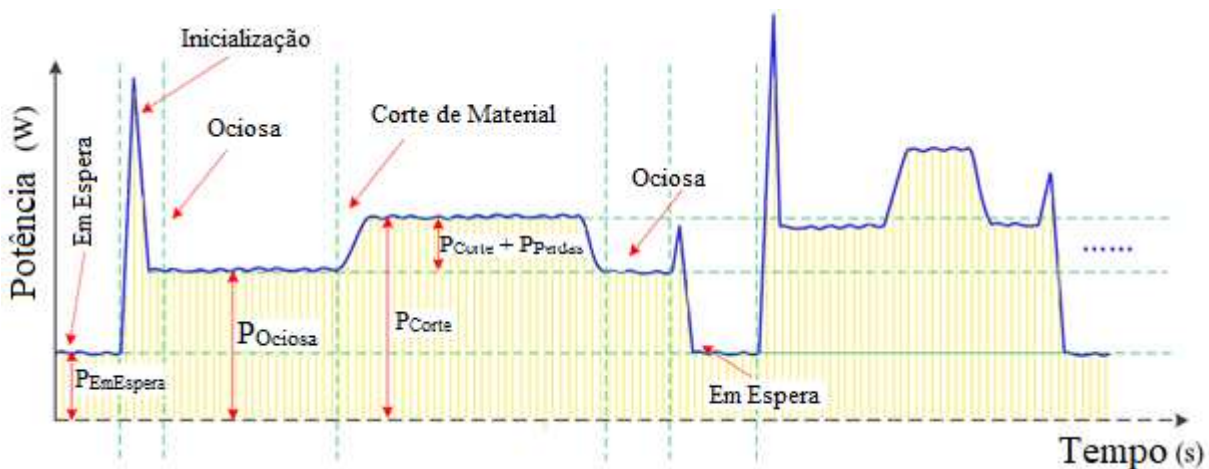


Figura 2.5 - Consumo de energia nos estados da máquina

Fonte: Cai et al. (2017)

Wang, Liu e Li (2013) apresentaram em seu trabalho um método de avaliação do uso da energia na usinagem, em que definem dois tipos de índices para avaliação do consumo no processo. O primeiro índice é o de eficiência energética instantânea, este índice leva em consideração os dados de consumo em tempo real, ou num exato momento, e é calculado pela potência efetiva usada para realizar o processo pela potência total usada pela máquina. Um exemplo deste indicador é apresentado na Equação (2.12).

$$n(t) = \frac{P_c(t)}{P_t(t)} \quad (2.12)$$

Onde:

$n(t)$ é a eficiência no instante t .

$P_c(t)$ é a potência efetiva ou potência de corte no instante t .

$P_t(t)$ é a potência total no instante t .

O segundo índice apresentado por Wang, Liu e Li (2013) é o de eficiência energética por processo. Este índice possui duas definições distintas, uma que leva em consideração a energia efetiva dentro de um processo e a outra que leva em consideração o produto gerado pelo processo. Ambos os casos avaliaram o consumo de energia total em um determinado intervalo de tempo (t). A Equação (2.13) apresenta a eficiência em um processo pela razão entre a energia efetiva, que é a integralização da potência efetiva em um intervalo de tempo pela energia total consumida, que é a integralização da potência total consumida no mesmo intervalo.

$$Ef = \frac{E_c}{E_t} = \frac{\int_0^T P_c(t) dt}{\int_0^T P_t(t) dt} \quad (2.13)$$

Onde:

Ef é a eficiência do processo no intervalo de tempo T .

E_c é a energia de corte efetiva.

E_t é a energia total do processo.

$P_c(t)$ é a potência efetiva ou potência de corte no instante t .

$P_t(t)$ é a potência total no instante t .

T é o tempo de processo.

A definição da eficiência energética do processo pelo produto gerado leva em consideração o MRV. Esta definição de eficiência energética é conhecida como SEC, energia específica consumida. O SEC corresponde à energia consumida para se remover 1 cm³ de material durante a usinagem, já que o produto da usinagem é a remoção de material, conforme Equação (2.14).

$$SEC = \frac{E}{Qp} \left[\frac{J}{cm^3} \right] \quad (2.14)$$

Onde:

SEC é a energia específica consumida.

$E =$ Energia consumida é a energia total do processo.

$Qp =$ Produto produzido é a unidade física ou econômica produzida, podendo ser em número de peças, quantidade de massa ou volume em produto produzido. No caso da usinagem o SEC é calculado pelo volume de material removido.

A SEC também pode ser calculada utilizando MRR. Com isto, a Equação (2.15) exemplifica a correlação com equação anterior (ANDBERG; BENO; PEJRYD, 2012)

$$SEC = \frac{Et}{MRV} \left[\frac{energia}{volume} \right] = \frac{Pt}{MRR} \left[\frac{potencia}{\frac{volume}{tempo}} \right] \text{ ou } \left[\frac{energia}{tempo} \div \frac{volume}{tempo} \right] \quad (2.15)$$

Wang, Liu e Li (2013) também utilizaram níveis hierárquicos em seu estudo e definiram indicadores específicos para cada um dos quatro níveis: Nível de máquina (processo), Nível de unidade produtiva (linha de produção), Nível de tarefa (operações de usinagem) e Nível de sistema de manufatura (Fabril). Para o nível de máquina ou de processo os autores apresentam quatro indicadores:

- a) Energia específica de remoção de material (SEC_{rm}), conforme Equação (2.16), que é utilizada para avaliar a energia específica empregada para o corte de material.

$$SEC_{rm} = \frac{E_c}{MRV} \quad (2.16)$$

Onde E_c é a energia de remoção de material, ou seja, a energia empregada apenas na remoção do material, não considerando a energia consumida pelos sistemas auxiliares da máquina. Esta energia é obtida pela potência de corte que é o produto da força de corte (F_c) e da velocidade de corte (V_c).

- b) Energia efetiva de remoção de material (Ef_{rm}), conforme Equação (2.17), é o indicador que representa a eficiência energética da máquina em relação à energia efetivamente empregada para agregar valor ao produto. Um uso deste indicador seria em uma comparação entre uma máquina ferramenta convencional com uma máquina controlada

por Comando Numérico Computadorizado (CNC). As máquinas CNC possuem sistemas de automação mais complexos que demandam potência sem que a máquina esteja removendo material, como mostrado na Figura 2.6. É possível observar que estes sistemas correspondem a 85,2% da energia demandada pela máquina estudada e apenas 14,8% de energia é consumida para remover material. Com isso, a tendência é que a máquina convencional apresente uma energia total de consumo menor que a máquina CNC. Com isto, se a energia de remoção de material for igual em ambas as máquinas, este indicador favorece a máquina convencional que será mais eficiente no uso da energia.

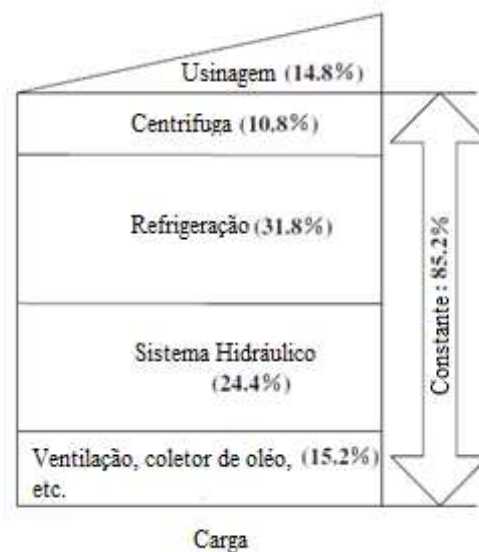


Figura 2.6 - Diagrama de consumo de uma máquina CNC

Fonte: Wang, Liu e Li (2013)

$$E_{frm} = \frac{E_c}{E_{maq}} \quad (2.17)$$

Onde E_{maq} é energia consumida pela máquina incluindo todos os estados durante o processamento da peça.

- c) Energia efetiva de usinagem (E_{fm}), conforme Equação (2.18), é o indicador que avalia a eficiência energética da máquina apenas durante o processamento. Diferente da E_{frm} , este indicador considera todos os sistemas auxiliares da máquina, ou seja, toda a energia consumida pela máquina enquanto ocorre a usinagem.

$$E_{fm} = \frac{E_m}{E_{maq}} \quad (2.18)$$

Onde E_m é a energia total consumida pela máquina durante o corte, considerando todos os sistemas da máquina, também chamada de energia de usinagem.

- d) Energia específica da máquina (SEC_{maq}), conforme Equação (2.19), é o indicador que representa a intensidade energética do processo, ou seja, dá subsídios para tomada de decisões na melhoria do processo para aumentar a eficiência energética.

$$SEC_{maq} = \frac{E_{maq}}{MRV} \quad (2.19)$$

O próximo nível apresentado por Wang, Liu e Li (2013), Nível de unidade de manufatura (linha de produção), é composto pelos três indicadores que seguem:

- a) Energia efetiva de remoção de material na unidade de manufatura ($Ef_{rm}U$), conforme Equação (2.20), que se compara ao segundo indicador do nível de máquina, no entanto considera a energia de todas as máquinas da unidade produtiva em que a peça foi processada.

$$Ef_{rm}U = \frac{\sum E_{cU}}{\sum E_{maqU}} \quad (2.20)$$

Onde $\sum E_{cU}$ é o somatório da energia de corte para fabricação da peça, considerando todas as máquinas na unidade de manufatura e $\sum E_{maqU}$ é o somatório da energia consumida em todas as máquinas e os sistemas de transportes usados durante o processamento da peça na unidade de manufatura.

- b) Energia efetiva de usinagem na unidade de manufatura (Ef_mU), conforme Equação (2.21), que se compara ao terceiro indicador do nível de máquina, no entanto considera a energia de todas as máquinas da unidade produtiva em que a peça foi processada.

$$Ef_mU = \frac{\sum E_{mU}}{\sum E_{maqU}} \quad (2.21)$$

Onde $\sum E_{mU}$ é a energia consumida pelas máquinas da unidade de manufatura durante o corte na unidade de manufatura.

- c) Energia específica das máquinas na unidade de manufatura ($SEC_{maq}U$), conforme Equação (2.22), que se compara ao quarto indicador do nível de máquina, no entanto

considera a energia de todas as máquinas da unidade produtiva em que a peça foi processada.

$$SEC_{maqU} = \frac{\sum E_{maqU}}{\sum MRV_U} \quad (2.22)$$

Na sequência, Wang, Liu e Li (2013) apresentam os quatro indicadores do Nível de tarefa (operações de usinagem) que se equivalem aos quatro indicadores do nível de máquina, porém apenas contabilizando os valores relativos às tarefas executadas. O autor considera uma tarefa uma operação que pode ser executada em mais de uma máquina, como exemplo de tarefa é possível usar uma peça que precisa passar por operações de torneamento e depois de fresamento. Neste contexto, os autores classificam a atividade de torneiar a peça como uma tarefa e a atividade de fresar a peça como uma segunda tarefa. Ainda dentro de uma tarefa, de torneamento por exemplo, pode haver a necessidade de operações em máquinas diferentes, como faceamento em uma máquina e desbaste do perfil cilíndrico em outra máquina, dependendo do planejamento da produção. Com isto, todos os dados da tarefa, envolvendo todas as máquinas utilizadas e os sistemas de transporte dentro da fábrica que foram utilizados para mover a peça de um equipamento a outro devem ser contabilizados. Os quatro indicadores relacionados às tarefas estão listados abaixo:

- a) Energia específica de remoção de material para uma tarefa (SEC_{rmT}), conforme Equação (2.23).

$$SEC_{rmT} = \frac{\sum E_{cT}}{\sum MRV_T} \quad (2.23)$$

Onde $\sum E_{cT}$ é o somatório da energia de remoção de material de toda a tarefa e $\sum MRV_T$ é o somatório do volume de material removido em toda a tarefa.

- b) Energia efetiva de remoção de material na tarefa (Ef_{rm}), conforme Equação (2.24).

$$Ef_{rm} = \frac{E_{cT}}{E_T} \quad (2.24)$$

Onde E_T é a energia consumida na tarefa, por todas as máquinas e sistema de transportes envolvidos na tarefa.

- c) Energia efetiva de usinagem na tarefa, conforme Equação (2.25)

$$Ef_m = \frac{E_{mT}}{E_T} \quad (2.25)$$

Onde E_{mT} é a energia consumida pelas máquinas durante o corte para a tarefa.

d) Energia específica da tarefa (SEC_T), conforme Equação (2.26)

$$SEC_T = \frac{E_T}{MRV_T} \quad (2.26)$$

O quarto nível apresentado por Wang, Liu e Li (2013), é o Nível de sistema de manufatura (Unidade fabril), em que os autores avaliam o consumo de energia de forma global, pela fábrica e seus sistemas auxiliares, comparando com a energia consumida pelas máquinas e também os picos de consumo, conforme indicadores a seguir:

a) Energia efetiva na fábrica (EfF), conforme Equação (2.27)

$$EfF = \frac{E_{maqF}}{E_F} \quad (2.27)$$

Onde E_{maqF} é a energia consumida pelas máquinas na fábrica e E_F é a energia consumida na fábrica, incluindo equipamentos auxiliares, como iluminação, ar condicionado, sistema de ar comprimido.

b) Fator de carga na energia elétrica (Fc), conforme Equação (2.28).

$$Fc = \frac{kW_{médio}}{P_{max}} \quad (2.28)$$

Onde $kW_{médio}$ é a carga média e kW no período de cobrança e P_{max} é a carga máxima de demanda de pico.

May et al. (2015) relacionam os indicadores de eficiência energética na manufatura com os estados das máquinas operatrizes e os eventos de produção e consideram que são fundamentais para a tomada de decisão na gestão da energia no ponto de vista da gestão da produção. Primeiramente os autores estratificaram sete níveis de energia dentro da produção, de acordo com as definições de gestão da produção, conforme detalhamento a seguir das energias E0 a E6 e apresentadas graficamente na Figura 2.7:

E0 = Consumo de energia com valor agregado, é a energia consumida para fabricar peças boas ou peças que podem efetivamente ser vendidas.

E1 = Energia de produção líquida, é a energia para fabricar todas as peças tanto boas, quanto refugadas e energia utilizada em retrabalho.

E2 = Energia de produção bruta, é a energia empregada na produção, incluindo o setup, pequenas paradas e manutenção preventiva (pequenos ajustes).

E3 = Energia utilizada líquida, é a energia utilizada na produção, somando a energia em manutenção corretiva (não programada).

E4 = Energia utilizada bruta, é a energia consumida na produção sem descontar paradas, ociosidade planejada, manutenção planejada.

E5 = Energia em aberto, além das energias anteriores, E5 soma a energia consumida nos períodos em que a máquina está ociosa por falta de matéria-prima ou ordens de produção e quando está em teste ou produzindo amostras.

E6 = Energia em tempo teórico de produção, soma a energias citadas anteriormente com a energia máquina Em Espera ou ociosa durante os períodos de preparação após uma pausa mais longa na produção, como início do dia, pós-férias ou pós-feriados, quando é necessário um tempo maior para iniciar o ciclo produtivo na fábrica.

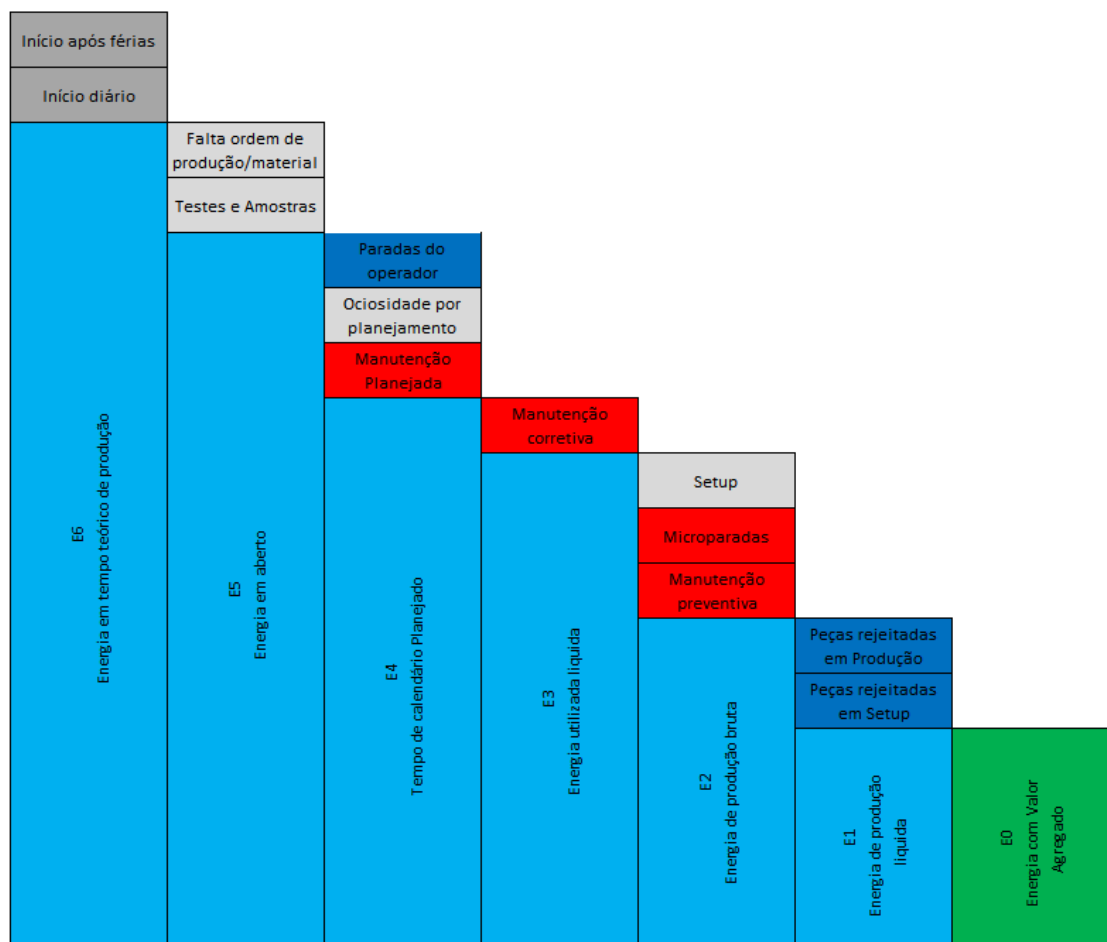


Figura 2.7 - Diagrama de energia na produção

Fonte: Adaptado de May et al. (2015)

Alguns dos indicadores citados pelo trabalho de May et al. (2015) e apresentados na Figura 2.7 são:

- a) Indicador de Energia *Lean*, conforme Equação (2.29), é basicamente a eficiência energética levando-se em conta o planejamento da produção. O objetivo é ter este valor mais próximo de 1, quando o máximo da energia total utilizada é empregado para produção de peças que podem ser vendidas. É este indicador que apresenta as perdas de energia no processo como um todo.

$$Energia\ Lean = \frac{E0}{E6} \quad (2.29)$$

- b) Energia na Qualidade, conforme Equação (2.30), apresenta a eficiência energética em relação à qualidade da produção, ou seja, é a razão da energia utilizada para fabricar peças boas pela energia utilizada para fabricar todas as peças.

$$E_{Qualidade} = \frac{E0}{E1} \quad (2.30)$$

- c) Energia na Disponibilidade, conforme (2.31), relaciona a energia utilizada pela máquina enquanto ela estava disponível para a produção com a energia acumulada da disponibilidade, que assume todo o período de calendário em que a máquina deveria estar disponível para produção. Este indicador apresenta o resultado de quanto da energia utilizada pela máquina foi realmente usada pela equipe de produção e quanto foi usada por outras equipes, como manutenção (corretiva), por exemplo.

$$E_{Disp} = \frac{E2}{E3} \quad (2.31)$$

- d) Uso de Energia, conforme Equação (2.32), apresenta o resultado do uso da energia como um todo, não apenas pelos estados da máquina. Este indicador aponta perdas por planejamento inadequado ou teste e produção de amostras (atividades que não geram resultado financeiro para a empresa).

$$E_{Disp} = \frac{E3}{E5} \quad (2.32)$$

Os indicadores a nível de dispositivo não serão estudados neste trabalho, pois as possíveis ações a serem tomadas para melhoria de eficiência energética não são importantes diretamente ao sistema de manufatura, mas sim para o fabricante da máquina. Poucas ações podem ser tomadas neste nível, do ponto de vista do usuário.

2.6 KPIs NA GESTÃO DA PRODUÇÃO

Para se manterem competitivas, as empresas monitoram continuamente seus processos em busca de melhor eficiência e produtividade. Na perspectiva da gestão da produção na manufatura, esta eficiência se dá pelo melhor aproveitamento dos recursos produtivos, ou seja, aumentar o tempo de uso das máquinas para gerarem valor agregado e reduzindo perdas, medidas em unidade de tempo, com atividades que não geram valor agregado. Existem diversos indicadores dentro deste campo de estudo, contudo um indicador que se destaca é o OEE (TSAROUHAS, 2019).

2.6.1 OEE - Eficácia Global do Equipamento

O OEE é um indicador largamente utilizado na indústria, por apresentar uma avaliação completa dos dados de produção derivados de três outros indicadores: Disponibilidade, Desempenho e Qualidade. Este indicador surgiu com a filosofia *Total Productive Maintenance* ou (TPM), desenvolvida por Seiichi Nakajima no final dos anos oitenta, com o objetivo de reduzir as perdas na manufatura (YATOLLAHI et al., 2013).

Dentro do TPM, são classificadas seis grandes perdas que afetam a produtividade da produção e estas perdas estão vinculadas aos três indicadores que dão origem ao OEE, conforme, Quadro 2.3.

Quadro 2.3 - Seis grandes perdas

<i>Tipo de perda</i>	<i>Grupo</i>	<i>Indicador</i>
Quebra de equipamento	Perdas por inatividade	Disponibilidade
Setup		
Microparadas	Perdas por velocidade	Desempenho
Velocidade reduzida		
Defeitos (peças rejeitadas) e retrabalho	Perdas por qualidade	Qualidade
Início de produção		

Fonte: Adaptado de Singh et al. (2013)

Estes três grupos de perdas destacados no Quadro 2.3 descontam tempo útil de produção da máquina, conforme Figura 2.8. Ou seja, o tempo total de disponibilidade da máquina, que é equivalente ao turno de trabalho da máquina, tem descontados em escala os tempos relativos às seis grandes perdas (BARLETTA et al., 2014).

O OEE, Equação (2.36), é calculado com base nestes tempos de perdas relativos aos indicadores de Disponibilidade Equação (2.33), Desempenho Equação (2.34) e Qualidade Equação (2.35) (ANDERSSON; BELLGRAN, 2015).

$$\text{Disponibilidade (A)} = \frac{\text{Tempo em operação}}{\text{Tempo de Carga}} \quad (2.33)$$

$$\text{Desempenho (P)} = \frac{\text{Tempo efetivo de operação (Planejado)}}{\text{Tempo em operação (Realizado)}} \quad (2.34)$$

$$\text{Qualidade (Q)} = \frac{\text{Peças Boas}}{\text{Total de peças (Boas + Ruins)}} \quad (2.35)$$

$$\text{OEE} = A \times P \times Q \quad (2.36)$$

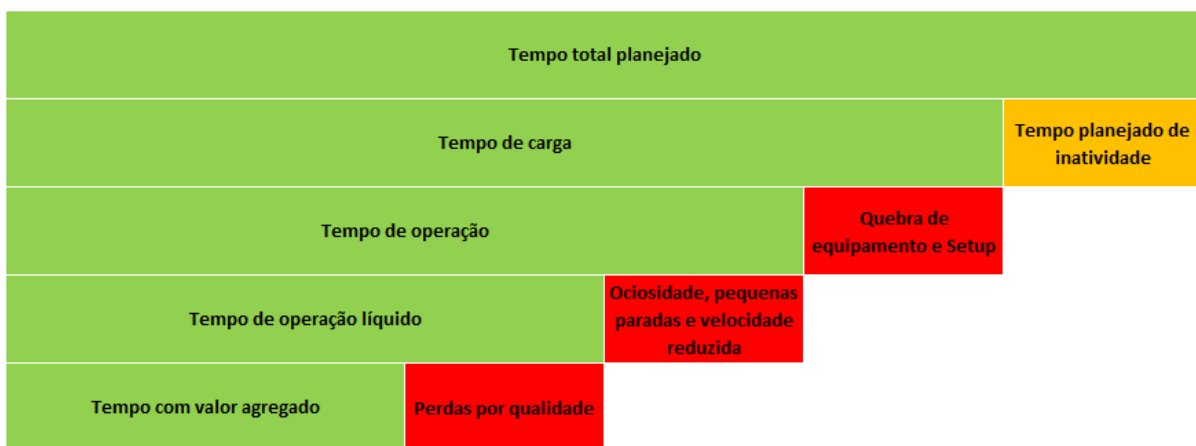


Figura 2.8 - Diagrama de tempos na produção

Fonte: Adaptado de Andersson e Bellgran (2015).

2.6.2 OEE Classe Mundial

O indicador de OEE é um dos mais importantes indicadores de produtividade na indústria, pois é o indicador principal para o TPM. Este indicador apresenta uma fotografia

muito próxima da realidade no ambiente de produção e pequenas melhorias neste índice trazem grandes benefícios às empresas (KRZYSZTOF, 2018).

O nível de OEE referência para o sucesso na implantação de um sistema TPM é de 85%, sendo uma disponibilidade de 90%, uma eficiência de 95% e qualidade de 99%. Um OEE entre 85% e 92% é considerado um índice de Classe Mundial (IANNONE; NENNI, 2013).

2.6.3 O papel do MES no monitoramento da produção

MES é uma classe de sistema informatizado empregado para integrar os sistemas de gestão da empresa como um *Manufacturing Resource Planning* (MRP II), por exemplo, com as atividades efetivamente executadas no chão de fábrica. O MES tem a capacidade de monitorar os eventos da produção desde a criação da ordem de produção até o apontamento do produto acabado no ERP (SOPLOP et al., 2009).

Apesar de cada fornecedor ter uma lista diferente de funcionalidades, a *Manufacturing Enterprise Solutions Association* (MESA), elencou onze categorias de funcionalidades que um sistema MES poderia atender, conforme apresentado na Figura 2.9 (UGARTE; ARTIBA; PELLERIN, 2009).

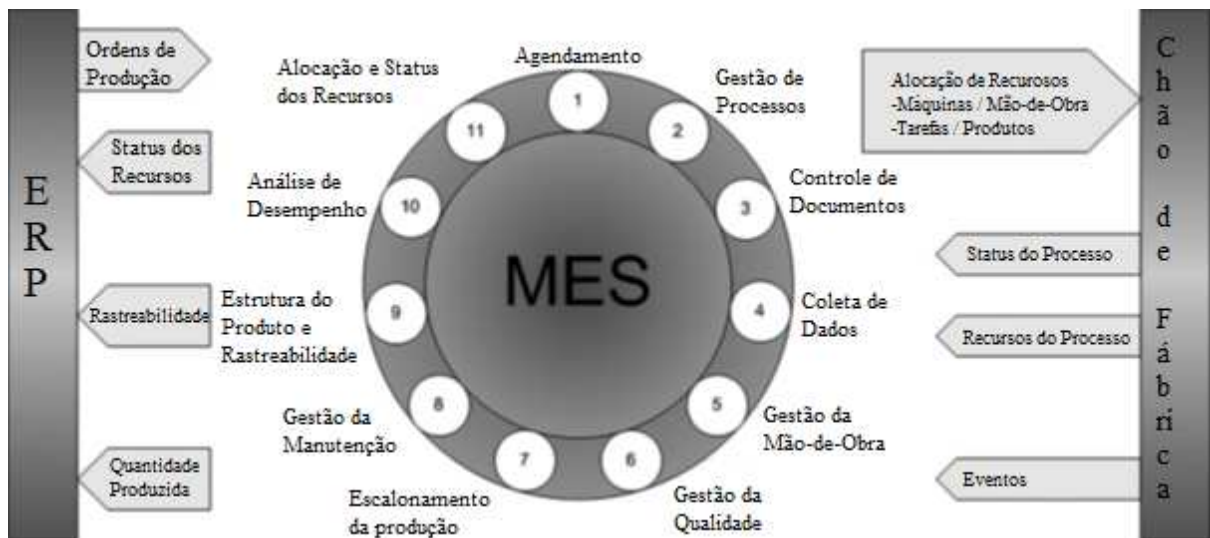


Figura 2.9 - Diagrama de um sistema MES

Fonte: Ugarte; Artiba; Pellerin (2009).

As onze funcionalidades previstas por MESA (1997) estão listadas a seguir, juntamente com suas respectivas definições:

- a) Indicar estado e alocação de recursos: Indicar qual atividade cada pessoal, máquina, ferramenta e material deve executar, rastreando o que efetivamente está sendo executado e o que já está feito.
- b) Distribuir ordens de produção: Enviar ordens de produção e materiais para certas partes da fábrica para iniciar o processo ou uma operação.
- c) Controle de documentos: Gerenciar e distribuir informações dos produtos, processos, projetos e ordens de produção.
- d) Rastreabilidade de produto: Monitorar o andamento da produção de peças, lotes ou qualquer que seja o produto em fabricação registrando todo o histórico de processamento do produto, como a máquina em que foi produzido, operador, datas e tempos.
- e) Análise de desempenho: Comparar os resultados medidos na planta com as metas e métricas definidas pela empresa, e partes envolvidas.
- f) Gestão da mão-de-obra: Rastrear e direcionar o uso dos recursos humanos durante o turno de trabalho, de acordo com as habilidades, padrões de trabalho e necessidades do negócio.
- g) Gestão da manutenção: Planejar e executar atividades para manter os equipamentos e recursos da fábrica em condições de operação.
- h) Gestão de processos: Controlar o fluxo de trabalho da fábrica baseado no planejamento e nas atividades que estão realmente sendo executadas.
- i) Gestão da qualidade: Registrar, rastrear e analisar produtos e características de processos de acordo com os padrões definidos pela engenharia.
- j) Coleta de dados: Monitorar, compilar e organizar os dados dos processos, materiais e operações das pessoas, máquinas e recursos.

Por ter a característica de centralizar diversas informações do chão de fábrica, o MES se mostra uma ferramenta adequada para ser integrada com um sistema de monitoramento de energia, permitindo um cruzamento de dados para a formação de indicadores que relacionam

os dados de energia com os dados relativos aos produtos e recursos produtivos do chão de fábrica (SOPLOP et al., 2009).

Na Quadro 2.4 são mostradas algumas informações de produto, processo e máquinas contidas na base de dados do MES que podem ser utilizadas para formar alguns indicadores de desempenho de energia.

Quadro 2.4 - Funções do MES e possíveis indicadores de energia

Funções do MES	Informação	Indicador de energia
Distribuir ordens de produção Rastreabilidade de produto	Dados do Item (Peça), Dados das máquinas, sequência de operações,	SEC por máquina SEC total da fabricação da peça Energia consumida por operação Energia direta total
Distribuir ordens de produção Rastreabilidade de produto Análise de desempenho Coleta de dados	Dados do Item (Peça), Dados das máquinas, sequência de operações, quantidade planejada, quantidade de peças boas, quantidade de peças ruins Estados de máquina e tempos	Energia na Qualidade
Distribuir ordens de produção Rastreabilidade de produto Análise de desempenho Coleta de dados	Dados do Item (Peça), Dados das máquinas, sequência de operações, Estados de máquina e tempos	Energia no Desempenho Energia na Disponibilidade OEE de energia
Análise de desempenho Coleta de dados	Consumo de energia das máquinas x Linha do tempo	Picos de energia na fábrica

Fonte: Elaborado pelo autor

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta informações sobre os materiais e equipamentos que foram utilizados e a metodologia proposta para atingir os objetivos apresentados.

3.1 MATERIAIS

O material utilizado para as amostras a serem usinadas foi o aço carbono resulfurado Aço SAE 1213 trefilado (DIN 11sMn30). Foi selecionado este material, pois apresenta boa usinabilidade, ótimo acabamento superficial e baixo desgaste de ferramentas, também é utilizado na fabricação de eixos e engrenagens (ARAVIND et al., 2017). A composição química desta matéria-prima é constituída por até 0,14% de Carbono, até 0,05% de Silício, Manganês entre 0,9% e 1,3%, até 0,11% de Fósforo e Enxofre entre 0,27% e 0,33% (FAVORIT AÇOS ESPECIAIS, 2019).

3.2 MÉTODOS

Para realização deste trabalho a metodologia foi dividida em 5 etapas básicas:

- Etapa 1: Selecionar indicadores de eficiência energética;
- Etapa 2: Caso de estudo experimental
- Etapa 3: Compilação dos resultados – Nível de Produto e Nível de Processo;
- Etapa 4: Compilação dos resultados – Nível de Produção;

A Figura 3.1 mostra um fluxograma resumido que sintetiza as etapas realizadas neste trabalho e detalhadas nos itens subsequentes.

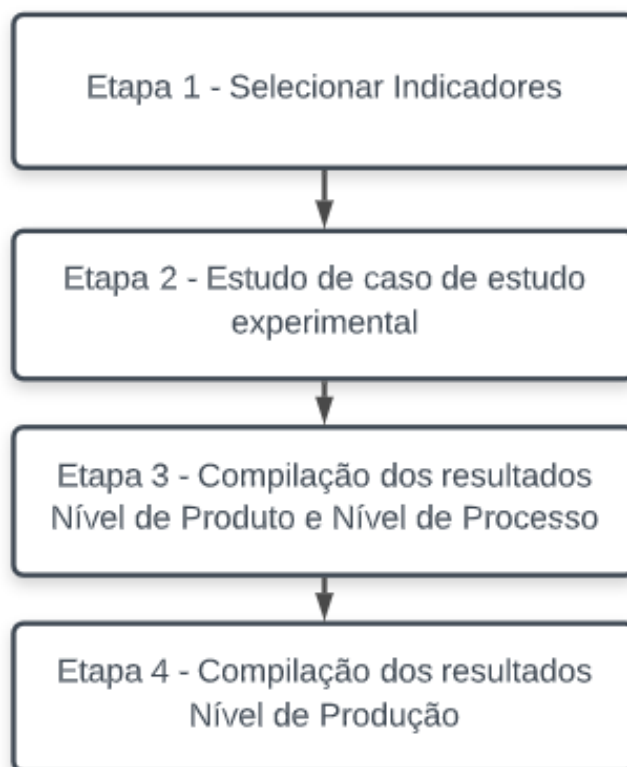


Figura 3.1 - Fluxograma da metodologia

Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.1 Etapa 1 - Selecionar indicadores de eficiência energética

Com base na fundamentação teórica foram definidos indicadores de eficiência energética que podem ser utilizados na integração de um sistema de monitoramento de produção com um sistema de monitoramento de energia elétrica. Os e-KPIs são fundamentais para a avaliação dos dados de monitoramento e variam para diferentes processos produtivos.

A seleção dos indicadores foi baseada no método proposto por Kibira et al. (2017), que consiste nos cinco passos listados a seguir: Definição das finalidades com o KPI, Identificação do KPI, Definição do KPI, Seleção e Composição. Neste trabalho foram utilizados os quatro primeiros passos, excluindo a etapa de Composição, conforme Figura 3.2.

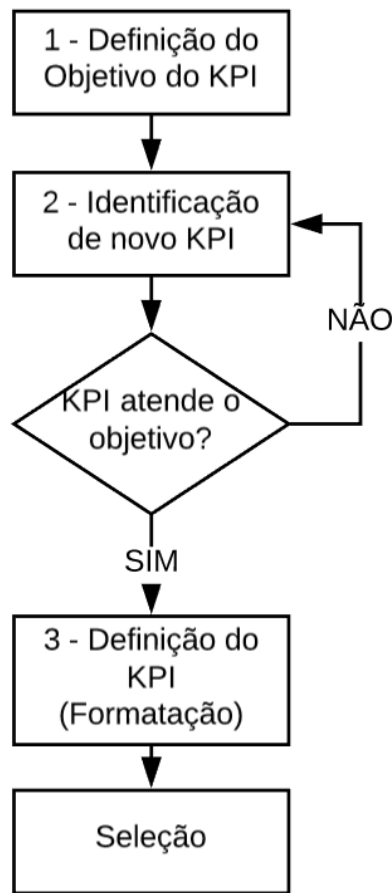


Figura 3.2 - Seleção dos e-KPIs

Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme o método de referência, o primeiro passo para selecionar um KPI é a definição das finalidades (objetivos estratégicos) que o indicador deve atender. A finalidade é formada pela avaliação das necessidades em relação aos processos de manufatura. As finalidades podem ser as mais variadas e devem estar relacionadas com os objetivos estratégicos das empresas ou instituições que o aplicarão. No contexto do uso da energia elétrica na manufatura, as possibilidades de indicadores são diversas e variam com os processos produtivos e por esta razão as finalidades são importantes, para servirem como um guia para a seleção de indicadores. Para esse trabalho, foram escolhidas as finalidades apresentadas no Quadro 3.1, na busca de abranger todos os níveis estudados com as variáveis que foram mensuradas (COSTA, 2016).

Quadro 3.1 - Finalidades dos indicadores

Nível	Finalidade
Produto	Conhecer o custo energético do produto
	Melhorar a eficiência energética do processo a nível de produto
Processo	Obter dados para Benchmarking interno da eficiência energética entre máquinas
	Obter dados para Benchmarking interno da eficiência energética entre diferentes peças de diferentes geometrias
Produção	Tornar visível perdas e desperdício energético relacionados aos eventos da produção
	Ter visão do resultado global da energia em relação à produção

Fonte: Elaborado pelo autor

O segundo passo, identificação do KPI, é uma avaliação dos indicadores estudados no referencial teórico. Estes indicadores foram avaliados, no sentido de se determinar se atendiam as finalidades acima e, uma vez que tenha sido confirmado, foram caracterizados e detalhados no terceiro passo, quando ocorreu o preenchimento do cartão de KPI, conforme Quadro 3.2.

Quadro 3.2 - Cartão do e-KPI

DESCRIÇÃO DO e-KPI	
Conteúdo:	
Nome:	
ID:	
Descrição:	
Escopo:	
Fórmula:	
Unidade de medida:	
Amplitude	Min: Máx:
Tendência	
Contexto:	
Frequência:	
Público Alvo:	
Método de Produção	
Anotações:	

Fonte: Elaborado pelo autor

O quarto passo foi a seleção, ou aprovação do KPI no rol de indicadores que foram estudados.

3.2.2 Etapa 2 – Caso de estudo experimental

Para produzir dados de consumo de energia e alimentar os indicadores estudados para a validação, foi montado um experimento de monitoramento de energia na usinagem de peças cilíndricas com a operação de torneamento. O experimento foi montado de acordo com o método DOE (*Design of Experiments*) de Taguchi, utilizando a matriz L9.

Nove amostras tiveram suas condições de corte variadas de acordo com o método DOE de Taguchi, ou seja, as amostras possuem diferentes combinações de avanço, profundidade de corte e velocidade de corte, sendo definidas três possibilidades de valor para cada variável e suas combinações foram definidas de acordo com a matriz L9. Na metodologia de Taguchi, para experimentos com três fatores e três níveis, é utilizada a matriz L9, ou seja, uma matriz 3 x 3 com a distribuição das variáveis de acordo com a Quadro 3.3.

Quadro 3.3 - Distribuição dos fatores na matriz L9

Amostra	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

Fonte: Elaborado pelo autor

A metodologia de Taguchi é uma ferramenta de DOE muito utilizada na melhoria e otimização de processos na indústria e sua característica principal é a identificação de ruídos, ou seja, variáveis e parâmetros que não influenciam na variabilidade dos resultados do processo (KARNA; SAHAI, 2012). Aplicar um método experimental tradicional, utilizando todas as variações possíveis para 3 fatores e 3 níveis resultaria em 27 combinações diferentes de amostras. Desta forma, foi escolhido um método de planejamento experimental para reduzir o número de amostras a serem ensaiadas e obter o parâmetro de corte que mais influenciou na redução do consumo de energia para a usinagem (NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2001). Conforme Khare, Agarwal e Srivastava (2018), cada variável avaliada é um fator e este pode

ser estudado em diversos níveis. Neste estudo de caso foram estudados três fatores e três níveis, conforme Quadro 3.4.

Quadro 3.4 - Variáveis da etapa experimental

Fator	Unidade	Fator	Nível		
			1	2	3
Avanço (fn)	mm/rot	A	0,1	0,2	0,3
Profundidade de Corte (Ap)	mm	B	0,4	0,8	1,2
Velocidade de Corte (Vc)	m/min	C	350	375	400

Fonte: Elaborado pelo autor

O estudo de caso experimental foi realizado em um torno CNC, onde foi executada a usinagem de nove amostras com condições de corte diferentes. As amostras foram realizadas em duplicata e os dados de energia de cada corpo de prova foram monitorados com o analisador portátil de qualidade da energia.

Os recursos utilizados nesta etapa do trabalho foram:

- a) Máquina operatriz: Mazak Quick Turn 10 comando numérico Mazatrol 640T;
- b) Ferramenta (Inserto): WNMG 06 04 04-PF, classe 4015, para aço carbono;
- c) Peça de diâmetro de 1 ½” (38,1mm) e comprimento de 150mm no material Aço SAE 1213 trefilado (DIN 11SMn30);
- d) Analisador Portátil de Qualidade da Energia PowerNET PQ-700 G4;
- e) Relógio e cronômetro;
- f) Software de planilhas (MS Excel).

Para o monitoramento e registro do consumo da energia, foi utilizado o Analisador Portátil de Qualidade da Energia PowerNET PQ-700 G4, fabricado pela IMS Soluções em Energia Ltda. Este equipamento tem capacidade de realizar medições em intervalos a partir de 200ms, o que é importante para o registro preciso do perfil de consumo dos experimentos. O analisador de Qualidade da Energia foi instalado com sensor de tensão e corrente individuais para cada fase de alimentação da máquina, como apresenta a Figura 3.3, obtendo informações

diretas de medição de corrente e tensão para efetuar o cálculo das potências e o consumo instantâneo. Estes dados foram disponibilizados em aplicativo específico onde os dados foram extraídos e avaliados em gráficos e tabelas (IMS SOLUÇÕES EM ENERGIA, 2016).

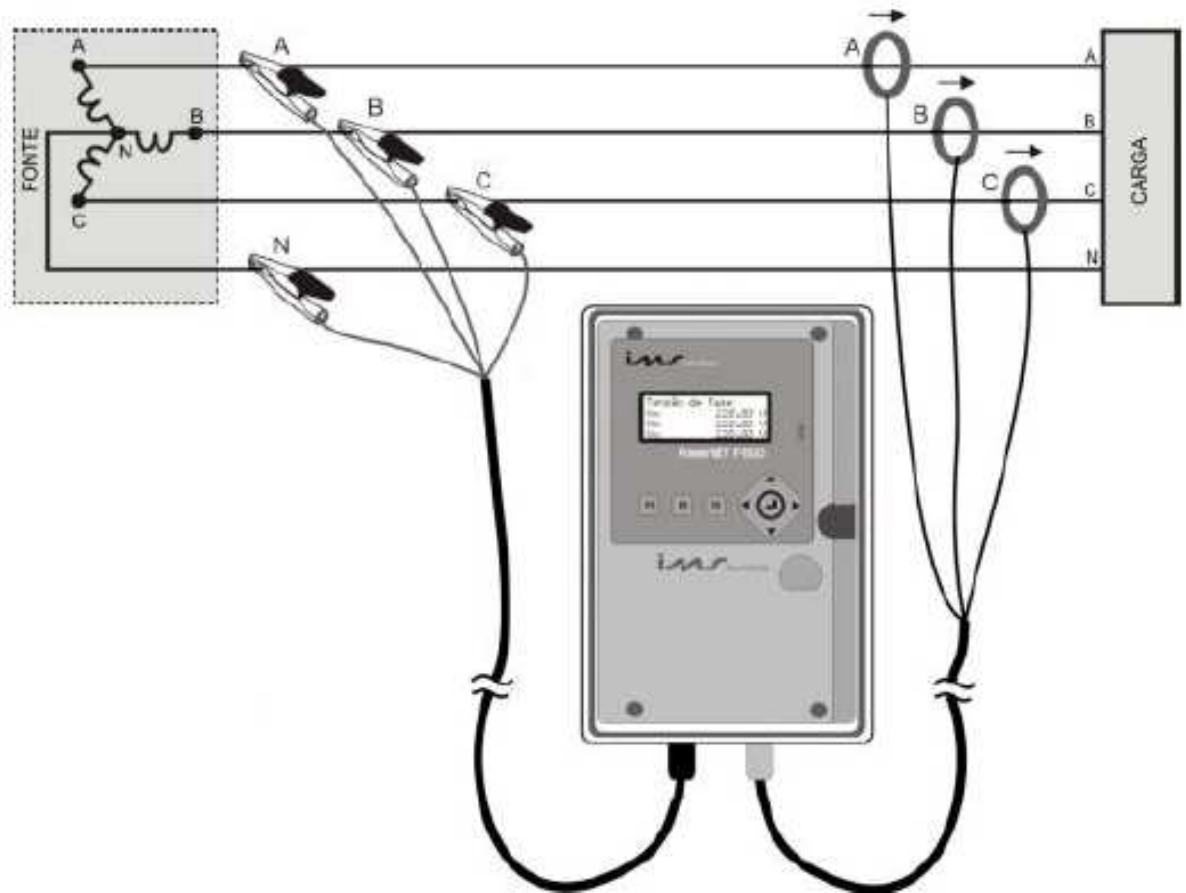


Figura 3.3 - Sistema de monitoramento de energia

Fonte: IMS Soluções em Energia (2014).

Os dados de energia foram registrados no analisador de energia e posteriormente exportados em uma planilha. Os eventos de início e fim do ciclo de usinagem foram registrados manualmente com auxílio de um relógio e cronômetro para que fosse possível separar os dados unicamente da usinagem nas planilhas do analisador de energia.

A seleção dos valores para os três níveis destes três fatores foi baseada na recomendação do fabricante da ferramenta. O fator A (f_n) tem recomendação de uso entre os valores de 0,07 e 0,3 mm/rot, com isto a opção de utilizar um incremento linear utilizando os valores de 0,1; 0,2 e 0,3 para os níveis 1, 2 e 3, respectivamente. Para o fator B (A_p), os valores recomendados pelo fabricante da ferramenta variam entre 0,3 a 1,5 mm, sendo o recomendado 0,4 mm. Sendo

assim, para ter um incremento proporcional, foi optado por utilizar os valores de 0,4; 0,8 e 1,2 mm. Os valores para o fator C (V_c), também foram baseados na recomendação do fabricante da ferramenta, que sugere uma velocidade de corte entre 360 e 500 m/min. Contudo, para a geometria da peça, uma V_c acima de 400 m/min iria requerer uma rotação superior à 5000 RPM, limite da máquina. Com isto, foram utilizados os valores de 350, 375 e 400 m/min, para os níveis 1, 2 e 3, respectivamente, proporcionando um incremento linear com o objetivo de facilitar uma comparação entre os resultados.

O preenchimento da matriz L9 de Taguchi com os fatores e níveis deste experimento, resultou na combinação das condições de corte conforme Quadro 3.5. Esta matriz apresenta a combinação da matriz L9 (Quadro 3.3) com a matriz das variáveis experimentais com valores para fatores e níveis (Quadro 3.4).

Quadro 3.5 - Valores para cada nível na matriz L9

Amostra	f_n [mm/rot]	A_p [mm]	V_c [m/min]
1	0,1	0,4	350
2	0,1	0,8	375
3	0,1	1,2	400
4	0,2	0,4	375
5	0,2	0,8	400
6	0,2	1,2	350
7	0,3	0,4	400
8	0,3	0,8	350
9	0,3	1,2	375

Fonte: Elaborado pelo autor

Para cada amostra foram realizados três ciclos de usinagem, um em vazio, ou seja, a operação de usinagem sem matéria-prima e outros dois ciclos com matéria-prima, logo com remoção de material.

As dimensões da matéria-prima utilizada para os experimentos foram de diâmetro $\varnothing 38,1$ mm e comprimento de 150 mm. O ciclo de usinagem promoveu a redução de diâmetro para $\varnothing 26,1$ mm por um comprimento de 100 mm, resultando em um volume removido (MRV) de 60507,07 mm³.

Os ciclos de usinagem tiveram variação de tempo e número de passes de acordo com a variação das combinações das condições de corte e seus resultados de potência efetiva

registrados a cada 0,2 s conforme exemplo do Figura 3.4. O valor apresentado pelo analisador de energia corresponde à potência efetiva instantânea e o consumo foi calculado multiplicando o valor da potência pelo intervalo de tempo entre cada medição, ou seja, $P \text{ [W]} \times 0,2 \text{ [s]}$ e, por fim, o valor de consumo foi dividido por 3600, fator de conversão para a unidade Watt hora [Wh], conforme Equação (3.1). Para computar o consumo total durante o ciclo de usinagem, foi feito o somatório de todos os valores de consumo instantâneo calculados a partir dos registros de potência, conforme Figura 3.7.

$$\text{Consumo Instantâneo} = P \frac{0,2}{3600} \quad (3.1)$$

	A	AQ
1	Registro	P [W]
2	03/07/2019 13:10:02,6	1597,09
3	03/07/2019 13:10:02,8	1598,04
4	03/07/2019 13:10:03,0	1598,98
5	03/07/2019 13:10:03,2	1598,76
6	03/07/2019 13:10:03,4	1600,42
7	03/07/2019 13:10:03,6	1595,93
8	03/07/2019 13:10:03,8	1600,35
9	03/07/2019 13:10:04,0	1602,64
10	03/07/2019 13:10:04,2	1604,13

Figura 3.4 - Registro gerado pelo analisador de energia

Fonte: Elaborado pelo autor

Para se obter dados de validação dos indicadores a nível de produção da etapa 4, foi usado o mesmo processo de obtenção de dados de energia aplicado durante os ciclos de usinagem das amostras, medindo a potência empregada nos estados de máquina conforme descrito a seguir.

A inicialização da máquina teve seu tempo cronometrado, e sua potência registrada para que posteriormente fossem aplicados os cálculos de consumo e por fim o somatório com o consumo total. O mesmo procedimento foi realizado para contabilizar o consumo total do tempo de preparação da máquina (*setup*), tempo de troca de peça e tempo de troca de inserto.

Estes estados de máquina com informações de tempo e consumo total, bem como os dados de consumo energético e tempo de ciclo das nove amostras foram separados em blocos de eventos, conforme Figura 3.5.

Inicialização (Start)		Preparação (Setup)		Troca Inserto		Troca Peça		EXP 1	
Duração [s]	Consumo [Wh]	Duração [s]	Consumo [Wh]	Duração [s]	Consumo [Wh]	Duração [s]	Consumo [Wh]	Duração [s]	Consumo [Wh]

Figura 3.5 - Blocos de eventos de máquina

Fonte: Elaborado pelo autor

Nestes blocos de eventos foram contabilizados uma linha do tempo simulada para gerar dados de uma produção em série. Foi estabelecido um turno de trabalho de 10 horas, contando um intervalo de 1 hora para almoço. No início do turno ocorre o evento de Inicialização da máquina, que se repete após o intervalo de almoço. Os eventos de preparação também ocorrem duas vezes durante o turno, logo após a inicialização da máquina.

Os eventos de troca de incerto ocorrem a cada 5 peças fabricadas, ou seja, para a simulação, foi criada uma equação em que o número total de peças é dividido por 5 para se obter o número de repetições do evento de trocas do inserto. Já o número total de peças foi obtido somando todos os tempos até que a soma total de todos os eventos atingisse o valor mais próximo de 10 horas, tendo em vista 9 horas de trabalho e 1 hora de almoço, conforme exemplo da Figura 3.6.

Timeline 1	Inicialização (Start)		Preparação (Setup)		Troca Inserto		Troca Peça		EXP 1		Almoço		Total	
Tempo Unit/Consumo Unit	04:07,000	98,1412	03:40,000	103,5491	00:45,000	20,940585	00:30,200	14,68375056	04:58,000	221,8420644	01:00:00,000	0	Tempo	Consumo
Repetições no turno	2	2	2	2	19	19	93	93	93	93	1	1	60,41564352	
Tempo total/Consumo total	00:08:14,000	196,2824	00:07:20,000	207,0983	00:14:15,000	397,871115	00:46:48,600	1365,588802	07:41:54,000	20631,31199	01:00:00,000	0	09:58:31,600	22798,15256

Figura 3.6 - Blocos de evento com tempo e consumo

Fonte: Elaborado pelo autor

Após a montagem da simulação do turno de produção em série para cada uma das nove amostras, foram compilados os resultados de indicadores conforme as Etapas 3 e 4 deste capítulo.

3.2.3 Etapa 3 – Compilação dos resultados – Nível de Produto e Nível de Processo

A compilação dos resultados para os indicadores a nível de produto e processo foi realizada conforme descrito abaixo.

O primeiro passo foi extrair o intervalo de ciclo de usinagem para cada uma das nove amostras, com o registro de tempo de medição à cada 0,2 segundos, sua respectiva potência e o valor de consumo calculado conforme Equação (3.1). O valor de tempo proveniente do analisador de energia em formato DATA/HORA foi zerado no início do ciclo para manter apenas o tempo de ciclo em MINUTOS e SEGUNDO, conforme Figura 3.7.

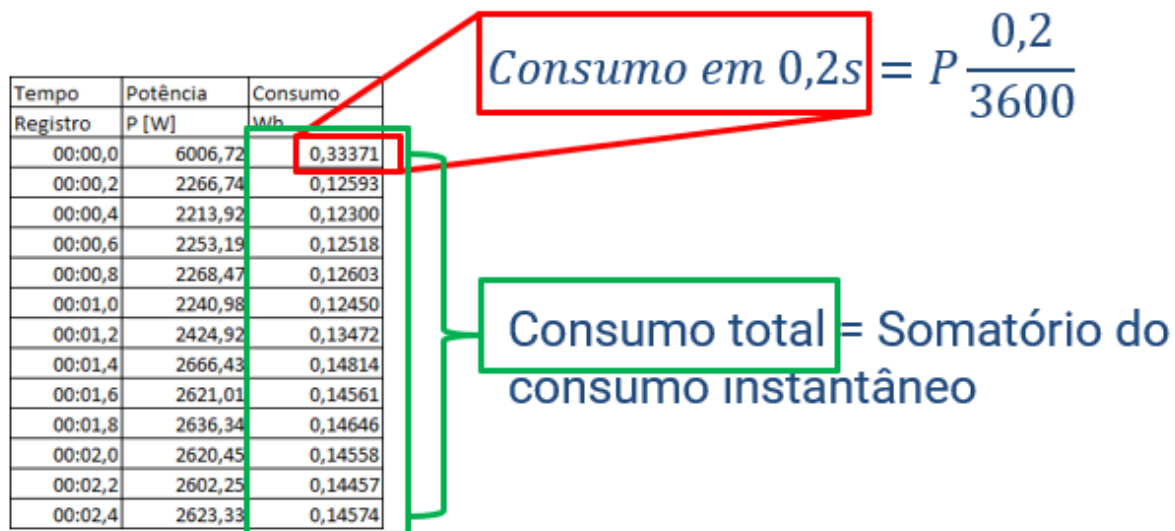


Figura 3.7 - Exemplo de extração do tempo de ciclo

Fonte: Elaborado pelo autor

Para cada indicador, dependendo da característica dos dados necessários, os valores do somatório do consumo foram isolados e tabelados para facilitar o cálculo e a correlação entre os outros indicadores.

A partir do valor total do somatório de cada variável, estes dados foram aplicados nas equações de cada indicador para se obter o resultado.

As variáveis de consumo energético relacionadas aos indicadores que envolvem a energia de corte foram obtidas com a exclusão de valores de consumo superiores à média de potência no momento do corte, ou seja, os picos de consumo gerados por deslocamento rápido da ferramenta foram desconsiderados para que apenas os valores de consumo em que a

ferramenta estava em contato com a peça e removendo material fossem levados em consideração, conforme representam a Figura 3.8 e Figura 3.9.

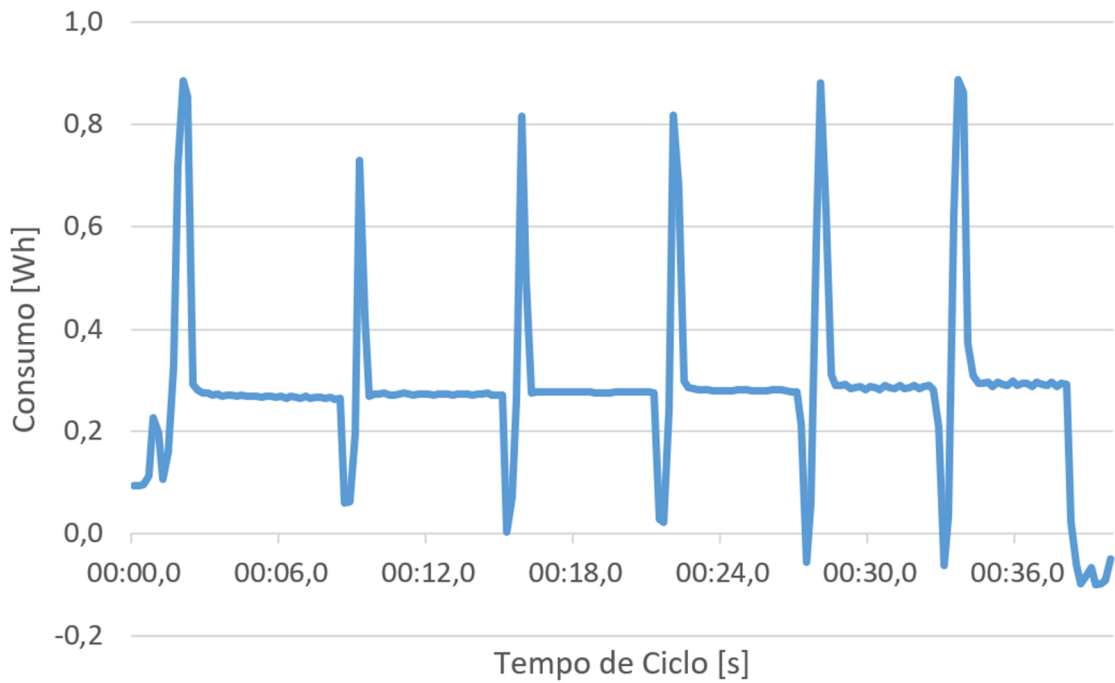


Figura 3.8 - Perfil de consumo total da Amostra 9

Fonte: Elaborado pelo autor

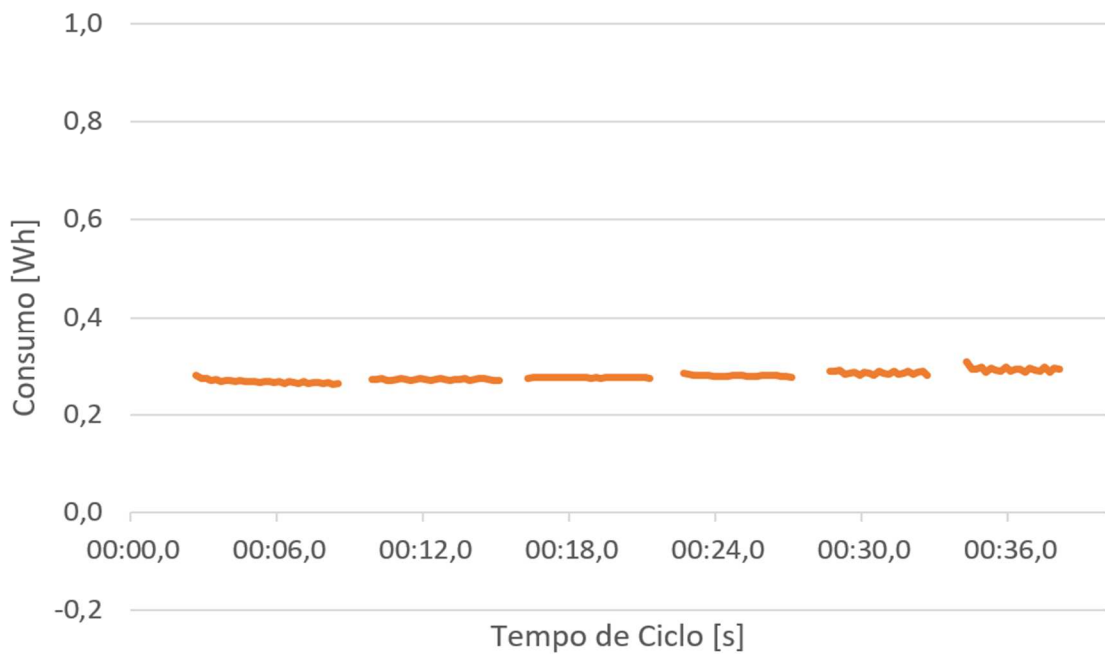


Figura 3.9 - Perfil de consumo durante o corte da Amostra 9

Fonte: Elaborado pelo autor

Os indicadores que derivam de outras variáveis, como volume removido total ou volume removido por passe, número de passes, foram calculados separadamente para cada amostra e utilizados no cálculo dos indicadores.

Além dos indicadores, as principais informações do processo, com MRV, Tempo de ciclo, número de passes, foram tabeladas para facilitar o comparativo entre os resultados das amostras.

3.2.4 Etapa 4 – Compilação dos resultados – Nível de Produção

A compilação dos resultados para os indicadores a nível de produção foi realizada conforme descrito abaixo.

Foram criados três cenários com a simulação de produção em série de uma mesma peça. O primeiro cenário visou mostrar os efeitos negativos de um baixo padrão de qualidade, nos indicadores de produtividade e energia. O segundo cenário visou apresentar os efeitos de ações de melhoria na qualidade da produção e seus efeitos nos indicadores de produtividade e energia. O objetivo do Cenário 3 é simular uma situação diferente para o indicador de disponibilidade.

Os dados utilizados para montar os três cenários são os mesmos apresentadas na etapa 2 e exemplificados na Figura 3.6. Foram montadas as linhas do tempo simulando a produção em série de uma mesma peça, contabilizando os tempos e consumos dos diversos eventos de produção ocorridos.

Cenário 1:

A partir dos dados registrados nos blocos de eventos que contabilizam o tempo e consumo para cada estado de máquina, foram calculados a quantidade de peças fabricadas e a quantidade de peças rejeitadas, definidas em 10% do total produzido. Este valor de percentual foi usado como representativo à baixa qualidade, uma vez que o OEE Classe Mundial indica uma qualidade de 99,9%.

Os eventos registrados para a simulação do monitoramento da máquina foram os listados no Quadro 3.6, com seus respectivos estados, perdas associadas e indicadores.

Quadro 3.6 - Quadro de relacionamento entre eventos, estados e perdas

<i>Evento</i>	<i>Estado da máquina para medição</i>	<i>Perda associada</i>	<i>Grupo</i>	<i>Indicador associado</i>
Parada para manutenção	Máquina pronta (<i>ready</i>)	Quebra de equipamento	Perdas por inatividade	Disponibilidade
Preparação da máquina (Setup)	Máquina pronta (<i>ready</i>)	Setup		
Parada para medição	Máquina pronta (<i>ready</i>)	Microparadas	Perdas por velocidade	Desempenho
Parada para troca de inserto	Máquina pronta (<i>ready</i>)	Microparadas	Perdas por velocidade	
Produção e troca de peça	Em operação	Defeitos (peças rejeitadas) e retrabalho	Perdas por qualidade	Qualidade

Fonte: Elaborado pelo autor

Utilizando os blocos de tempo de cada evento e a quantidade de peças produzidas dentro do turno, foram calculados os indicadores conforme Equação 3.2 e Equação 3.3.

Indicador de Qualidade:

$$Q_{nd} = Q_{total} \times 0,9 \text{ (com arredondamento para cima)} \quad (3.2)$$

$$Q_d = Q_{total} - Q_{nd} \quad (3.3)$$

Onde:

Q_{nd}=Quantidade de peças boas produzidas no turno

Q_{total}=Quantidade total de peças produzidas no turno

Q_d=Quantidade de peças ruins produzidas no turno

Cenário 2:

Para o cenário 2 foram usados os mesmos critérios do cenário 1, porém, para os eventos, foram adicionadas paradas para medição. As paradas de medição somam 15 segundos às

paradas para troca de inserto, ou seja, ocorrem a cada cinco peças produzidas, como mostrado na Figura 3.10. A parada para medição acrescentou um valor equivalente em consumo e naturalmente provocou uma redução na produção total de peças boas. Entretanto, ao se realizarem ações de melhoria no processo, espera-se que ocorram melhorias de qualidade, com isso foi definido que o percentual de peças boas seria de 99%, logo 1% de peças rejeitadas.

Timeline 1	Inicialização (Start)		Preparação (Setup)		Troca Inserto		Troca Peça		EXP 1		Almoço		Total	
Tempo Unit/Consumo Unit	04:07,000	98,1412	03:40,000	103,5491	01:00,000	21,23051556	00:30,200	14,68375056	04:58,000	221,8420644	01:00:00,000	0	Tempo	Consumo
Repetições no turno	2	2	2	2	19	19	92	92	92	92	1	1	60,41514352	
Tempo total/Consumo total	00:08:14,000	196,2824	00:07:20,000	207,0983	00:19:00,000	403,3797956	00:46:18,400	1350,905051	07:36:56,000	20409,46993	01:00:00,000	0	09:57:48,400	22567,13543

Figura 3.10 - Linha do tempo de uma amostra do cenário 2

Fonte: Elaborado pelo autor

Cenário 3:

Neste cenário foram utilizados os mesmos critérios do Cenário 1, porém foi adicionada uma parada de manutenção não programada de uma hora, como apresentado na Figura 3.11. Para isto, foram consideradas duas possibilidades. A primeira, situação A, em que a máquina ficou parada para manutenção em estado Em Espera, com isto a máquina utilizou energia sem produzir. A segunda, situação B, simulada foi a máquina parada por uma hora, para manutenção, porém desligada, sem consumo de energia. Além da parada de uma hora, foi levado em consideração o tempo de Inicialização e Preparação da máquina para reiniciar as atividades após a parada.

Timeline 1	Inicialização (Start)		Preparação (Setup)		Troca Inserto		Troca Peça		EXP 1		Manut		Total	
Tempo Unit/Consumo Unit	04:07,000	98,14119556	03:40,000	103,5491294	00:45,000	20,940583	00:30,200	14,68375056	04:58,000	221,8420644	01:00:00,000	1670	Tempo	Consumo
Repetições no turno	3	3	3	3	17	17	81	81	81	81	1	1	60,37442361	
Tempo total/Consumo total	00:12:21,000	294,4235867	00:11:00,000	310,6473883	00:12:45,000	355,989945	00:40:46,200	1189,383795	06:42:18,000	17969,20722	01:00:00,000	1670	08:59:10,200	21789,65194

Figura 3.11 - Linha do tempo de uma amostra do cenário 3

3.2.5 Etapa 5 – Apresentar indicadores calculados e discutir resultados

Após a validação experimental, os indicadores formulados foram apresentados em gráficos e tabelas, juntamente com os resultados obtidos nas duas validações experimentais. E seus resultados foram discutidos com base na comparação dos indicadores e as variáveis dos experimentos.

4 RESULTADOS

Os resultados discutidos neste capítulo foram apresentados na sequência de etapas realizadas na metodologia.

4.1 ETAPA 1 - SELEÇÃO DOS E-KPI'S

Com base na metodologia, os indicadores foram definidos de acordo com quatro passos, definição das finalidades, identificação, definição e seleção. O resultado da etapa de seleção é descrito no Quadro 4.1 para cada indicador selecionado.

Quadro 4.1 - Finalidades dos indicadores

Nível	Indicador	Finalidade
Produto	Energia direta	Finalidade A - Conhecer o custo energético do produto
	Energia específica consumida (SEC) por passe	Finalidade B - Melhorar a eficiência energética do processo a nível de produto
Processo	Eficiência da máquina	Finalidade C - Obter dados para Benchmarking interno da eficiência energética entre máquinas
	Energia específica consumida (SEC) no processo	Finalidade D - Obter dados para Benchmarking interno da eficiência energética entre diferentes peças de diferentes geometrias
Produção	Eficiência energética na Qualidade	Finalidade E - Tornar visível perdas e desperdício energético relacionados aos eventos da produção
	Eficiência energética no Desempenho	
	Eficiência energética na Disponibilidade	
	OEE	Finalidade F - Ter visão do resultado global da energia em relação à produção

Fonte: Elaborado pelo autor

4.2 FINALIDADES E SELEÇÃO DOS INDICADORES

A seguir, foram apresentados os resultados em relação à seleção das finalidades dos indicadores de eficiência energética.

4.2.1 Finalidade A - Conhecer o custo energético do produto

Conhecer o custo energético do produto é um objetivo importante quando se trabalha a eficiência energética na manufatura. De maneira geral, as empresas estimam os custos monetários despendidos com energia na produção pela potência da máquina e agregam este valor ao custo hora-máquina, para fins de contabilidade e precificação dos serviços de usinagem. De certa forma este método funciona, porém quando os objetivos estratégicos da empresa buscam uma consciência energética, esta técnica passa a ser questionada. Buscar o conhecer custo energético por peça, permite maior precisão na avaliação monetária aplicada à produção daquele produto e permite uma avaliação do custo energético vinculado às perdas por ineficiência do processo (BIERER; GÖTZE, 2012). Conhecer o consumo de energia no produto também é o ponto de partida para estudar as possíveis melhorias no processo com a finalidade de aumentar a eficiência energética.

Para atender a finalidade A, conhecer o custo energético do produto, foi escolhido o indicador que apresenta a energia direta consumida para fabricação de uma unidade de um produto. O indicador foi denominado Energia Direta.

O indicador escolhido para apresentar o custo de consumo energético foi o indicador de energia direta, ou seja, um indicador que apresenta como resultado a energia total utilizada para a fabricação de uma peça. Este indicador pode apresentar resultados tanto a nível geral de produção com o somatório da energia direta utilizada em diversas operações de fabricação para a produção de uma peça, e quanto a nível de processo apresentando resultados de uma operação específica em uma máquina específica para uma peça.

Para este indicador é necessário conhecer os estados operativos das máquinas envolvidas e o perfil de consumo ou potência no processo como exemplificado na Figura 4.1

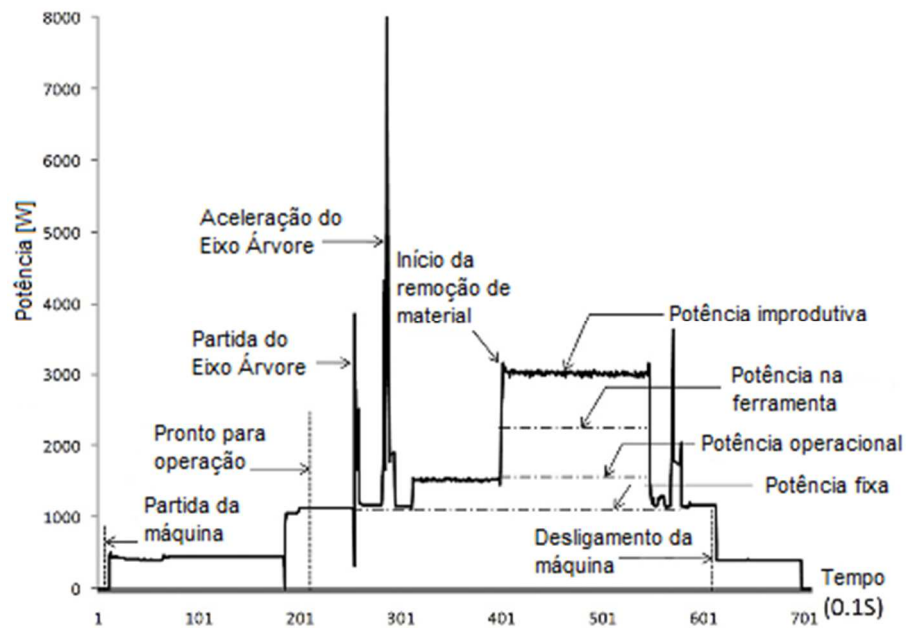


Figura 4.1 - Estados de máquina e perfil de potência de um processo de usinagem

Fonte: Zhao et al. (2017)

O indicador foi definido conforme os dados apresentados no Quadro 4.2.

Quadro 4.2 - Cartão do indicador de Energia direta

DESCRIÇÃO DO e-KPI	
Conteúdo:	
Nome:	Energia direta
ID:	#1
Descrição:	Contabiliza a quantidade de energia direta utilizada para fabricar uma peça em um processo de usinagem.
Escopo:	Nível de processo
Fórmula:	$E_{peça} = \sum_{i=1}^{n_{sb}} E_{sbi} + \sum_{i=1}^{n_{st}} E_{sti} + \sum_{i=1}^{n_{id}} E_{idi} + \sum_{i=1}^{n_{cm}} E_{cmi}$
Unidade de medida:	Wh
Amplitude	Min: Máx:
Tendência	Quanto menor, melhor
Contexto:	
Frequência:	A cada peça fabricada
Público Alvo:	Gestão da produção, gestão da energia e manutenção
Método de Produção	Seriado
Anotações:	Este indicador apresenta o somatório total de energia consumida contabilizando a partir do momento em que a peça entra na máquina para o início de operação.

Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.2 Finalidade B - Melhorar a eficiência energética do processo a nível de produto

Melhorar a eficiência energética de um processo de usinagem é um trabalho constante na indústria de manufatura e para criar ações de melhoria são necessários dados de eficiência dos processos de corte (MORADNAZHAD; UNVER, 2017). Esta finalidade leva à necessidade de se utilizar indicadores que demonstrem dados de consumo e eficiência energética dos processos de corte relacionados aos parâmetros de corte e permitindo uma comparação das possibilidades para se obter o melhor resultado em relação à eficiência energética.

Para atender a finalidade B, melhorar a eficiência energética através dos parâmetros de processo a nível de produto, foi escolhido o indicador que apresenta a energia consumida para remover um determinado volume de material a cada passe realizado na usinagem.

O indicador que apresenta a SEC por passe, relaciona a energia consumida por passe da usinagem com o MRV de cada passe. Este indicador pode ser utilizado para avaliar a eficiência das condições de corte selecionadas, pois permite a comparação entre as estratégias de projeto do produto, como sobre material a ser utilizado ou diferentes geometrias e operações, uma vez que considera o volume de material removido que é o real produto da usinagem. O indicador foi definido conforme os dados apresentados no Quadro 4.3 **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

Quadro 4.3 - Cartão do indicador de SEC por passe

DESCRIÇÃO DO e-KPI	
Conteúdo:	
Nome:	SEC por passe
ID:	#2
Descrição:	Contabiliza a quantidade de energia utilizada para remover um dado volume de material na usinagem a cada passe.
Escopo:	Nível de processo
Fórmula:	$SEC_{passe} = \frac{E_{passe}}{MRV_{passe}}$
Unidade de medida:	J/cm ³
Amplitude	Min: Máx:
Tendência	Quanto menor, melhor
Contexto:	
Frequência:	A cada passe
Público Alvo:	Gestão da produção, gestão da energia e manutenção
Método de Produção	Seriado

Anotações:	
------------	--

Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.3 Finalidade C - Obter dados para Benchmarking interno da eficiência energética entre máquinas

Diferentes máquinas ferramentas possuem diferentes comportamentos de consumo de energia devido às características de seus subsistemas. Ter dados de consumo e eficiência energética que permitam a comparação entre diferentes máquinas ferramenta na produção de um mesmo produto ou execução de um mesmo processo é importante para a seleção do melhor equipamento para a produção (PAVANASKAR, 2014).

Para atender a finalidade C, Obter dados para Benchmarking interno da eficiência energética entre máquinas, foi escolhido o indicador que relaciona a energia total para operação de usinagem de uma peça com a energia consumida para remover o material, incluindo todos os seus sistemas auxiliares durante os períodos em que a ferramenta está em contato com a peça removendo o material. Este indicador foi denominado de eficiência da máquina.

Quanto maior o valor do indicador, menor é o consumo da máquina para realizar atividades que não geram valor agregado, com deslocamentos de ferramenta e outros sistemas ativos nos momentos em que a máquina não está de fato removendo material. O indicador foi definido conforme os dados apresentados no Quadro 4.4.

Quadro 4.4 - Cartão do indicador de eficiência da máquina

DESCRIÇÃO DO e-KPI	
Conteúdo:	
Nome:	Eficiência da Máquina
ID:	#3
Descrição:	Relaciona a quantidade de energia consumida pela máquina durante o corte com a energia total da máquina consumida para produzir uma peça.
Escopo:	Nível de processo
Fórmula:	$Eff_{maq} = \frac{\sum_{i=1}^{n_m} E_{mi}}{\sum_{j=1}^{n_{sb}} E_{sbi} + \sum_{j=1}^{n_{st}} E_{sti} + \sum_{j=1}^{n_{id}} E_{idi} + \sum_{j=1}^{n_{cm}} E_{cmi}}$
Unidade de medida:	Percentual [%]
Amplitude	Min: 0% Máx: 100%
Tendência	Quanto maior, melhor
Contexto:	
Frequência:	A cada peça fabricada
Público Alvo:	Gestão da produção, gestão da energia e manutenção
Método de Produção	Seriado

Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.4 Finalidade D - Obter dados para avaliação e comparação da eficiência energética com diferentes peças de diferentes geometrias

Além de comparação e avaliação das melhorias nos parâmetros de corte e na influência da máquina ferramenta, também é importante ter dados de referência para poder comparar a eficiência energética das operações de usinagem entre peças de diferentes geometrias e que podem ocorrer em máquinas diferentes (LI, 2015).

O indicador selecionado para atender a finalidade D, obter dados para Benchmarking interno da eficiência energética entre diferentes peças de diferentes geometrias, foi o indicador que apresenta a energia consumida para remover um determinado volume de material para a fabricação de uma peça.

O indicador, que apresenta a SEC do processo, relaciona a energia consumida na usinagem de uma peça com seu MRV. Este indicador também é utilizado para uma comparação da eficiência das condições de corte selecionadas, bem como avaliar condições de projeto diferente para a mesma peça, como utilizar matéria-prima com diferentes geometrias.

O indicador foi definido conforme os dados apresentados no Quadro 4.5 **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

Quadro 4.5 - Cartão do indicador de SEC por processo

DESCRIÇÃO DO e-KPI	
Conteúdo:	
Nome:	SEC por processo
ID:	#4
Descrição:	Contabiliza a quantidade de energia utilizada para remover um dado volume de material na usinagem a cada peça produzida.
Escopo:	Nível de processo
Fórmula:	$SEC_{peça} = \frac{E_{peça}}{MRV_{peça}}$
Unidade de medida:	J/cm ³
Amplitude	Min: Máx:
Tendência	Quanto menor, melhor
Contexto:	
Frequência:	A cada peça produzida
Público Alvo:	Gestão da produção, gestão da energia e manutenção
Método de Produção	Seriado
Anotações:	

Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.5 Finalidade E - Tornar visível perdas e desperdício energético relacionados aos eventos da produção

Observar o comportamento energético em nível de produção é importante para se ter consciência dos pontos de perda e desperdício de energia durante o processo produtivo. Muitos indicadores na gestão da produção são baseados em escala temporal, devido aos custos relacionados serem contabilizados em hora-máquina, porém os custos em energia podem variar de acordo com o perfil de consumo energético em diferentes estados de máquina e eventos de produção (BARLETTA et al., 2014).

Para atender a finalidade E, tornar visível perdas e desperdício energético relacionados aos eventos da produção, foram selecionados três indicadores baseados nos indicadores de produtividade que são utilizados para calcular o OEE na produção quando se usa o fator tempo como variável mensurável.

O primeiro indicador, relacionado ao indicador de qualidade, apresenta a energia efetiva usada na fabricação de peças boas em relação à energia total para produzir todas as peças, Eficiência energética na Qualidade.

Este indicador corresponde à energia consumida para produção das peças, não contabilizando a energia consumida nas microinterrupções e pequenas paradas. Ele apresenta a eficiência energética da produção em relação à qualidade, ou seja, traz à tona quanto de energia é desperdiçada na fabricação de peças que não geram valor monetário ao fabricante ou precisam ser retrabalhadas. No ponto de vista energético, este indicador é utilizado para o cálculo do OOE de energia (EOEE), quanto maior o percentual de peças boas melhor é o resultado deste indicador. Segundo Krzysztof (2018), o valor de Qualidade à nível mundial é de 99,9%.

O indicador foi definido conforme os dados apresentados no Quadro 4.6 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Quadro 4.6 - Cartão do indicador de eficiência energética na qualidade

DESCRIÇÃO DO e-KPI	
Conteúdo:	
Nome:	Eficiência energética na Qualidade
ID:	#5
Descrição:	Contabiliza a razão de energia consumida para fabricar peças boas com a energia consumida para produzir o total de peças em um determinado intervalo de tempo.
Escopo:	Nível de processo
Fórmula:	$E_f Q = \frac{E0}{E1}$ <p>Onde: $E0 = E_{peça} \times Q_{nd}$ $E1 = E_{peça} \times (Q_{nd} + Q_d)$ $E_{peça}$ = Energia consumida para fabricar uma peça Q_{nd} = Quantidade de peças boas produzidas no turno Q_d = Quantidade de peças ruins produzidas no turno</p>
Unidade de medida:	%
Amplitude	Min: 0% Máx: 100%
Tendência	Quanto maior, melhor
Contexto:	
Frequência:	A cada turno
Público Alvo:	Gestão da produção, gestão da energia e manutenção
Método de Produção	Seriado
Anotações:	

Fonte: Elaborado pelo autor

Outro indicador selecionado para atender a finalidade E, foi o de Eficiência Energética no Desempenho. Este indicador relaciona a energia utilizada para fabricar todas as peças, incluindo as microinterrupções para medições e trocas de ferramentas ou insertos, com a energia planejada para a fabricação das peças, ou seja, a energia ideal que deveria ser utilizada no processamento da peça. Este indicador foi selecionado, pois torna evidente o percentual de energia consumido com ineficiência.

O indicador de Eficiência Energética no Desempenho apresenta o resultado em percentual da energia relacionada à eficiência do processo. Se o processo é ineficiente, ou seja, leva maior tempo que em uma situação ideal, isto resulta em maior consumo de energia. Esta energia também é desperdício, pois está sendo consumida em momentos que não geram valor agregado, como paradas desnecessárias ou redução do tempo de produção que acarretam um maior tempo de operação.

O indicador foi definido conforme os dados apresentados no Quadro 4.7.

Quadro 4.7 - Cartão do indicador de eficiência energético no desempenho

DESCRIÇÃO DO e-KPI	
Conteúdo:	
Nome:	Eficiência Energética no Desempenho
ID:	#6
Descrição:	Contabiliza a quantidade de energia consumida em tempo ideal com a quantidade de energia efetivamente usado no processamento das peças, incluindo os tempos de produção das peças, tempos de microinterrupções.
Escopo:	Nível de processo
Fórmula:	$E_f P = \frac{SEC\ Ideal \cdot Q}{E2}$ <p>Onde: $E_f P$ = Eficiência no Desempenho $SEC\ Ideal = E_{Idealpç} \cdot Q$ $E_{Idealpç}$ = Quantidade ideal de energia para fabricar uma peça $Q = (Q_{nd} + Q_d)$ $E2$ = Energia de operação (energia utilizada na produção das peças, incluindo microinterrupções e redução de velocidade).</p>
Unidade de medida:	%
Amplitude	Min: 0% Máx: 100%
Tendência	Quanto maior, melhor
Contexto:	
Frequência:	A cada turno
Público Alvo:	Gestão da produção, gestão da energia e manutenção
Método de Produção	Seriado
Anotações:	

Fonte: Elaborado pelo autor

O terceiro indicador selecionado para atender a finalidade E é o indicador de Eficiência energética na Disponibilidade. Este indicador apresenta a razão entre a energia consumida em período programado de produção com a energia utilizada efetivamente em operação. Com isto, os desperdícios com indisponibilidade da máquina se tornam aparentes. Estes desperdícios podem ocorrer devido a máquina estar ligada em períodos de manutenção e quebra, por exemplo.

O período programado de produção corresponde aos tempos de produção das peças, tempos de microinterrupções e tempos em que a máquina ficou indisponível para quebra ou paradas maiores não programadas, como falta de operador ou matéria-prima. No ponto de vista energético, este indicador é utilizado para o cálculo do OOE de energia (EOEE).

O indicador foi definido conforme os dados apresentados no Quadro 4.8.

Quadro 4.8 - Cartão do indicador de eficiência energética na disponibilidade

DESCRIÇÃO DO e-KPI	
Conteúdo:	
Nome:	Eficiência energética na Disponibilidade
ID:	#7
Descrição:	Contabiliza a quantidade de energia consumida em período programado de produção, incluindo os tempos de produção das peças, tempos de microinterrupções e tempos em que a máquina ficou indisponível para quebra ou paradas maiores não programadas e consumo energético em operação.
Escopo:	Nível de processo
Fórmula:	$E_f D = \frac{E_2}{E_3}$ Onde: E _f D=Eficiência na Disponibilidade E ₃ = Energia consumida em todo período em que a máquina estava planejada para estar disponível.
Unidade de medida:	%
Amplitude	Min: 0% Máx: 100%
Tendência	Quanto maior, melhor
Contexto:	
Frequência:	A cada turno
Público Alvo:	Gestão da produção, gestão da energia e manutenção
Método de Produção	Seriado
Anotações:	

Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.6 Finalidade F - Ter visão do resultado global da energia em relação à produção

Para se ter uma visão geral do estado de eficiência energética na manufatura é importante ter um indicador global que incorpore as diferentes fontes de perda e desperdício, apresentando em um único KPI o desempenho geral em relação ao uso de energia (BARLETTA, 2012).

O indicador de eficiência energética global foi selecionado para atender a finalidade F, ter visão do resultado global da energia em relação à produção. Este indicador permite uma avaliação geral do estado das perdas e desperdícios de energia no processo e pode ser utilizado como uma referência para a tomada de decisão nas ações de melhoria dos processos com objetivo de aumentar a competitividade promovendo melhor eficiência energética.

O EOEE é um indicador baseado no OEE, porém ao invés de ser baseado em variáveis de tempo, este indicador é baseado em energia consumida. A avaliação do EOEE permite uma visão geral em tempo real do estado de consumo de energia no processo e explorando suas variáveis é possível identificar as principais causas das perdas e desperdícios de energia.

O indicador foi definido conforme os dados apresentados Quadro 4.9.

Quadro 4.9 - Cartão do indicador de EOEE

DESCRIÇÃO DO e-KPI	
Conteúdo:	
Nome:	EOEE - Eficácia energética global do equipamento
ID:	#8
Descrição:	Relaciona as perdas e desperdício em energia nos três pontos de controle do sistema de manufatura (Qualidade, Desempenho e Disponibilidade).
Escopo:	Nível de processo
Fórmula:	$EOEE = E_f Q \times E_f P \times E_f D$
Unidade de medida:	%
Amplitude	Min: 0% Máx: 100%
Tendência	Quanto maior, melhor
Contexto:	
Frequência:	A cada turno
Público Alvo:	Gestão da produção, gestão da energia e manutenção
Método de Produção	Seriado
Anotações:	

Fonte: Elaborado pelo autor

4.3 PERFIL DE CONSUMO

Para a avaliação experimental, foi necessário estudar os estados de máquina e seu respectivo perfil de consumo para cada evento de produção. Com isto foram discutidos os resultados abaixo de acordo com as informações coletadas pelo sistema de monitoramento.

A Figura 4.2 apresenta o perfil de potência de inicialização da máquina, do tempo 0 s à 36 s, neste período ocorre a inicialização do CLP da máquina. Após 36 segundos os sistemas auxiliares foram iniciados, gerando um pico de potência e após aproximadamente 10 segundos se iniciou o *Preset* de Ferramenta, que é a preparação da ferramenta com o posicionamento e preparação da ferramenta de corte. Na sequência, a partir de 1 minuto e 7 segundos, a máquina é colocada em operação, ocorre um pico de potência com a aceleração do eixo-árvore e o movimento da ferramenta. Os picos à 1 minuto e 15 segundos e 1 minuto e 23

segundos correspondem ao movimento rápido dos eixos da ferramenta que voltam ao início da peça para iniciar um novo passe. O intervalo entre estes dois picos corresponde ao tempo de corte de um passe.

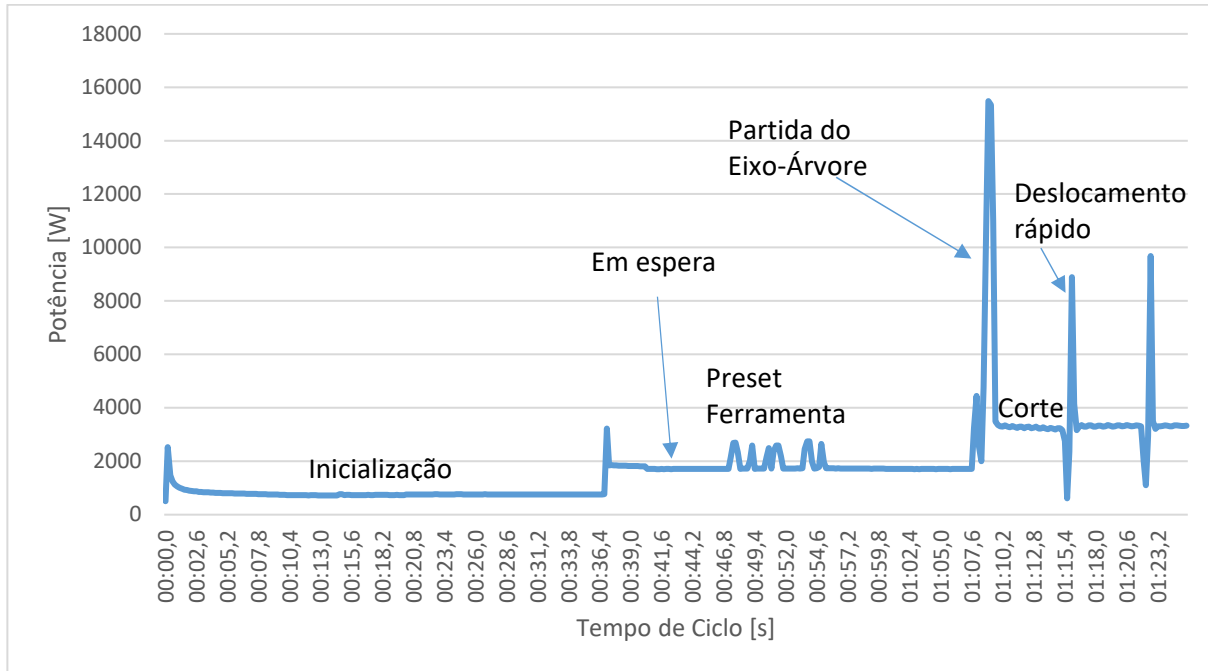


Figura 4.2 - Perfil de potência em um processo

Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 4.3 apresenta o perfil de potência para cada amostra ao longo do tempo de ciclo. Como a representação não está clara, devido aos picos e vales de consumo gerados pela aceleração dos motores nos períodos de movimento rápido, os picos foram ocultados para a apresentação apenas do consumo durante o corte conforme mostrado na Figura 4.4.

A partir do gráfico da Figura 4.4 é possível verificar o aumento da potência com o aumento da profundidade de corte (AP) e do avanço (Fn). Neste gráfico é possível avaliar um aumento no consumo ao passo que as condições de corte se tornam mais severas, por outro lado o tempo de usinagem é reduzido. Também é possível observar que ao longo da usinagem o consumo apresenta uma tendência de aumento que está relacionada ao aumento da rotação do eixo-árvore que é acelerado a cada passe para manter a velocidade de corte constante, devido à redução do diâmetro.

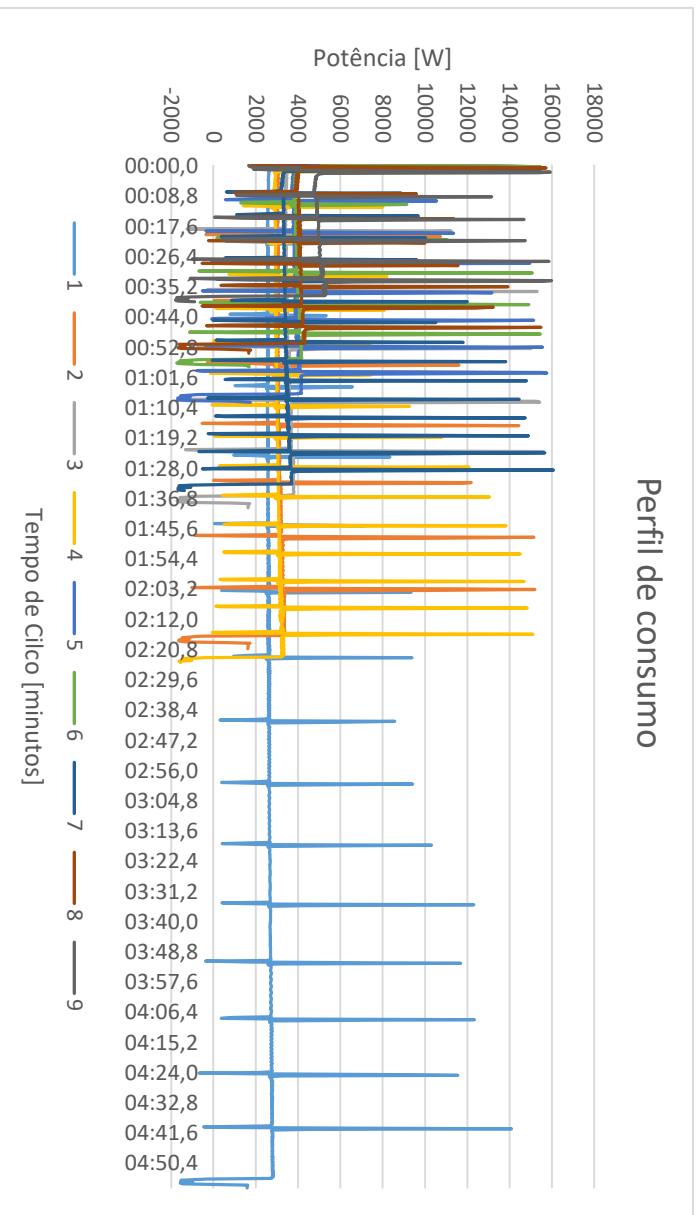


Figura 4.3 - Perfil de potência na usinagem para cada amostra

Fonte: Elaborado pelo autor

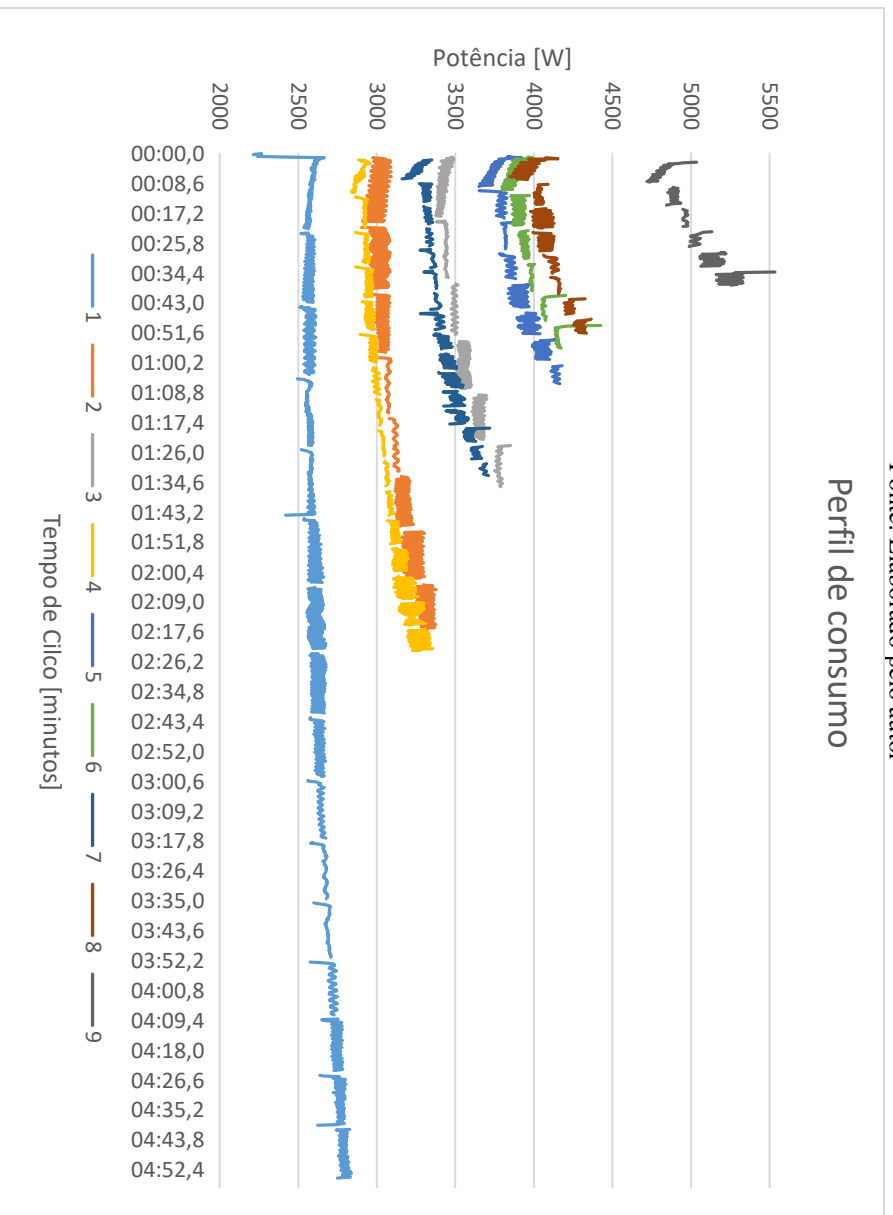


Figura 4.4 - Perfil de potência do corte para cada amostra

Fonte: Elaborado pelo autor

O Quadro 4.10 apresenta o tempo de ciclo necessário para usinagem de cada amostra e seus respectivos tempos de ciclo. É possível verificar que ao passo que as condições de corte ficam mais severas o tempo de ciclo é reduzido. Isto se dá pelo aumento da taxa de remoção de material com os parâmetros de corte mais severos, ou seja, com maior A_p , V_c e F_n remove-se mais material em menos tempo.

Quadro 4.10 - Parâmetros de corte e tempo de ciclo para cada amostra

<i>Amostra</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>
Ap [mm]	0,4	0,8	1,2	0,4	0,8	1,2	0,4	0,8	1,2
Fn [mm/rot]	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3
Vc [m/min]	350	375	400	375	400	350	400	350	375
Ciclo [min]	04:58,0	02:20,8	01:39,8	02:24,8	01:09,0	00:58,8	01:34,8	00:54,8	00:39,8

Fonte: Elaborado pelo autor

4.4 AVALIAÇÃO DOS INDICADORES (E-KPI'S)

A seguir são discutidos os resultados da aplicação dos indicadores selecionados com base nos dados coletados pelo sistema de monitoramento de energia.

4.4.1 Energia direta

O indicador de energia direta, além de fornecer a quantidade de energia empregada na fabricação da peça, pode ser convertido em valor monetário utilizado para contabilizar os custos relacionados na produção e contribuir na determinação dos custos e das peças para fins de precificação e contabilidade (AL-HAZZA et al., 2011).

Este indicador pode ser usado em estudos que comparam diferentes processos de fabricação para a mesma peça ou em avaliações de melhoria de processo, como mostram os

resultados

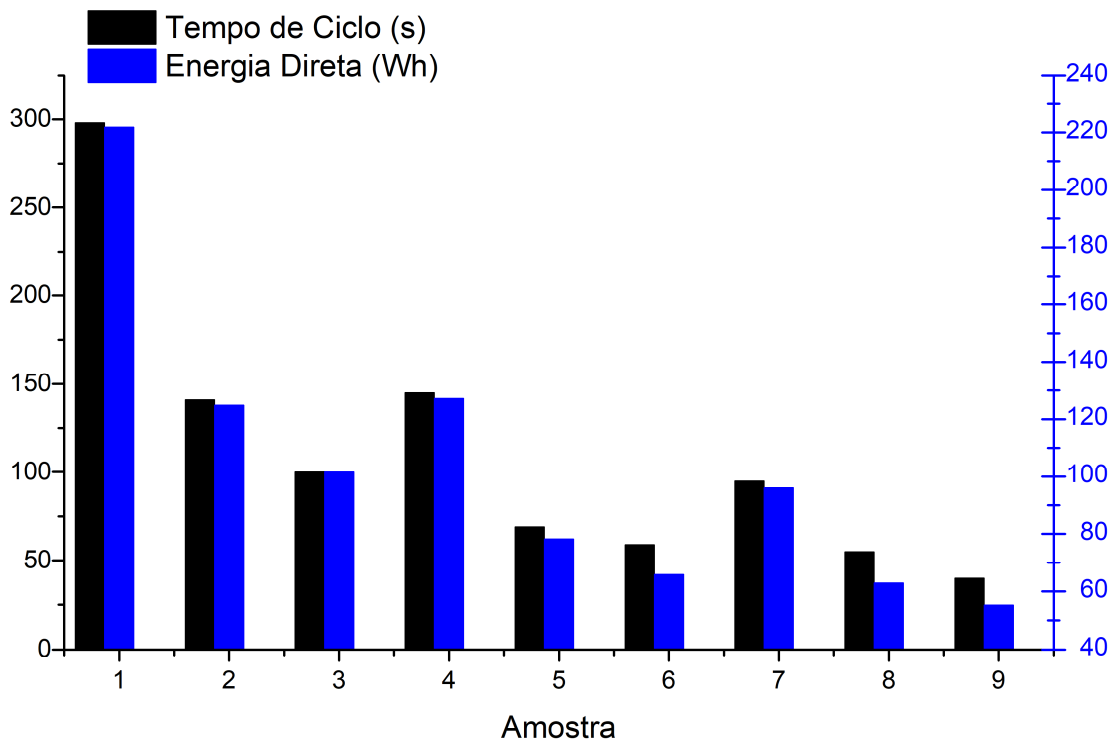


Figura 4.5.

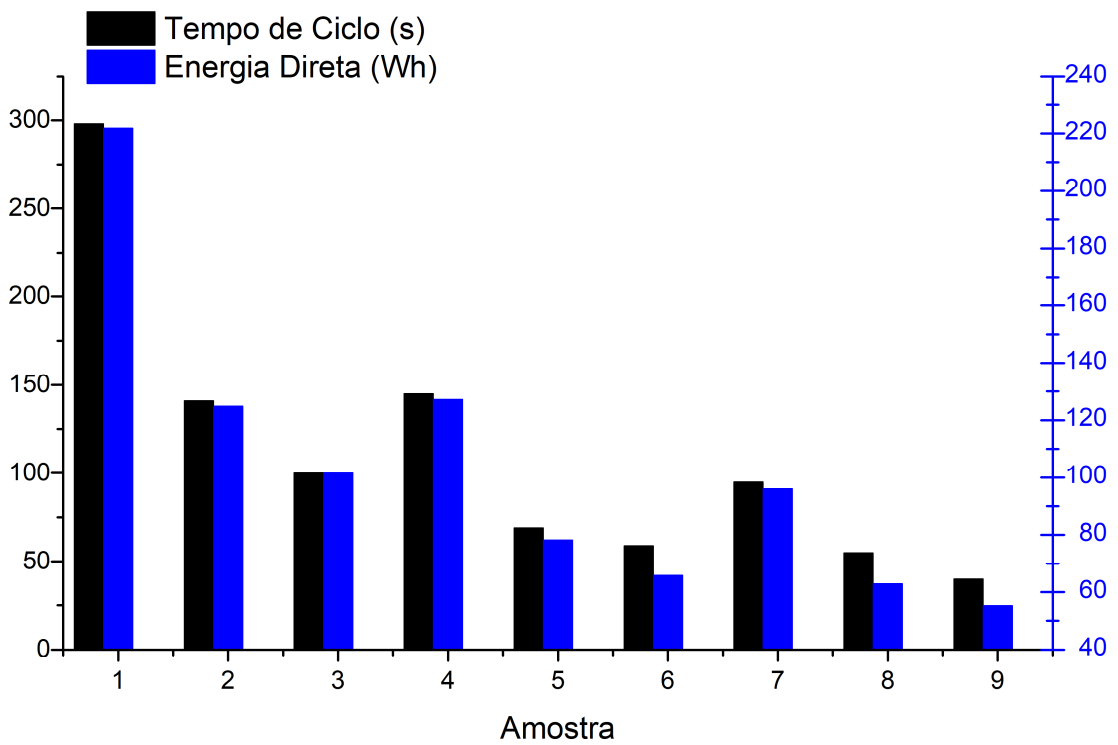


Figura 4.5 - Gráfico de Consumo x Tempo de ciclo

Fonte: Elaborado pelo autor

É possível avaliar que o consumo acompanha a tendência do tempo de ciclo de fabricação de peças, ou seja, os parâmetros que favorecem a redução do tempo de usinagem também favorecem a redução do consumo de energia para fabricação da peça. Este comportamento se justifica pela energia fixa consumida pela máquina para executar a operação (YOON et al., 2015) (LEE et al., 2017). Segundo SHANG et al (2019), uma máquina ferramenta pode ter um consumo de energia fixa de aproximadamente 50% do total da energia consumida para remoção de material. Sendo assim, uma maior taxa de remoção de material pode gerar uma economia de energia, bem como aumento na produtividade, pois reduzirá também o tempo de ciclo para fabricação de uma peça (KARA; LI, 2011).

Explorando melhor as variáveis que compõem a energia direta, pode-se avaliar a potência e o tempo de ciclo, bem como as variáveis das amostras, que são as condições de corte. Com isto, é possível aprofundar os estudos de melhoria de processo com a finalidade de reduzir o consumo de energia direta, atendendo o objetivo do indicador. Abaixo são mostrados outros estudos possíveis a partir das variáveis que compõem o indicador de energia direta e das amostras do estudo experimental.

A Figura 4.6 compara a energia direta com a potência instantânea média na produção de cada amostra. Nesta imagem é possível identificar uma correlação entre a redução na energia direta com a redução do tempo de ciclo, mesmo que a potência instantânea aumente devido a condições de corte mais severas.

Este comportamento torna claro que o tempo de ciclo está diretamente ligado ao consumo de energia na produção, pois conforme Shang et al. (2019), energia fixa da máquina muitas vezes pode ser mais alta que a energia de remoção de material. Com isto, é mais fácil agir na redução do tempo de ciclo do que na melhoria da eficiência energética dos subsistemas (ODA; KAWAMURA; FUJISHIMA, 2012). Este tipo de indicador é importante para a identificação da correlação do consumo de energia com variáveis estudadas para redução do consumo de energia.

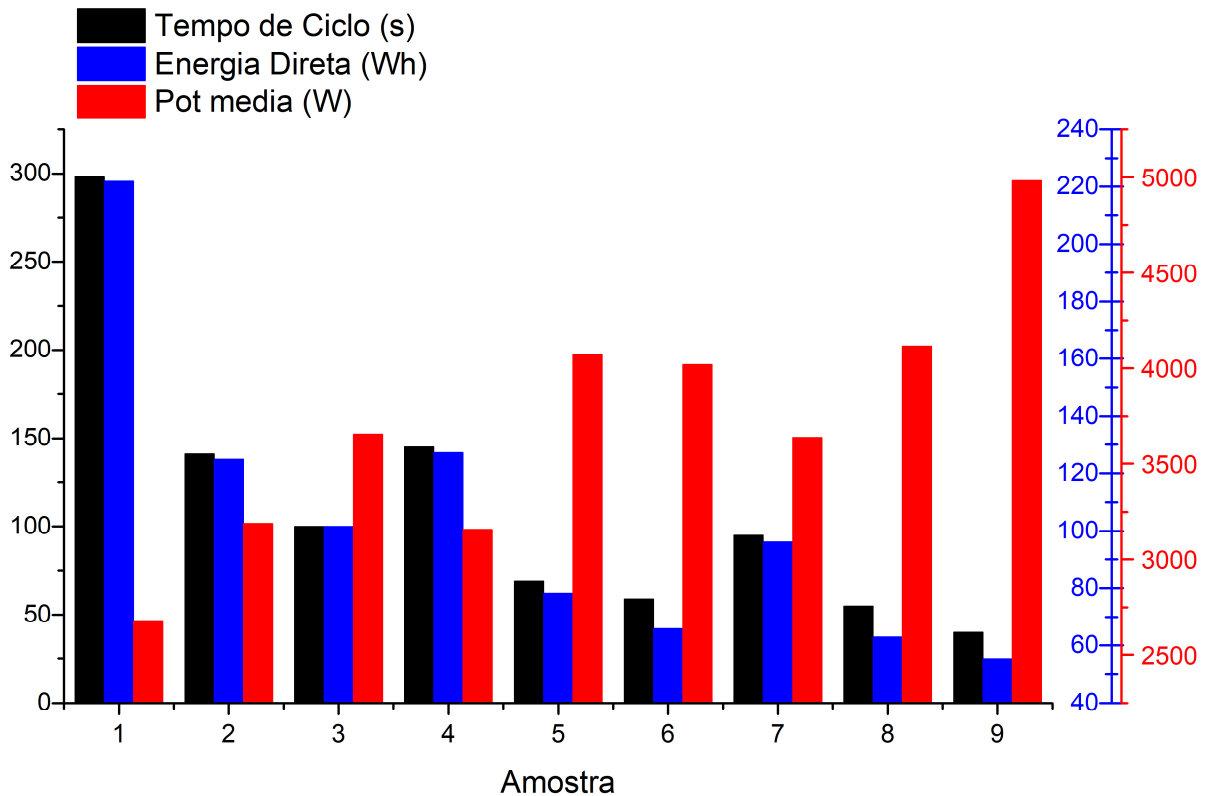


Figura 4.6 - Gráfico de Tempo de Ciclo x Energia direta e Potência Média

Fonte: Elaborado pelo autor

É possível observar que a potência instantânea média aumenta com o aumento dos parâmetros de corte. Porém, isto é pouco representativo no consumo, pois o aumento dos parâmetros de corte influencia na redução do tempo de usinagem. Isto justifica uma proporção maior na queda do consumo de energia, mesmo que a potência instantânea se eleve.

A Figura 4.7, Figura 4.8 e Figura 4.9 apresentam separadamente a influência de cada parâmetro de corte estudado no tempo de ciclo. A Figura 4.7 representa a profundidade de corte e o tempo de ciclo de usinagem das amostras. Neste gráfico fica evidente que quanto maior a profundidade de corte, menor é o tempo de ciclo. Na Figura 4.8 também é possível avaliar uma contribuição do incremento no avanço para a redução do tempo de ciclo. Já na Figura 4.9, fica aparente que a velocidade de corte exerce uma influência menor no tempo de ciclo. Estes indicadores estratificados são importantes para se otimizar as ações a serem tomadas para melhorar a eficiência energética do processo.

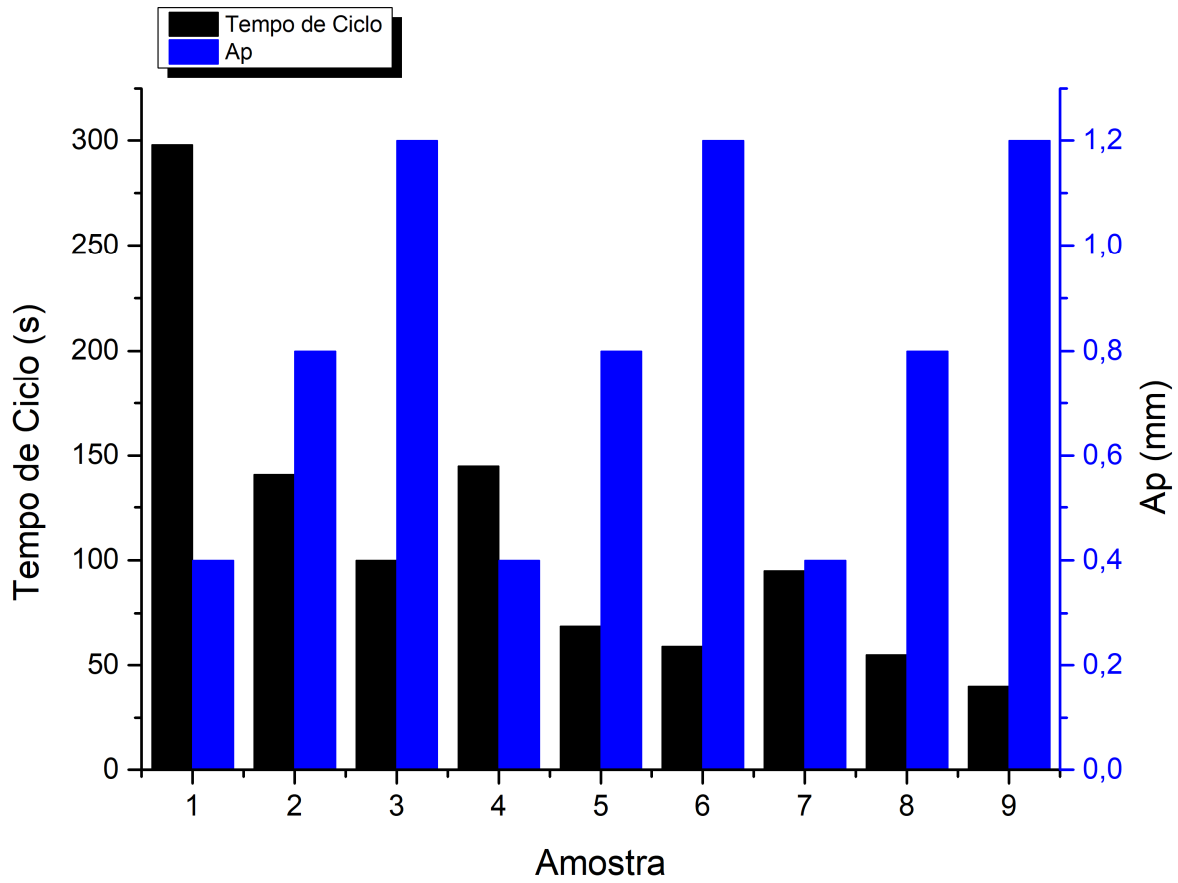


Figura 4.7 - Tempo de Ciclo x Profundidade de Corte

Fonte: Elaborado pelo autor

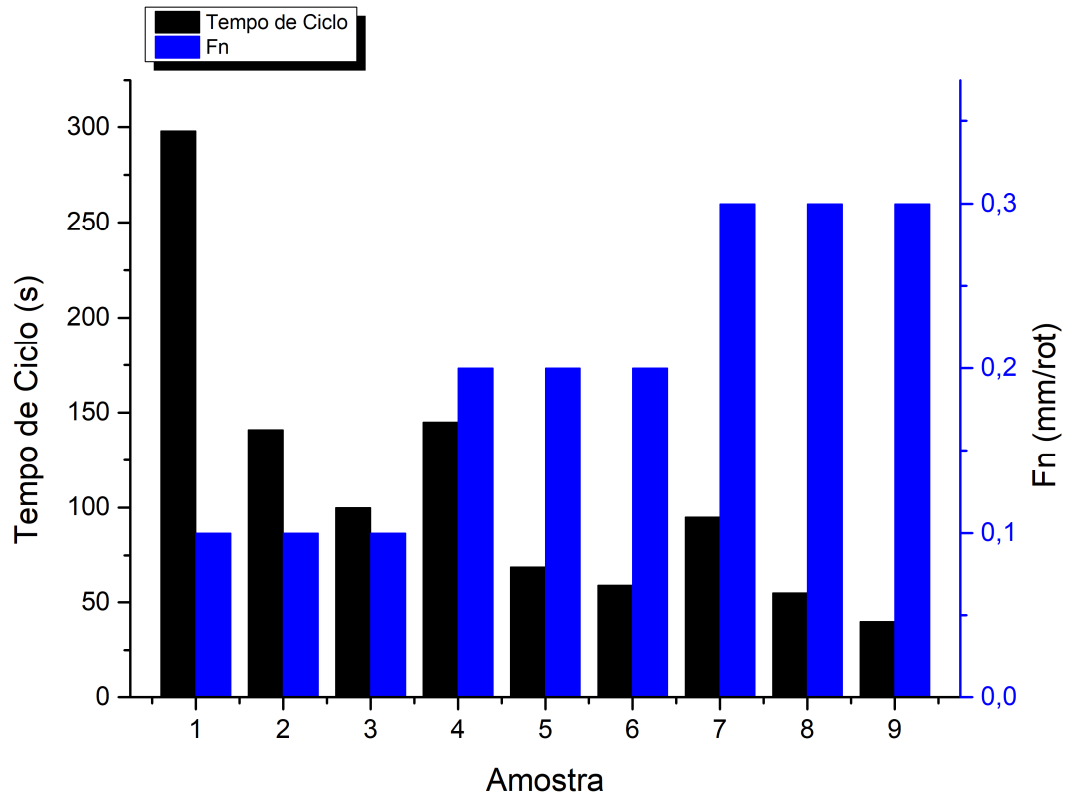


Figura 4.8 - Tempo de Ciclo x Avanço

Fonte: Elaborado pelo autor

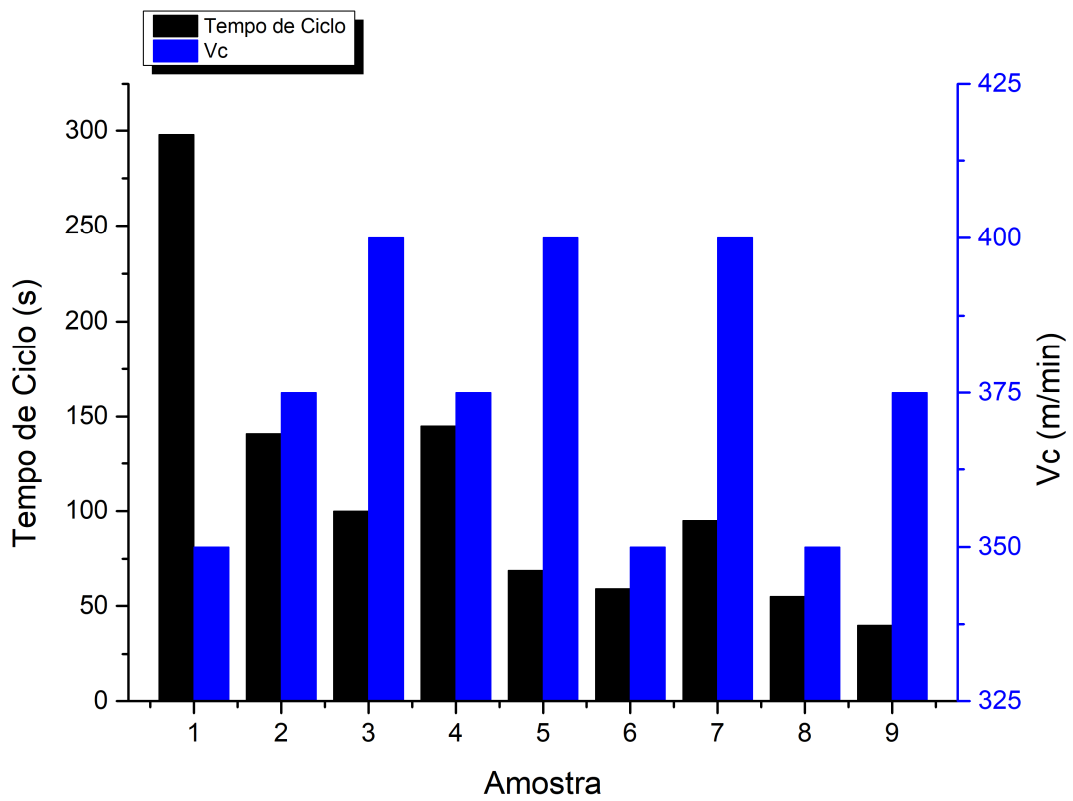


Figura 4.9 - Tempo de Ciclo x Velocidade de Corte

Fonte: Elaborado pelo autor

A avaliação por meio de tabelas e gráficos, dos resultados experimentais, não é precisa e para obter uma melhor avaliação da influência de cada parâmetro de corte no tempo de ciclo e consumo de energia foi usado a metodologia de DOE de Taguchi, conforme apresentado no capítulo anterior. Conforme apresentado no Quadro 4.11, na Figura 4.10 e na Figura 4.11, com os fatores e níveis selecionados para a análise experimental, a profundidade de corte apresentou maior influência no tempo de ciclo, seguido pelo avanço, com um grau muito próximo de influência e por último a velocidade de corte, com menor influência, como evidenciado na avaliação dos gráficos da Figura 4.7 e Figura 4.8.

Estes resultados convergem com os resultados obtidos por Bilga, Singh e Kumar (2016) que também identificaram a profundidade de corte como fator que mais influenciou na eficiência energética do processo estudado. Singaravel e Selvaraj (2016) avaliaram em seu estudo que a pressão específica de corte se reduz com o aumento do avanço, o que confirma também a grande influência do aumento do avanço na redução do consumo de energia, pois reduz a potência necessária para o corte, ou seja, com o aumento dos parâmetros de corte, a potência não aumenta na mesma proporção em que o tempo de ciclo reduz.

Quadro 4.11 - Análise DOE Taguchi

Análise Taguchi: Tempo de Ciclo versus Fn; Ap; Vc			
<i>Tabela Razão S/R <Menor é melhor></i>			
Nível	Fn	Ap	Vc
1	-44,09	-44,16	-39,9
2	-38,19	-38,47	-39,42
3	-35,82	-35,47	-38,78
Delta	8,27	8,69	1,13
Grau de Influência	2	1	3
<i>Tabela das Médias</i>			
Nível	Fn	Ap	Vc
1	179,33	179,67	137,33
2	88,33	91	108,67
3	66,33	63,33	88
Delta	113	116,33	49,33
Grau de Influência	2	1	3

Fonte: Elaborado pelo autor

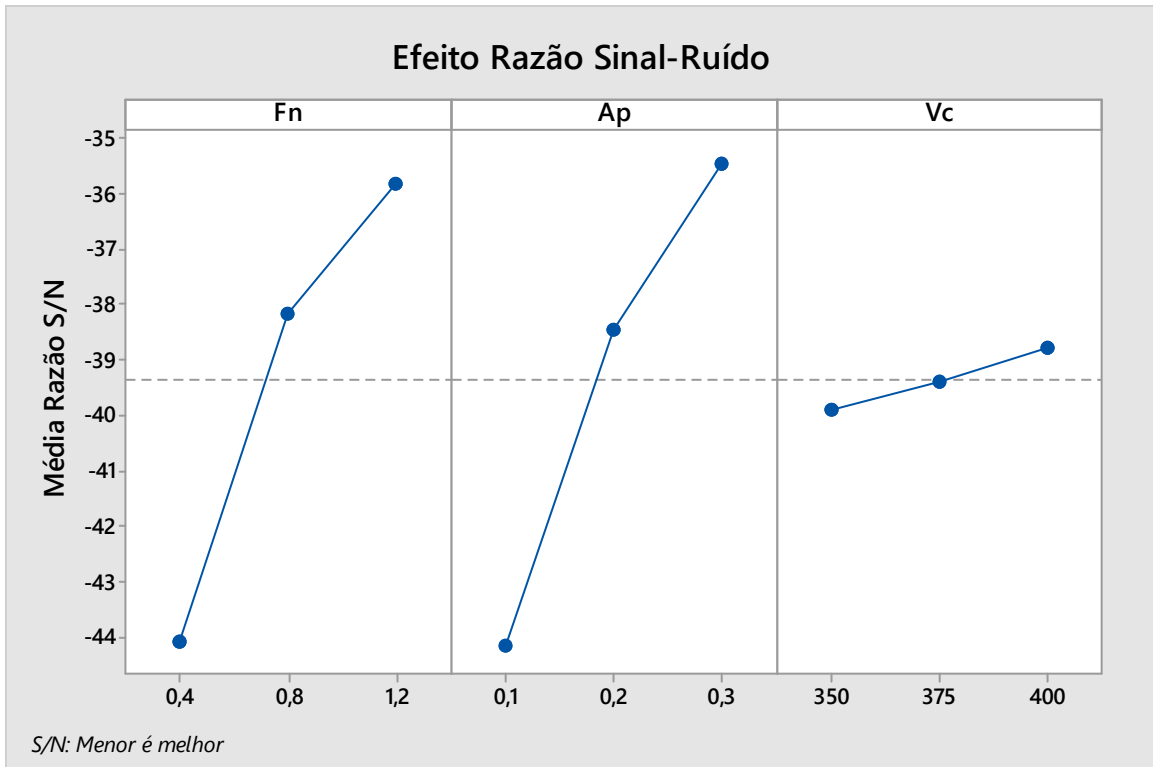


Figura 4.10 - Gráfico média Sinal/Ruído

Fonte: Elaborado pelo autor

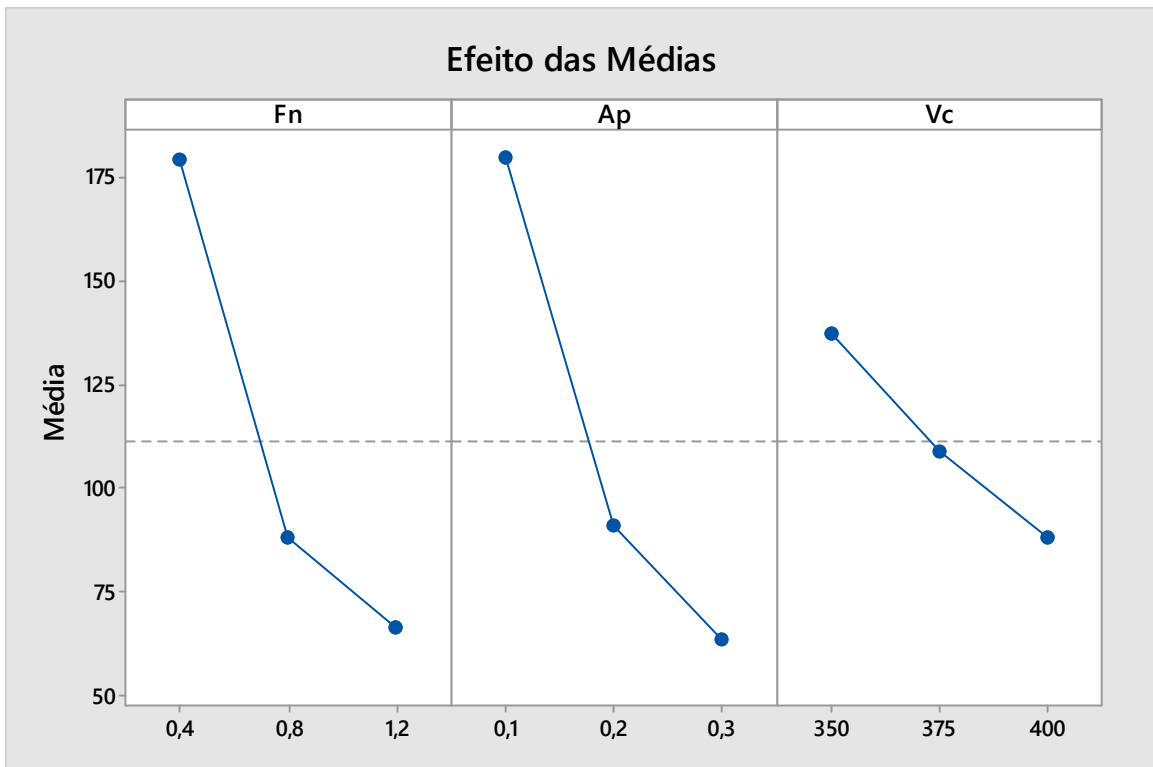


Figura 4.11 - Gráfico do efeito das médias

Fonte: Elaborado pelo autor

4.4.2 Energia específica consumida (SEC) por passe

A avaliação da energia consumida durante o processo de usinagem é importante para o estudo das melhorias a nível de processo. A energia específica consumida por passe pode ser utilizada para comparações entre diferentes parâmetros de corte no mesmo processo e contribuir para o entendimento do impacto de cada parâmetro no consumo de energia para a remoção de material. (HU et al., 2017).

Como o SEC corresponde à energia consumida para remover um determinado volume de material, os principais parâmetros que influenciam no seu valor são a profundidade de corte e o avanço. No Gráfico da Figura 4.12 é possível observar a correlação do aumento da profundidade de corte com a redução do SEC por passe. Este comportamento ocorre pela maior quantidade de material removido em menor tempo de usinagem, levando em consideração que já foi observado que o tempo de usinagem é o principal fator que contribui para o aumento do consumo de energia, devido ao alto consumo dos sistemas auxiliares.

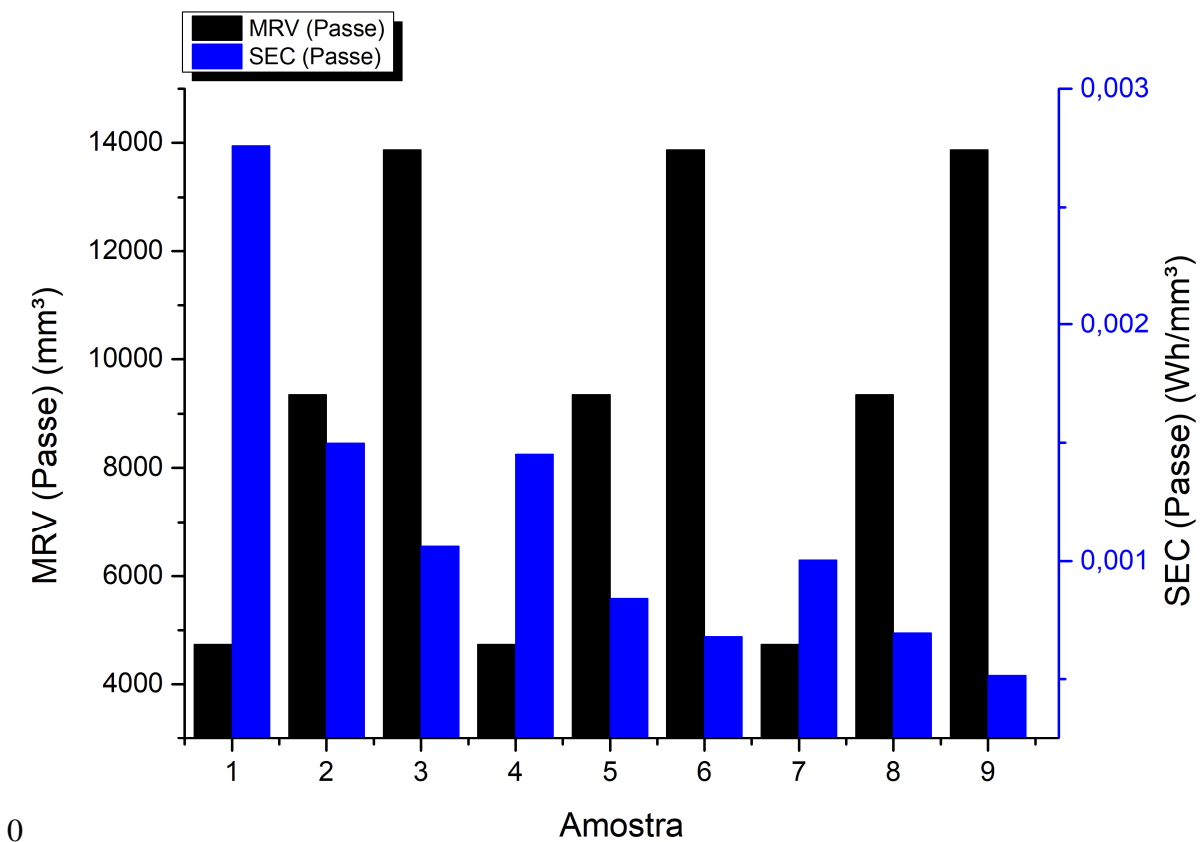


Figura 4.12 - Gráfico MRV x SEC por passe

Fonte: Elaborado pelo autor

O estudo do SEC permite comparações com outros processos, e simulações de diferentes condições de corte (LEE et al., 2017). Neste estudo, o SEC reforça os resultados apresentados nos indicadores anteriores, confirmando a importância que o tempo de processamento representa para este processo de usinagem.

4.4.3 Eficiência da máquina

Indicadores de eficiência do equipamento são importantes, pois podem indicar o uso de máquinas superdimensionadas para o processo, ou até mesmo uma sobrecarga na máquina, com condições de corte muito severas.

A Figura 4.13 e a Figura 4.14 apresentam o indicador de eficiência da máquina, ou seja, quanto da energia consumida está sendo utilizada para remoção de material. Na Figura 4.13 é possível observar a energia total (energia direta) para a usinagem de uma peça e a energia da operação em vazio (sem corte). É possível observar que a melhor eficiência da máquina é obtida com as condições de corte mais severas, na amostra 9 com 43,6% da energia total sendo utilizada para remover material. Já nas condições menos severas, a eficiência cai, chegando a 12,99% no caso da amostra 1 que tem as condições de corte mais brandas. Isto ocorre, pois em condições menos severas de corte, o consumo fixo de energia é muito alto, em relação à energia consumida para o corte e acaba prejudicando o resultado do indicador. Já em condições de corte mais severas, maior parte da energia consumida pela máquina é empregada para remoção de material, tornando o processo mais eficiente, mesmo que o consumo total seja maior.

Wang, Liu e Li (2013) apresentaram um indicador semelhante com o resultado de eficiência de 59,9% para um torno CNC e de 42,95% para um torno convencional, destacando a importância deste indicador na avaliação da máquina mais adequada a realizar tal operação.

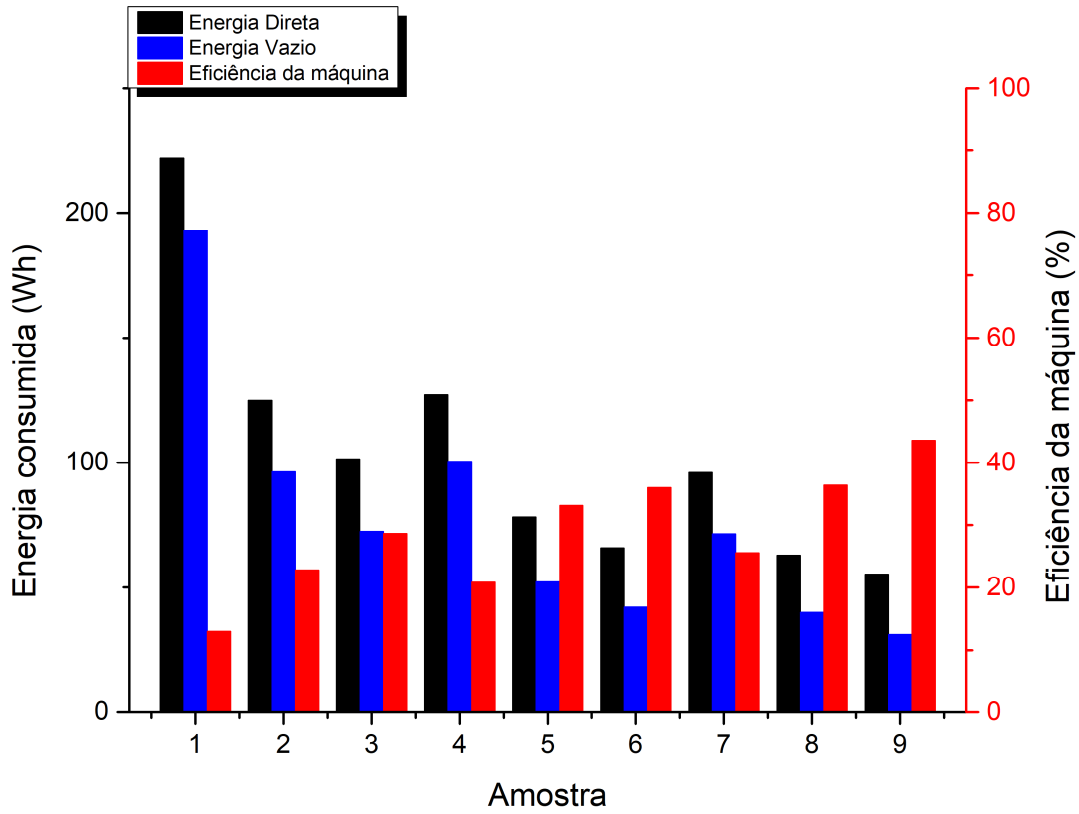


Figura 4.13 - Eficiência da máquina x Energia consumida

Fonte: Elaborado pelo autor

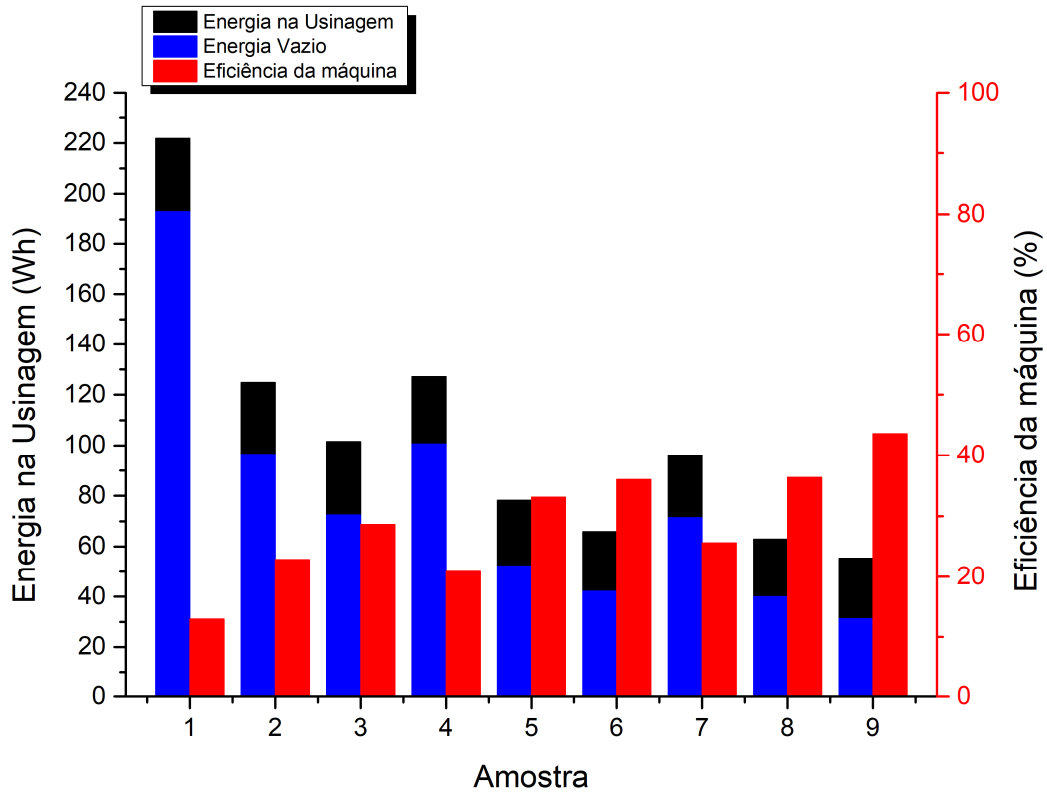


Figura 4.14 - Eficiência da máquina x Energia no corte

Fonte: Elaborado pelo autor

4.4.4 Energia específica consumida (SEC) do processo

A energia específica consumida do processo é um indicador para avaliação do consumo de energia em comparação com outros processos, diferentes materiais e geometrias a serem fabricadas. Uma avaliação experimental que comparasse diferentes materiais ou geometrias de peças obteria resultados mais claros para evidenciar a aplicação deste indicador, porém como no presente trabalho não houve alteração em outras variáveis do processo além dos parâmetros de corte, os resultados aqui apresentados são muito parecidos com os resultados dos indicadores anteriores. Hu et al. (2017) construiu um modelo de avaliação e comparação de processos de usinagem baseados na SEC para realizar a avaliação dos processos pelo sequenciamento das operações.

A Figura 4.15 mostra a correlação entre o volume de material removido, representado pela AP, e a redução do SEC da peça ao passo que o AP é aumentado. Obviamente existem outros fatores, como F_n e V_c que contribuem para este comportamento, porém como já foi visto em indicadores anteriores, o principal varável para um aumento da eficiência é a profundidade de corte.

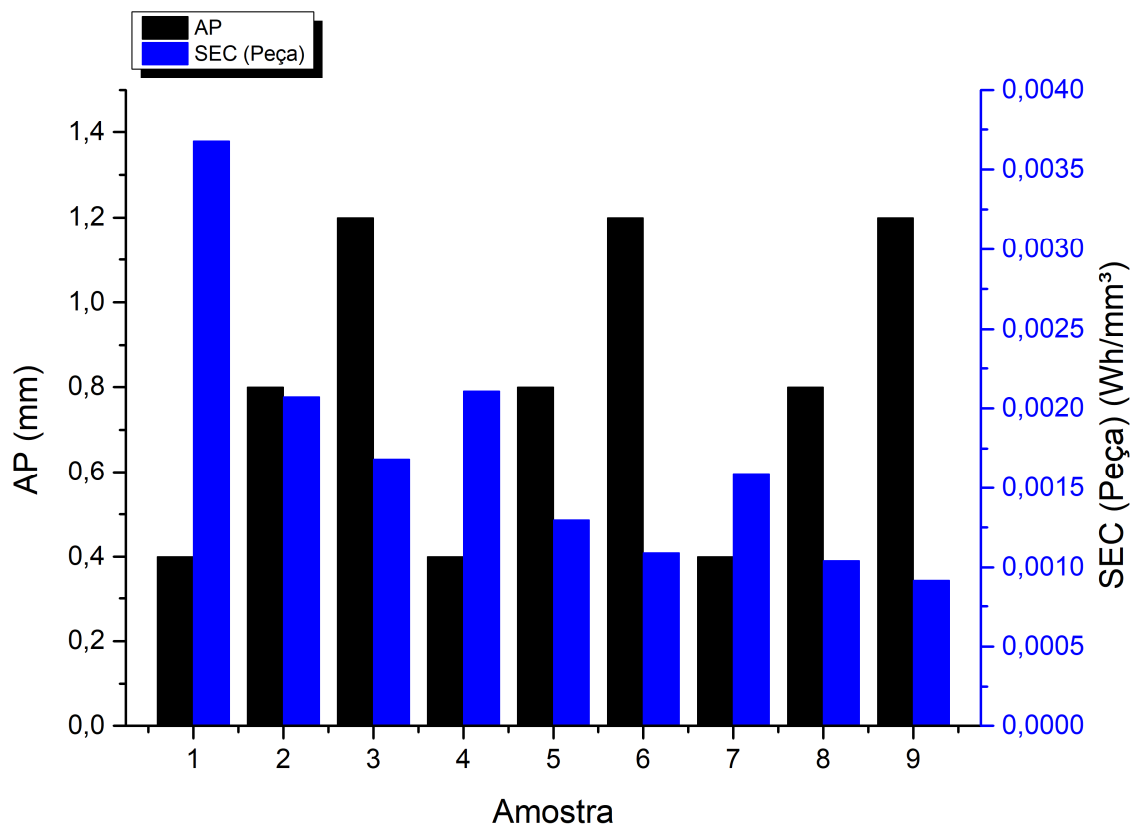


Figura 4.15 - Gráfico Ap x SEC

Fonte: Elaborado pelo autor

Indicadores que podem ser usados em comparações entre processos ou benchmarking são importantes para a melhoria de processos, pois possibilitam a identificação de falhas na escolha dos parâmetros de corte. Com valores base para comparação, os operadores podem evitar o uso de parâmetros exagerados para o processo e são direcionados a buscar valores mais razoáveis para se obter melhor eficiência energética no processo (CAI et al., 2017b).

4.4.5 Eficiência energética na Qualidade

O indicador de eficiência energética na qualidade é um componente do EOEE e apresenta a eficiência energética do processo em relação à qualidade. Sendo assim, este indicador aponta as perdas em energia vinculadas à produção de peças ruins que não geram valor para a empresa. O estudo experimental proposto simulou duas situações diferentes de um processo contínuo de produção e o reflexo do aumento da qualidade pode ser visto na avaliação abaixo.

A Figura 4.16 e a Figura 4.17 apresentam os gráficos do indicador de qualidade para o cenário 1 e para o cenário 2, respectivamente. Devido ao fato de que em cada experimento foi proposto um valor de qualidade fixo, 90% para o cenário 1 e 99% para o cenário 2, os resultados deste indicador trazem valores praticamente constantes para cada amostra com diferentes parâmetros de corte.

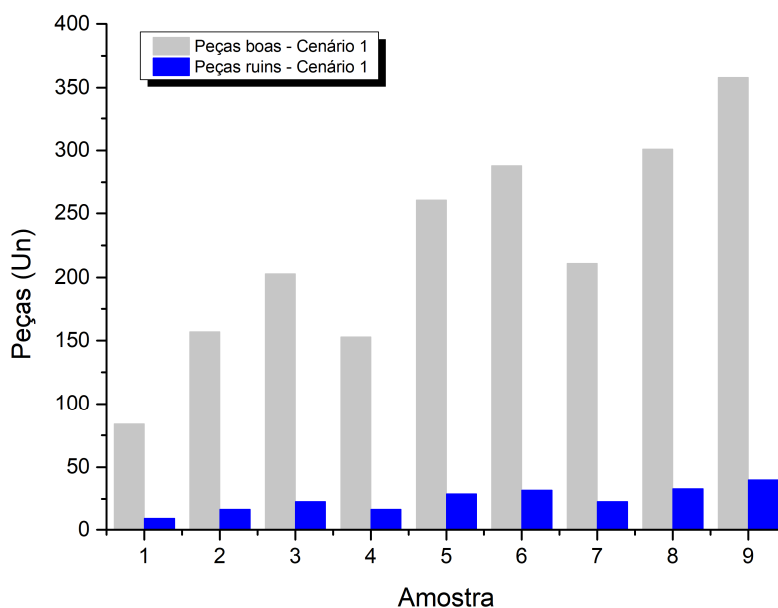


Figura 4.16 - Indicador de Qualidade para o cenário 1 – Peças boas x Peças ruins

Fonte: Elaborado pelo autor

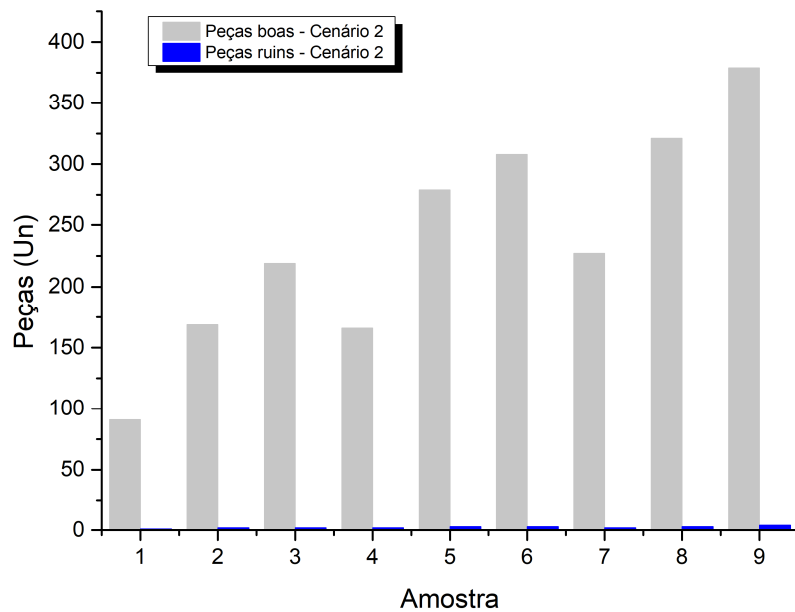


Figura 4.17 - Indicador de Qualidade para o cenário 2 – Peças boas x Peças ruins

Fonte: Elaborado pelo autor

O objetivo do experimento era comparar o resultado do aumento da qualidade na eficiência energética do processo, tendo em vista que a inserção de um evento de medição provocaria uma redução no tempo de usinagem, com isso a quantidade total de peças seria reduzida e ocorreria um aumento da qualidade, ou seja, a tendência era ter maior quantidade de peças boas no cenário 2 comparando com o cenário 1.

Figura 4.18 mostra a comparação da energia consumida por peça contabilizando apenas para peças boas, ou seja, a energia consumida para fabricar peças ruins foi dividida pelo número de peças boas. Com isto, nas circunstâncias deste experimento, a energia específica para o cenário 2, onde existem intervenções e paradas para medição é menor, o que representa melhor eficiência energética. Para este caso é possível afirmar que em termos de consumo energético, é melhor trabalhar com menor capacidade de produção desde que as ações que causaram a redução da produtividade gerem benefícios na qualidade, em uma avaliação do ponto de vista de estratégia competitiva.

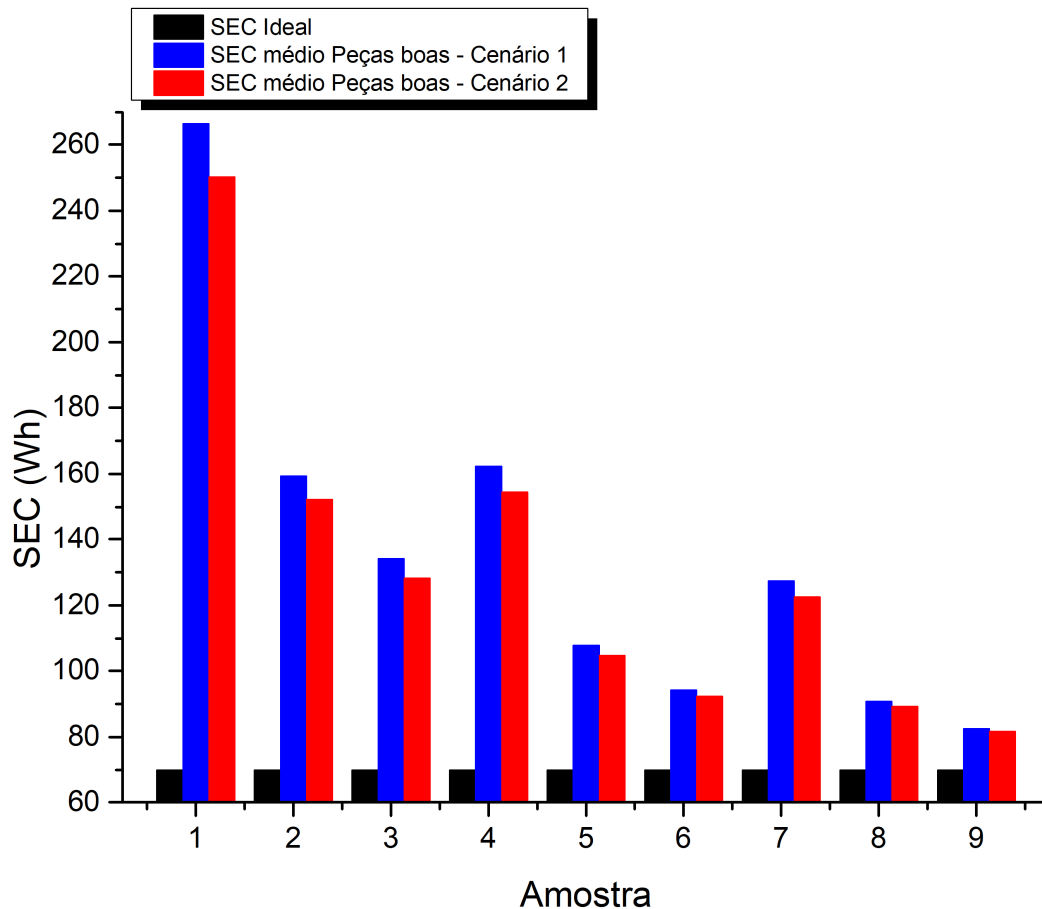


Figura 4.18 - Comparativo de SEC cenário 1 e 2

Fonte: Elaborado pelo autor

4.4.6 Eficiência energética no Desempenho

O indicador de desempenho apresenta o resultado da produção em relação a produtividade. Este indicador é influenciado pelas pequenas paradas para medição, ajustes e troca de ferramentas ou por perdas em velocidade, ou seja, a operação não é realizada na velocidade ideal, ou planejada.

A Figura 4.19 apresenta o resultado do indicador de eficiência energética no desempenho, comparando o cenário 1 com o cenário 2. É possível avaliar que o cenário 1 apresenta melhor desempenho, pois não existem as paradas para medição, porém este indicador não leva em consideração os resultados de qualidade, ou seja, os ganhos com melhoria de eficiência energética na qualidade não se refletem nesta avaliação. O Gráfico também apresenta o comparativo entre o SEC Ideal, que é a referência de eficiência do processo, e o SEC efetivo para cada amostra nos dois cenários. Com isto é possível ver um grande impacto de SEC no

desempenho, ou seja, neste caso a principal causa de perdas em produtividade é relacionada a situações de produção, como pode ser visto no próximo parágrafo.

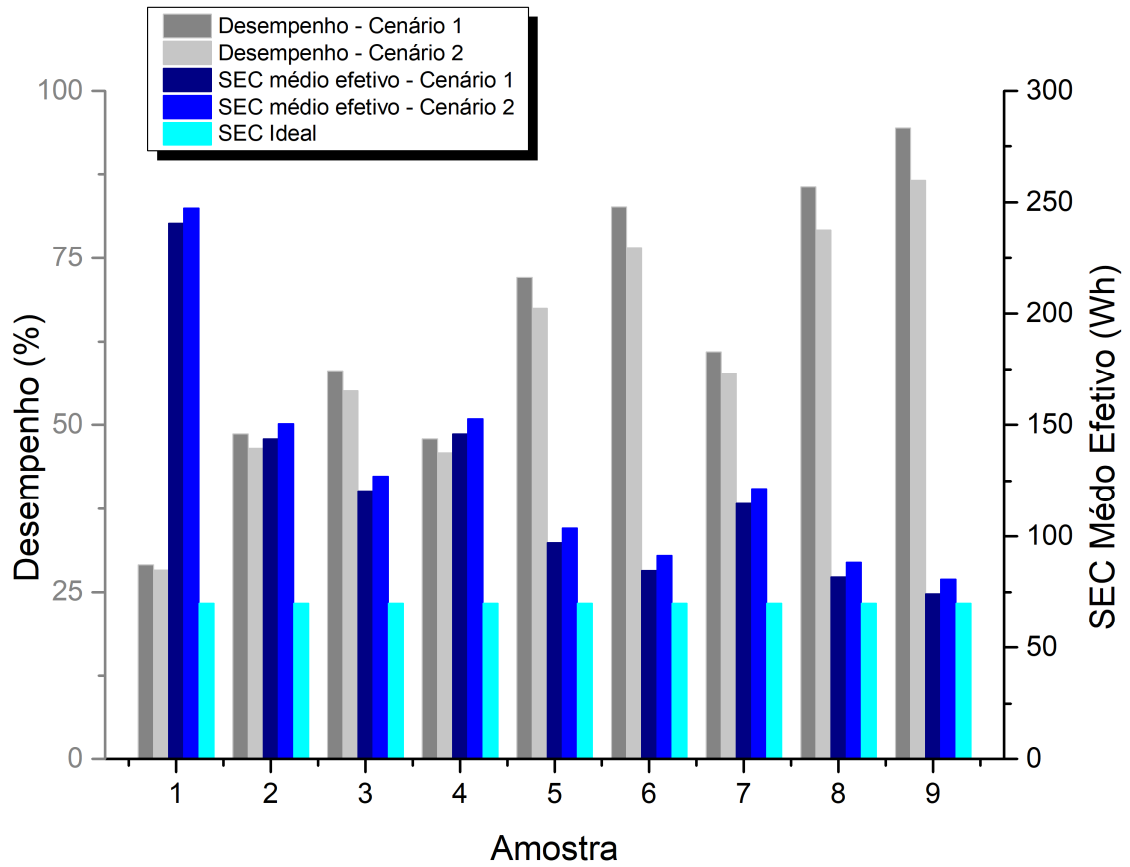


Figura 4.19 - Gráfico Desempenho x SEC nos cenários 1 e 2

Fonte: Elaborado pelo autor

O indicador de desempenho apresentado na Figura 4.20 representa a amostra 1 para o cenário 1. O gráfico mostra que de toda energia utilizada, apenas 2% foi consumida em paradas, ou seja, a maior parte da energia foi consumida em produção.

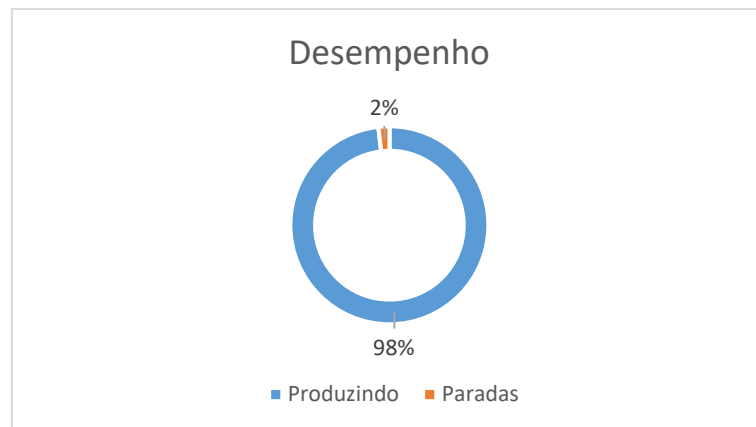


Figura 4.20 - Indicador de Desempenho

Fonte: Elaborado pelo autor

Detalhando melhor os resultados na Figura 4.21, dos 2% de energia consumida no turno, apenas 0,43% foi em perdas por ociosidade.

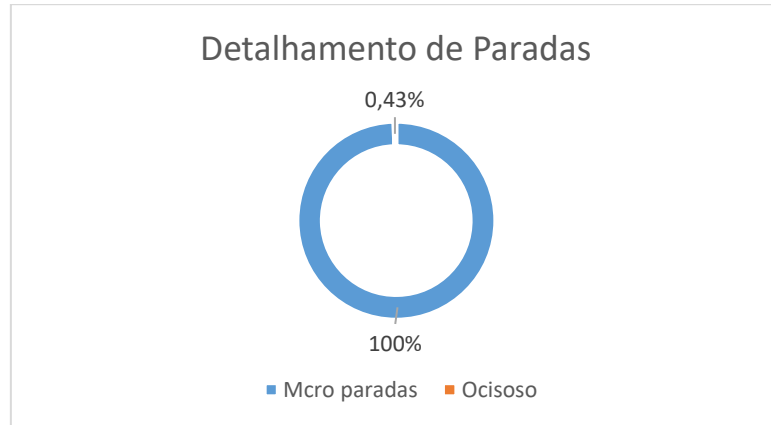


Figura 4.21 - Detalhamento das paradas

Fonte: Elaborado pelo autor

Observando o desempenho das 9 amostras nos cenários é possível ver uma grande variação, sendo que nos casos em que o tempo de ciclo é maior, o desempenho é menor, conforme a Figura 4.22.

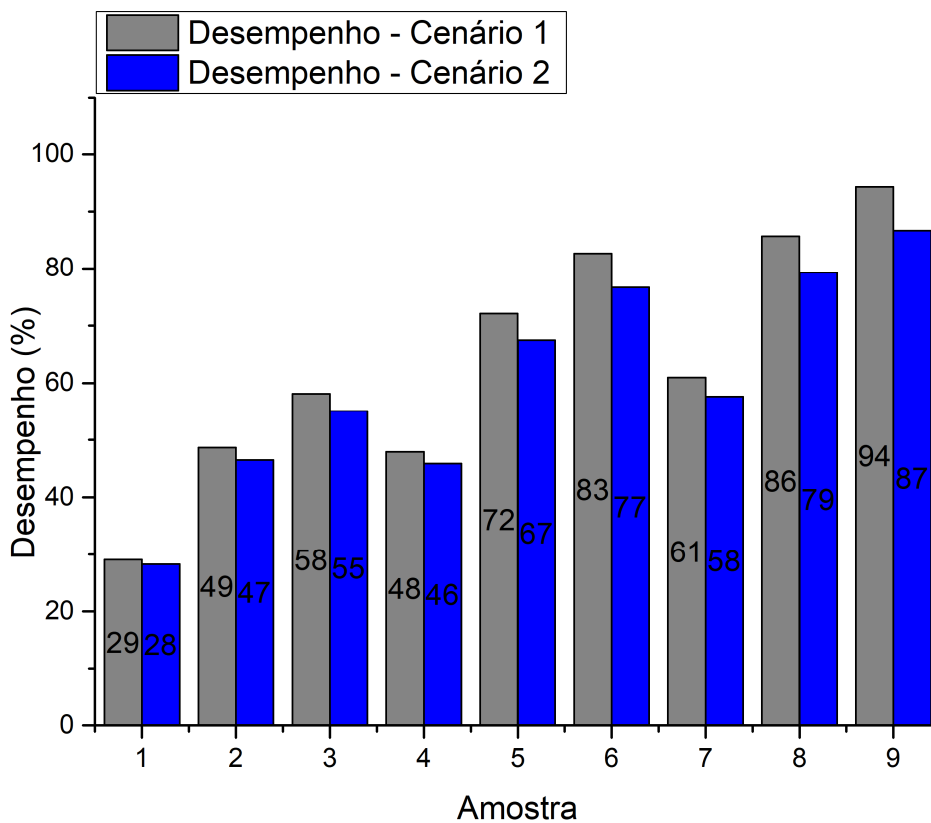


Figura 4.22 - Gráfico do Desempenho para cada amostra nos cenários 1 e 2

Fonte: Elaborado pelo autor

Observando a Figura 4.23, onde estão representados o melhor caso, amostra 9, e o pior caso, amostras 1, comparados com o SEC Ideal, é possível entender o que está influenciando nos valores de desempenho do indicador, ou seja, o consumo da amostra 1 está muito acima do consumo ideal para se fabricar 1 peça, com isto o desempenho é muito baixo, aproximadamente 29% para os dois cenários. Já na amostra 9, em que seu tempo de ciclo multiplicado pela potência gerou o SEC Ideal, tem valores de consumo efetivo muito próximo ao ideal, assim o desempenho é relativamente alto, chegando a aproximadamente 94% para o cenário 1.

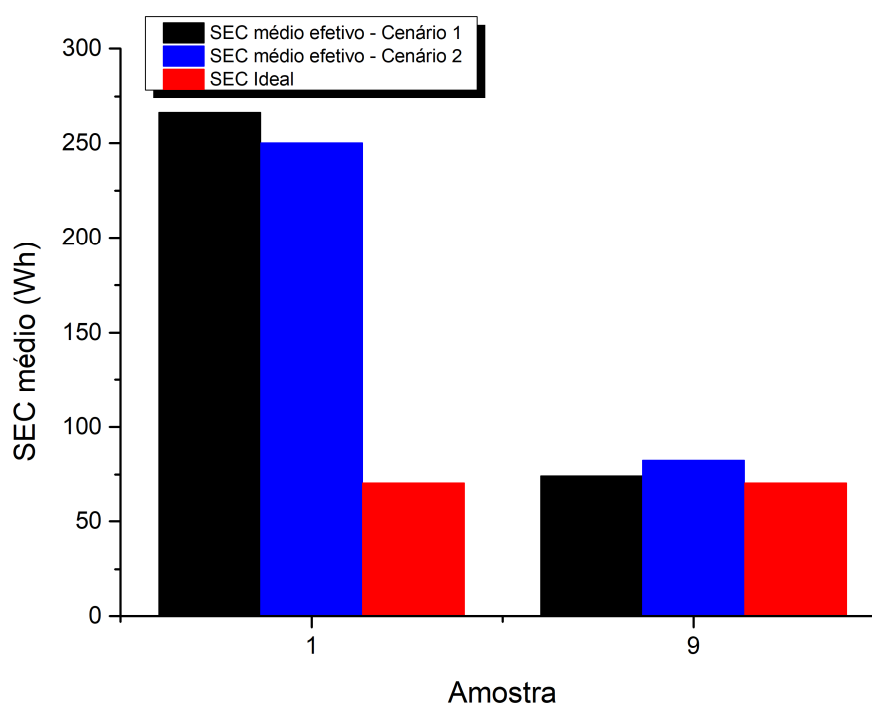


Figura 4.23 - SEC médio x SEC ideal para as amostras 1 e 9

Fonte: Elaborado pelo autor

É possível afirmar que este indicador não aponta diretamente as causas de perdas e desperdício de energia, porém indica que existe alguma divergência entre o que está sendo realizado do que foi planejado. Com isto, é necessário investigar os números em busca do fator que está comprometendo o resultado do indicador.

4.4.7 Eficiência energética na Disponibilidade

Segundo May et al. (2015), o indicador de Eficiência energética na disponibilidade difere do indicador de disponibilidade baseado no tempo. O indicador baseado no consumo de energia pode ser alto enquanto o indicador baseado em tempo pode ter valor mais baixo.

Observando os resultados apresentados na Figura 4.24 é possível observar que depende do estado da máquina no momento do evento que afeta a disponibilidade, ou seja, para duas paradas de manutenção com mesma duração e caso uma seja feita com a máquina desligada, isto afetaria muito pouco o resultado do indicador. Já em uma parada com a máquina ligada, dependendo do consumo no estado da máquina, este indicador de eficiência teria seu valor afetado para baixo. Em contrapartida, no indicador baseado no tempo, é exclusivamente dependente da duração do evento, então se as condições de energia da máquina forem diferentes nada influenciam neste indicador. A Figura 4.24 mostra a comparação dos resultados do indicador de Disponibilidade para energia e para tempo. Nos casos A e B de energia, existe variação devido à o fator de consumo da máquina, pois na situação A a máquina está ligada com uma potência de 1670W e no caso B está totalmente desligada. Em contrapartida, no caso do indicador baseado em tempo, leva em consideração apenas o caráter temporal.

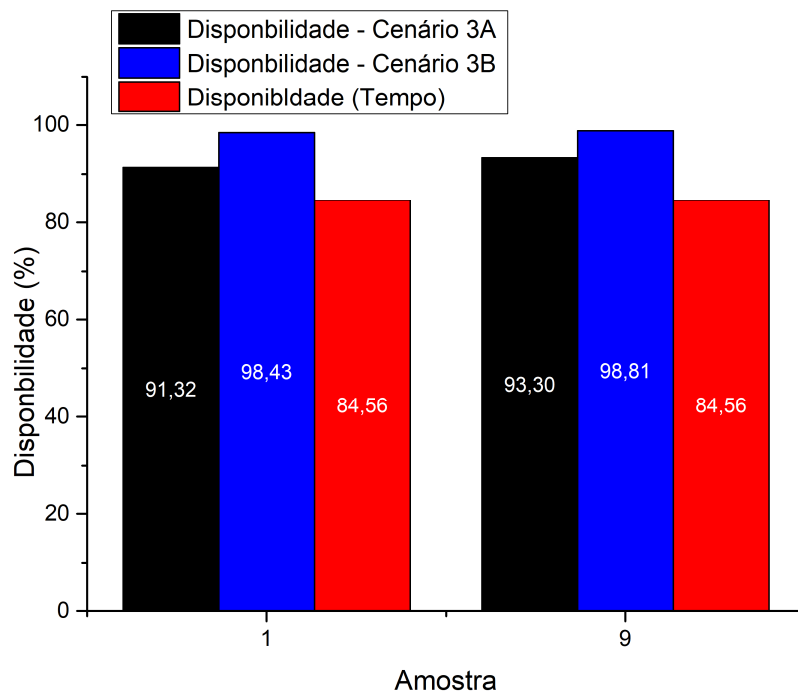


Figura 4.24 - Indicador de Disponibilidade (Base Energia x Base Tempo)

Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 4.25 apresenta o resultado do Indicador de Eficiência energética na Disponibilidade para os cenários 1 e 3 para todas as amostras. Como as condições de energia são praticamente iguais, os resultados não se alteram de amostra para amostra, variando apenas para os diferentes cenários.

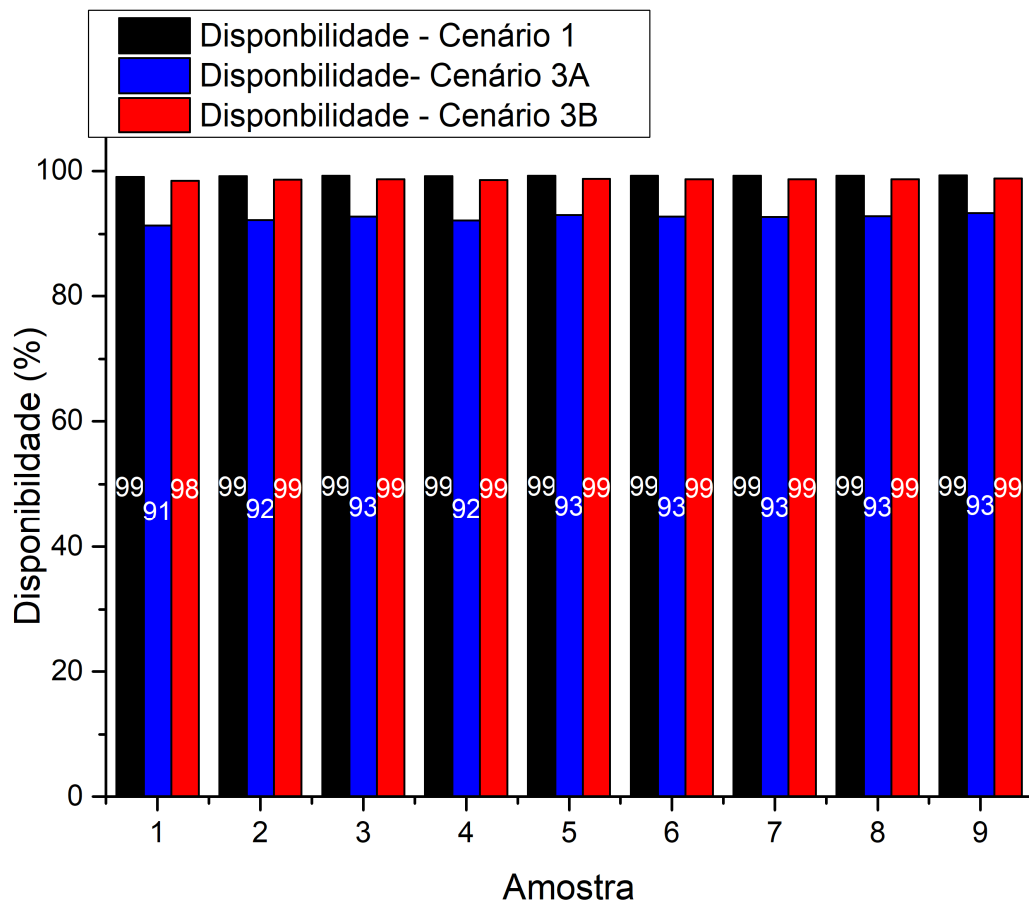


Figura 4.25 - Indicador de Disponibilidade

Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme Barletta et al. (2014), o indicador de disponibilidade não é o indicador mais importante para a avaliação energética, mas seu resultado não deve ser desconsiderado, pois é um indicador necessário para a formação do Indicador de EOEE.

4.4.8 EOEE

O indicador EOEE é uma releitura do OEE baseado no consumo de energia e não em tempo de eventos de produção. Segundo (MAY et al., 2015), este indicador supre a necessidade de indicadores de eficiência energética que relacionem o consumo de energia com os eventos da produção, propriedade que os indicadores agregados tradicionais não atendem.

Como pode ser visto nos resultados abaixo, o indicador de EOEE é afetado igualmente pelos 3 indicadores que o geram, qualidade, eficiência e disponibilidade. A Figura 4.26 apresenta os resultados das amostras 1 e 9 para todos os cenários estudados, sendo amostra 1 para

o pior resultado e EOEE e amostras 9 para o melhor resultado. Os resultados do cenário 1 mostram que para o experimento proposto, o índice de eficiência é o que mais influencia o resultado do EOEE para baixo e como foi visto na discussão dos outros indicadores, a qualidade e a disponibilidade dependendo das circunstâncias do experimento, e praticamente se mantêm constantes para as 9 amostras dentro do mesmo cenário.

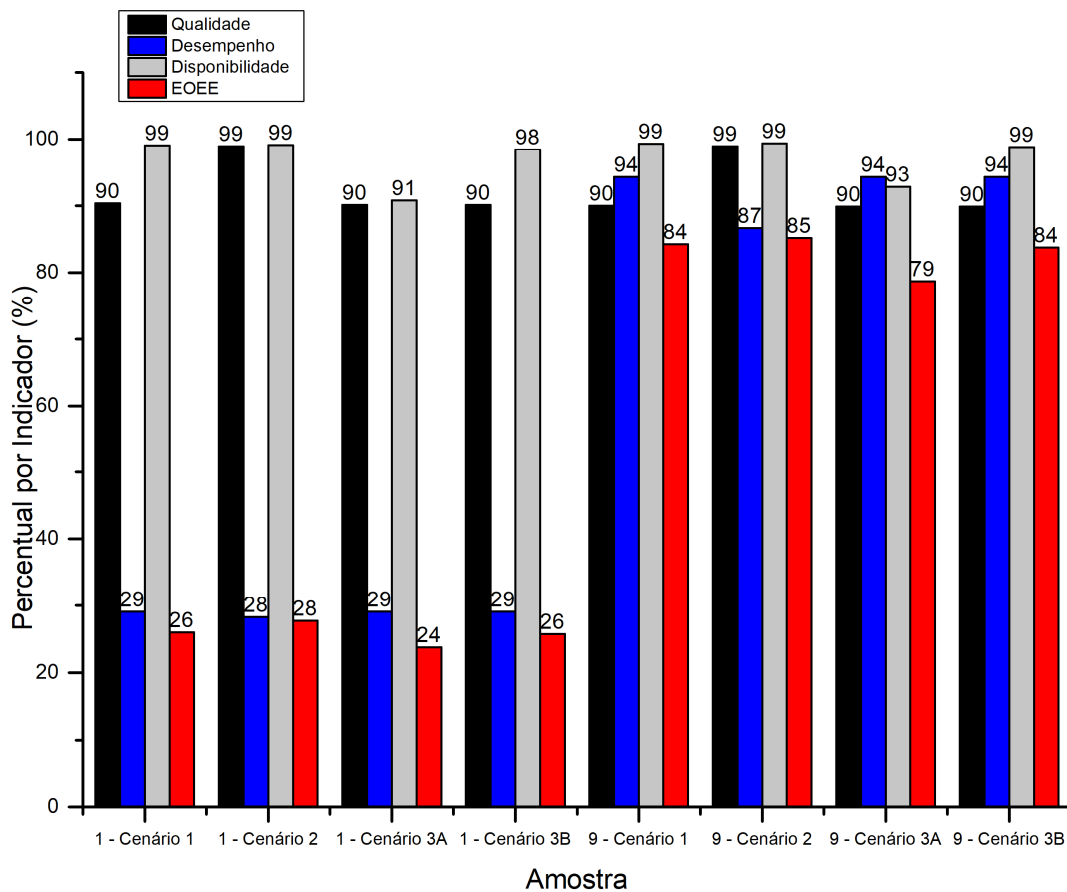


Figura 4.26 - Indicadores para as amostras 1 e 9 em todos os cenários

Fonte: Elaborado pelo autor

O indicador de EOEE, assim como o OEE, tem por objetivo apresentar uma visão geral da efetividade de uso dos recursos baseado na energia, para o primeiro, e no tempo, para o segundo. Com isto, é uma ferramenta para melhoria de processo e aponta quais aspectos do processo devem ser melhorados (BARLETTA et al., 2014) (IANNONE; NENNI, 2013).

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram propostos e estudados indicadores de eficiência energética desenvolvidos com base em dados provenientes de um sistema de monitoramento de energia e que podem ser utilizados juntamente com um sistema de monitoramento de produtividade, para a usinagem. Os indicadores selecionados foram avaliados visando atender alguns objetivos pré-estabelecidos e foram submetidos a uma avaliação experimental, em que dados de monitoramento de energia foram extraídos com um sistema de monitoramento em uma operação de usinagem. Estes dados alimentaram os indicadores selecionados, os resultados foram discutidos e foi possível realizar algumas considerações sobre a efetividade dos indicadores para a aplicação proposta.

Após o estudo dos principais indicadores de eficiência energética para manufatura foram selecionados oito que melhor atendiam os objetivos pré-definidos. Os oito indicadores se enquadram nos três níveis da manufatura abordados no trabalho, Produto, Processo e Produção, e podem ser aplicados juntamente com um sistema de monitoramento de produção.

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os ensaios experimentais realizados para a criação de uma base de dados mostraram que dos oito indicadores estudados, o de maior relevância individual para uma avaliação de eficiência energética é o indicador 1 - Energia Direta. Este é o indicador base de todo estudo de consumo de energia para a fabricação de produtos. A partir dele podem ser realizados estudos e simulações para melhoria da eficiência energética no processo, como o exemplo da obtenção do parâmetro de corte que mais influencia na eficiência energética. O resultado do estudo deste indicador apontou que o tempo de ciclo do processo é o principal fator para a eficiência energética e a profundidade de corte, seguida pelo avanço, é o parâmetro dominante para a redução do consumo de energia no processo. Os indicadores 2 – SEC por passe e 4 – SEC do processo, se mostram importantes para *benchmarking* e avaliação comparativa com processos diferentes. Neste trabalho, pela característica da avaliação experimental, o benefício que estes indicadores podem trazer não ficaram evidentes e podem ser considerados como menos importantes em relação aos resultados apresentados. Ou seja, estes indicadores não são relevantes em casos de estudo de um único processo.

Em relação aos indicadores de produção, o indicador 5 – Eficiência Energética na Qualidade, apresenta grande importância para entender as perdas energéticas no processo produtivo, principalmente o custo energético despendido com peças rejeitadas. Apesar de os resultados do indicador de qualidade do ponto de vista energético serem muito parecidos com os resultados de qualidade no ponto de vista produtivo, este indicador é importante para apontar que quando um processo possui menor percentual de qualidade, não existem apenas desperdício de matéria-prima, tempo de máquina e mão-de-obra, mas também desperdício de energia que foi utilizada na fabricação de peças que não geraram valor agregado.

No que se refere ao indicador 6 – Eficiência Energética no Desempenho, a nível de Produção é o indicador que melhor caracteriza o trabalho, pois apresenta resultados cumulativos em relação ao indicador 1, ou seja, em uma produção em série o consumo de energia se soma e fica mais evidente o desperdício de energia quando os parâmetros de corte não estão otimizados. Comparando os resultados do Cenário 1, em que a eficiência energética no desempenho do pior caso é de aproximadamente 29%, já no melhor caso é de 94%. Estes resultados comprovam a importância deste trabalho e mostram que um monitoramento de energia pode trazer grandes benefícios às empresas de manufatura se utilizarem os indicadores corretos.

Por fim, o indicador 8, EOEE, apresenta o resultado composto dos três indicadores à nível de produção. O EOEE apresenta uma visão geral do consumo de energia em relação ao sistema produtivo e pode trazer um indicativo que há algo errado no processo e deve ser investigado. Assim como no ponto de vista da produtividade, este indicador não apontará a origem das perdas e desperdícios, mas é o primeiro indicador a ser avaliado para entender o estado atual do processo.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar o uso dos indicadores aplicados em um cenário real de chão de fábrica para poder avaliar os resultados, realizar melhorias nos processos com base nos indicadores e posteriormente replicar os ensaios para comparar os resultados de antes e depois da aplicação da metodologia;
- Realizar um estudo do impacto financeiro que a redução do consumo de energia pode gerar a partir dos indicadores apresentados no presente trabalho;

- Avaliar outras variáveis desconsideradas no trabalho, como as forças de corte e o desgaste da ferramenta, bem como suas respectivas influências nos resultados apresentados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABELE, E.; PANTEN, N.; MENZ, B. Data collection for energy monitoring purposes and energy control of production machines. **Procedia CIRP**, v. 29, p. 299–304, 2015.
- AL-HAZZA, M. H. F. et al. Energy Cost Modeling for High Speed Hard Turning. v. 11, n. 14, p. 2578–2584, 2011.
- ALVANDI, S. et al. **Hierarchical modelling of complex material and energy flow in manufacturing systems**. 22nd CIRP conference on Life Cycle Engineering. **Anais...**2015
- ANDERSSON, C.; BELLGRAN, M. On the complexity of using performance measures: Enhancing sustained production improvement capability by combining OEE and productivity. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 35, p. 144–154, 2015.
- APOSTOLOS, F.; ALEXIOS, P.; GEORGIOS, P. **Energy Efficiency of Manufacturing Processes : A Critical Review**. Conference on Manufacturing Systems 2013. **Anais...**Elsevier B.V., 2013Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2013.06.044>>
- BALOGUN, V. A.; MATIVENGA, P. T. Modelling of direct energy requirements in mechanical machining processes. **Journal of Cleaner Production**, v. 41, p. 179–186, 2013.
- BARLETTA, I. et al. **Assessing a Proposal for an Energy-based Overall Equipment Effectiveness Indicator through Discrete Event Simulation**. Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference. **Anais...**2014
- BARLETTA, I. G. **Una Metodologia Cross View di Sviluppo di Key Performance Indicator di Efficienza Energetica**. [s.l.] POLITECNICO DI MILANO, 2012.
- BIERER, A.; GÖTZE, U. Energy Cost Accounting: Conventional and Flow-oriented Approaches. **Journal of Competitiveness**, v. 4, n. 2, p. 128–144, 2012.
- BILGA, P. S.; SINGH, S.; KUMAR, R. Optimization of energy consumption response parameters for turning operation using Taguchi method. **Journal of Cleaner Production**, v. 137, p. 1406–1417, 2016.
- BLACK, J. T.; KOHSER, R. A. **DeGarmo's Materials and Processes in Manufacturing**. 11. ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2011.
- BOUGAIN, S. et al. **Towards energy management in production planning software based on energy consumption as a planning resource**. 12th Global Conference on Sustainable Manufacturing. **Anais...**2015
- BOYD, G.; DUTROW, E.; TUNNESSEN, W. The evolution of the ENERGY STAR energy performance indicator for benchmarking industrial plant manufacturing energy use. **Journal of Cleaner Production**, v. 16, p. 709–715, 2008.
- BUNSE, K. et al. Integrating energy efficiency performance in production management - Gap analysis between industrial needs and scientific literature. **Journal of Cleaner Production**, v. 19, n. 6–7, p. 667–679, 2011.
- BUNSE, K.; SACHS, J.; VODICKA, M. **Evaluating Energy Efficiency Improvements in Manufacturing Processes**. Advances in Production Management Systems. New Challenges, New Approaches. **Anais...**Boston: Springer, 2010
- CAI, W. et al. A tool for assessing the energy demand and efficiency of machining systems: Energy benchmarking. **Energy**, v. 138, p. 332–347, 2017a.
- CAI, W. et al. An energy management approach for the mechanical manufacturing industry through developing a multi-objective energy benchmark. **Energy Conversion and**

Management, v. 132, p. 361–371, 2017b.

CAI, W. et al. Energy performance certification in mechanical manufacturing industry: A review and analysis. v. 186, n. January, p. 415–432, 2019.

CERVELIN, J. E. **Estudo teórico-experimental das forças de corte no processo de torneamento**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2009.

COSTA, L. G. DA. **Benchmarking Da Sustentabilidade: Um Método Para Diagnóstico De Práticas E Performances Aplicado Ao Gerenciamento Do Final Do Ciclo De Vida De Produtos Eletrônicos**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

DELGADO MONTES, M. L. **Mapeamento e Avaliação do Consumo de Energia na Fase de Uso de uma Máquina-Ferramenta visando a Sustentabilidade**. [s.l.] UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2012.

DENG, Z. et al. Optimization of process parameters for minimum energy consumption based on cutting specific energy consumption. **Journal of Cleaner Production**, v. 166, p. 1407–1414, 2017.

EPE. **Nota técnica DEA 14/10: Avaliação da eficiência energética na indústria e nas residências**Rio de Janeiro, 2010.

FARLA, J.; BLOK, K.; SCHIPPER, L. Energy efficiency developments in the pulp and paper industry A cross-country comparison using physical production data. **Energy Policy**, v. 25, n. 97, p. 745–758, 1997.

FAVORIT AÇOS ESPECIAIS. **Aço DIN 11SMn30 ~ 1213**. Disponível em: <<http://www.favorit.com.br/produtos/acos-ressulfurados/aco-din-11smn30-1213>>. Acesso em: 2 fev. 2019.

FIESC. **Competitividade das Tarifas de Energia Elétrica no Mercado Regulado para Indústria Catarinense**. Florianópolis: [s.n.].

FRIEDRICH, K. **Energy Key Performance Indicators - A European Benchmark and Assessment of Meaningful Indicators for the Use of Energy in Large Corporations**. [s.l.] NHH – Norges Handelshøyskole / HEC Paris – Hautes Études Commerciales de Paris, 2013.

GROOVER, M. P. **Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems**. 5. ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2012.

HU, L. et al. Minimising the machining energy consumption of a machine tool by sequencing the features of a part. **Energy**, v. 121, p. 292–305, 2017.

IANNONE, R.; NENNI, M. E. Managing OEE to Optimize Factory Performance. In: SCHIRALDI, M. (UNIVERSITY OF R. T. V. (Ed.). **Operations Management**. [s.l.] IntechOpen, 2013. p. 31–50.

IEA. **Mind the Gap: Quantifying Principal-Agent Problems in Energy Efficiency**. Paris: IEA - International Energy Agency, 2007a.

IEA. **Tracking Industrial Energy Efficiency and CO2 Emissions**. Paris: IEA - International Energy Agency, 2007b.

IMS SOLUÇÕES EM ENERGIA. **Catálogo técnico PowerNET P-700 G4**. Porto Alegre: IMS Soluções em Energia, 2014.

IMS SOLUÇÕES EM ENERGIA. **Catálogo técnico PowerNET PQ-600 G4**. Porto Alegre: IMS Soluções em Energia, 2016.

IRREK, W.; THOMAS, S. **Der EnergieSparFonds für Deutschland**. Düsseldorf: Hans-Böckler- Stiftung, 2006.

KANAKO TANAKA. **Assessing Measures of Energy Efficiency Performance and Their Application in Industry**. Paris: IEA - International Energy Agency, 2008.

KARA, S.; LI, W. **Unit process energy consumption models for material removal processes**. CIRP Annals - Manufacturing Technology. **Anais...**2011

KARNA, S. K.; SAHAI, R. An Overview on Taguchi Method. **International Journal of Engineering and Mathematical Sciences**, v. 1, p. 11–18, 2012.

KHARE, S. K.; AGARWAL, S.; SRIVASTAVA, S. Analysis of Surface Roughness during Turning Operation by Taguchi Method. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 14, p. 28089–28097, 2018.

KIBIRA, D. et al. **Procedure for Selecting Key Performance Indicators for Sustainable Manufacturing**. Proceedings of the ASME 2017 12th International Manufacturing Science and Engineering Conference MSEC2017. **Anais...**ASME, 2017

KORDONOWY, D. N. **Power Assessment of Machining Tools**. [s.l.] MIT - MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, 2002.

KRZYSZTOF, K. The Impact of Performance Improvement Achieved by the Closing Machine up to the Level of World-Class OEE on the Results of the Production Process. In: **Terotechnology**. Millersville: Materials Research Forum LLC, 2018. v. 5p. 117–122.

LEE, H. et al. Capturing green information and mapping with MES functions for increasing manufacturing sustainability. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, v. 15, n. 8, p. 1709–1716, 2014.

LEE, W. et al. Simulation-based machining condition optimization for machine tool energy consumption reduction. **Journal of Cleaner Production**, v. 150, p. 352–360, 2017.

LI, W. **Efficiency of Manufacturing Processes**. New York: Springer, 2015.

LINDBERG, C. et al. Key performance indicators improve industrial performance. **Energy Procedia**, v. 75, p. 1785–1790, 2015.

LV, J. et al. Experimental study on energy consumption of computer numerical control machine tools. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 3864–3874, 2016.

MACHADO, A. R. et al. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 1. ed. São Paulo: EDITORA EDGARD BLÜCHER LTDA, 2009.

MARTÍNEZ, I. L. **Analysis of Energy Kpis With Respect To Production Planning in Combination With a Formulation of Possible Measures To Enable Energy Flexibility**. [s.l.] Universidad Pontificia Comillas, 2015.

MAY, G. et al. Energy Related Key Performance Indicators–State of the Art, Gaps and Industrial Needs. **Advances in Production Management Systems. Sustainable Production and Service Supply Chains**, p. 257–267, 2013.

MAY, G. et al. Energy management in production: A novel method to develop key performance indicators for improving energy efficiency. **Applied Energy**, v. 149, p. 46–61, 2015.

MESA. **MESA White Paper #02: MES Functionalities and MRP to MES Data Flow Possibilities**, 1997. Disponível em: <<https://services.mesa.org/ResourceLibrary/ShowResource/2cedfe75-daed-4b9c-b187-f421cf90fdd2>>

MONTEIRO, L. P. C. Uso de indicadores de eficiência energética em plantas de produção de amônia. **ENGEVISTA**, v. 15, p. 261–269, 2013.

MORADNAZHAD, M.; UNVER, H. O. Energy efficiency of machining operations: A review.

- Journal of Engineering Manufacture**, v. 231, n. 11, p. 1871–1889, 2017.
- NETO, B. DE B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. 2. ed. Campinas: Editora da Unicamp, 2001.
- NEUGEBAUER, R. et al. Structure principles of energy efficient machine tools. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 4, n. 2, p. 136–147, 2011.
- ODA, Y.; KAWAMURA, Y.; FUJISHIMA, M. Energy consumption reduction by machining process improvement. **Procedia CIRP**, v. 4, p. 120–124, 2012.
- PATTERSON, M. G. What is energy efficiency ? Concepts , indicators and methodological issues. **Energy Policy**, v. 24, n. 5, p. 377–390, 1996.
- PAVANASKAR, S. S. **Improving Energy Efficiency in CNC Machining**. [s.l.] University of California, Berkeley, 2014.
- PHYLIPSEN, G. J. M.; BLOK, K.; WORRELL, E. International comparisons of energy efficiency-Methodologies for the manufacturing industry. **Energy Policy**, v. 25, n. 97, p. 715–725, 1997.
- SALONITIS, K.; BALL, P. Energy efficient manufacturing from machine tools to manufacturing systems. v. 7, p. 634–639, 2013.
- SCHMIDT, C. et al. Implementing Key Performance Indicators for Energy Efficiency in Manufacturing. **Procedia CIRP**, v. 57, p. 758–763, 2016.
- SCHUDELEIT, T. et al. The Total Energy Efficiency Index for machine tools. **Energy**, v. 102, p. 682–693, 2016.
- SHANG, Z. et al. Towards less energy intensive heavy-duty machine tools: Power consumption characteristics and energy-saving strategies. **Energy**, v. 178, p. 263–276, 2019.
- SINGARAVEL, B.; SELVARAJ, T. EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON CUTTING FORCES , SPECIFIC CUTTING PRESSURE , CO-EFFICIENT OF FRICTION AND SHEAR ENERGY IN TURNING OF HSLA STEEL. **Management and Production Engineering Review**, v. 7, n. 1, p. 71–76, 2016.
- SINGH, R. **Introduction to Basic Manufacturing Processes and Workshop Technology**. New Delhi: New Age International (P) Ltd., Publishers, 2006.
- SINGH, R. et al. **Overall Equipment Effectiveness (OEE) Calculation - Automation through Hardware & Software Development**. NUICONE 2012. **Anais...2013**
- SOPLOP, J. et al. Manufacturing execution systems for sustainability: Extending the scope of MES to achieve energy efficiency and sustainability goals. **2009 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2009**, p. 3555–3559, 2009.
- STOCK, T.; SELIGER, G. **Multi-objective Shop Floor Scheduling Using Monitored Energy Data**. *Procedia CIRP - 12th Global Conference on Sustainable Manufacturing*. **Anais...Elsevier B.V.**, 2015Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2014.07.178>>
- SUH, S.-H. et al. **Theory and Design of CNC Systems**. 1. ed. London: Springer-Verlag London, 2008. v. 53
- TAHA, Z. et al. **Linkage of power consumption to design feature on turning process**. 10th WSEAS Int. Conference on Robotics, Control and Manufacturing Technology. **Anais...2010**
- THIEDE, S. **Energy efficiency in manufacturing systems**. New York: Springer, 2012.
- THIEDE, S.; BOGDANSKI, G.; HERRMANN, C. A systematic method for increasing the energy and resource efficiency in manufacturing companies. v. 2, p. 28–33, 2012.

- TSAROUHAS, P. Improving operation of the croissant production line through overall equipment effectiveness (OEE): A case study. **International Journal of Productivity and Performance Management**, v. 68, n. 1, p. 88–108, 2019.
- UGARTE, B. S. DE; ARTIBA, A.; PELLERIN, R. Manufacturing execution system – a literature review. **Production Planning and Control**, v. 20, p. 525–539, 2009.
- VALIO, R. **Torneamento: Princípios e Produtos para melhorar a produtividade**. Disponível em: <<http://www.kennatech.com.br/admin/uploadck/files/Torneamento.pdf>>. Acesso em: 18 abr. 2020.
- VIJAYARAGHAVAN, A.; DORNFELD, D. Automated energy monitoring of machine tools. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 59, n. 1, p. 21–24, 2010.
- WANG, Q.; LIU, F.; LI, C. An integrated method for assessing the energy efficiency of machining workshop. v. 52, n. September 2009, p. 122–133, 2013.
- WIPPERMANN, A. et al. Electrical energy and material efficiency analysis of machining, additive and hybrid manufacturing. **Journal of Cleaner Production**, v. 251, p. 119731, 2020.
- WÓJCICKI, J.; BIANCHI, G.; TOLIO, T. Hierarchical modelling framework for machine tool energy optimization. **Journal of Cleaner Production journal**, v. 204, p. 1044–1059, 2018.
- YATOLLAHI, A. I. et al. NEW APPROACH FOR OEE CALCULATION OF CNC MACHINES BASED ON OPC UA. In: **DAAAM International Scientific Book**. Viena: DAAAM International, 2013. p. 895–902.
- YOON, H. S. et al. Towards greener machine tools - A review on energy saving strategies and technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 48, p. 870–891, 2015.
- ZEIN, A. **Transition Towards Energy Efficient Machine Tools**. New York: Springer, 2012.
- ZHAO, G. Y. et al. Energy consumption in machining: Classification, prediction, and reduction strategy. **Energy**, v. 133, p. 142–157, 2017.
- ZHONG, Q.; TANG, R.; PENG, T. Decision rules for energy consumption minimization during material removal process in turning. **Journal of Cleaner Production**, v. 140, p. 1819–1827, 2017.