EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM MÁQUINAS-FERRAMENTA E PROCESSOS DE USINAGEM: PERSPECTIVAS PARA A MANUFATURA SUSTENTÁVEL

Marie Madeleine Sarzi Inacio, Universidade Tecnológica Federal do Paraná**,** marie@alunos.utfpr.edu.br
Rodrigo Henriques Lopes da Silva, Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Joaquim de Almeida Neto, Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Resumo: *O propósito deste estudo foi conduzir uma revisão bibliográfica, abrangendo a coleta de artigos científicos relacionados ao tema "O alcance da Eficiência Energética nas Indústrias Manufatureiras com foco em Máquinas-ferramenta e Processos de usinagem". Isso permitiu uma análise de artigos correlacionados e identificação de áreas potenciais para pesquisa, utilizando as ferramentas Elicit e Litmaps. Assim, é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os efeitos do consumo excessivo de energia elétrica nas indústrias de manufatura, ressaltando a necessidade de buscar soluções que permitam reduzir o consumo energético. Uma das áreas de análise é a eficiência energética das máquinas-ferramenta, que são amplamente utilizadas na fabricação de peças metálicas e correspondem de 1 a 3% do consumo de eletricidade das indústrias a nível mundial. Baseando-se nos estudos científicos encontrados, a otimização do processo de usinagem é um dos fatores mais relevantes para alcançar a eficiência energética nas máquinas. Além de ser uma questão ambiental, a busca por eficiência energética em máquinas-ferramenta também é uma questão econômica, visto que a redução do consumo de energia elétrica pode gerar economias consideráveis para as empresas. Portanto, são apresentadas abordagens iniciais sobre o tema e técnicas utilizadas para atingir a eficiência energética na produção industrial, com destaque para as máquinas-ferramenta e o processo de usinagem. Pode-se concluir que várias áreas de pesquisa relacionadas ao tema estão atualmente em andamento, o que tem um impacto direto na viabilização de práticas de manufatura mais sustentáveis.*

Palavras-chave: *Eficiência energética, máquinas-ferramenta, consumo de energia, processo de fabricação e manufatura sustentável.*

1. INTRODUÇÃO

A utilização excessiva de energia elétrica na indústria de manufatura pode resultar em efeitos adversos, como o aumento no consumo de combustíveis fósseis, maior emissão de gases de efeito estufa, esgotamento de recursos naturais e danos ao meio ambiente. Essas consequências afetam negativamente o aquecimento global, as mudanças climáticas e a qualidade de vida das comunidades próximas às áreas de produção de energia. Além disso, mesmo as fontes renováveis (ex. queima do bagaço da cana) podem ter impactos negativos devido às emissões de gases poluentes.

Para Bunse et al. (2011), esses efeitos combinados à crescente atenção ecológica, fazem com que as indústrias encarem grandes desafios. Ainda com maior relevância, quando dados de utilização de energia elétrica indicam que a demanda pelas indústrias a nível mundial, foi de cerca de 38% do total gerado no ano de 2018 (International Energy Agency, 2019). Em vista disso, considera-se que é imprescindível buscar soluções a fim de minimizar os impactos ambientais e promover a sustentabilidade, com aplicação de novas tecnologias e análises dos processos de fabricação.

Segundo a International Energy Agency (2022), crescentes custos energéticos, bem como a ameaça de interrupções no fornecimento, têm aumentado a importância dada à melhoria da eficiência energética. Como resposta, consumidores e governos têm implementado medidas urgentes e adotado novas políticas para preservar e gerenciar melhor o consumo de energia.

O consumo de energia elétrica em máquinas-ferramenta é uma das principais preocupações das indústrias no momento, especialmente em um contexto de crescente demanda por sustentabilidade ambiental e eficiência energética. Correspondendo de 1 a 3% da demanda global de energia elétrica (Denkena, 2020), as máquinas-ferramenta são responsáveis por uma parcela significativa do consumo de eletricidade na indústria-metalmecânica e a busca por soluções que permitam reduzir esse consumo tem sido cada vez mais relevante. Nesse sentido, a otimização do processo de usinagem é fundamental para alcançar a eficiência energética em máquinas-ferramenta. Desse modo, a escolha de métricas e da operação de usinagem tem um efeito fundamental nas medições obtidas de eficiência energética em nível sistêmico (Denkena et al., 2020).

A busca pela eficiência energética em máquinas-ferramenta é tanto ambiental como econômica, pois a redução do consumo de energia elétrica pode resultar em economias substanciais para as empresas. Fato é, por exemplo, que em 2022 foram registrados preços recordes em todo o mundo para o gás natural, petróleo e eletricidade (International Energy Agency, 2022), com tendência de aumento ao longo dos próximos anos. Fora isso, estamos presenciando mudanças climáticas em nível global, como jamais ocorreram na era moderna.

Portanto, o objetivo do artigo é explorar pesquisas e metodologias realizadas para analisar a eficiência energética nas indústrias manufatureiras, observando máquinas-ferramenta e otimizações nos processos de usinagem. O que se propõe servirá de base para o desenvolvimento de um trabalho científico ligado à indústria, em que se pretende analisar e propor soluções para redução do consumo de energia em máquinas-ferramenta utilizadas em usinagem.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nas indústrias tradicionais, como transformação e produção mecânica, é fundamental priorizar a eficiência energética como meio de alcançar o desenvolvimento econômico sustentável (Kong et al., 2022). Esse fato está em evidência devido ao aumento da conscientização sobre os impactos ambientais e econômicos da produção e do consumo excessivo de energia. É importante destacar que governos de diversas partes do mundo têm trabalhado para mobilizar cerca de US$ 1 trilhão desde 2020, com o objetivo de promover iniciativas direcionadas à eficiência energética (International Energy Agency, 2022). Como agentes de mudança, já faz alguns anos, políticas globais têm influenciado diretamente para mudanças mais ecológicas dos setores industriais, promovendo medidas em eficiência energética, incentivo a grupos de alto desempenho, entre outras ações (Tanaka, 2008).

A eficiência energética busca o uso sustentável e econômico da energia, reduzindo desperdícios e impactos ambientais para melhorar a competitividade no mercado. Para Tanaka (2008), a eficiência energética é a divisão do consumo de energia pelo valor da produção física ou por algum valor econômico equivalente. Nesse contexto, a norma ISO 14955 ainda determina que a relação quantitativa entre a entrada de energia e a saída de desempenho, serviços, bens ou energia é estabelecida como eficiência energética (International Organization for Standardization, 2017). Essa definição é compatível com a estabelecida por Patterson (1996), em que a eficiência energética é basicamente a relação entre a saída útil do processo e a energia de entrada utilizada no mesmo processo. Além disso, melhorar a eficiência é uma forma ambientalmente favorável e sustentável de suprir grande parte das necessidades da sociedade em relação à produção de bens e serviços (Instituto Nacional de Eficiência Energética, 2019). Nesse sentido, o Instituto Nacional de Eficiência Energética (2019), destaca várias melhorias em eficiência energética resultantes de inovações tecnológicas e melhorias nas instalações e condições de uso dos equipamentos. Dessa forma, a busca pela eficiência deve levar em consideração as condições sistêmicas em que os equipamentos operam e não apenas sua eficiência individual.

Atualmente, muitos estudos estão sendo realizados intencionando a análise, desenvolvimento e aplicação de metodologias para melhoria em eficiência energética de máquinas-ferramenta, muitos deles voltados aos parâmetros de processos empregados (Shi et al. 2019; Denkena et al., 2020; Li et al., 2021).

Fato é que máquinas-ferramenta são comumente caracterizadas por terem grandes perdas de energia. Por essa razão e devido a uma influência constante de sua demanda de energia, as máquinas-ferramenta são um ponto de partida lógico para medidas em eficiência energética na indústria de manufatura, apesar dos custos de implementação e dos períodos de amortização prolongados que podem estar envolvidos (Denkena et al., 2020).

Adentrando em processos, pode ser citado que ao longo do tempo, diversos estudos foram realizados com o objetivo de aprimorar a eficiência energética no processo de usinagem por meio da análise dos parâmetros de usinagem empregados (Shi et al., 2019). Królczyk et al. (2019), por exemplo, realizaram um estudo direcionado para produção sustentável, propondo o uso minimizado de lubrificantes e refrigerantes em processos de usinagem de materiais. Jia et al. (2018), desenvolveram um método que avalia o consumo de energia em atividades relacionadas a máquinas-ferramenta e operadores, propondo um novo modelo energético para avaliar a eficiência energética de processos de usinagem.

Segundo Shi et al. (2019), para se obter um melhor controle de eficiência energética, é fundamental estimar com precisão o consumo de energia durante a fabricação de peças. Dessa forma, torna-se necessário realizar o desenvolvimento de modelos de consumo de energia que contemplem diferentes processos de usinagem em diferentes máquinas-ferramenta. Ao analisar o trabalho de Denkena et al. (2020), encontramos que a melhoria da eficiência energética é alcançada na otimização do desempenho de corte das máquinas-ferramenta, enquanto se obtém a redução da demanda geral de energia. Nesse contexto, Zhou et al. (2016) afirmam com base em trabalhos da literatura, que a demanda de energia da máquina-ferramenta é gerada a partir de influencias fixas e variáveis no processo de usinagem.

Denkena et al. (2020) destacam que as influências fixas em máquinas-ferramenta incluem a estrutura e os componentes de acionamento, enquanto as influências variáveis envolvem sistemas auxiliares como refrigerante, fluido de corte e sistemas hidráulicos. Esses elementos são cruciais para o desempenho eficiente das máquinas e para operações precisas na indústria de usinagem. Zhou et al. (2016) ainda apresentam que a parte variável da demanda de energia total, de acordo com o processo de usinagem, depende de fatores como a geometria da peça, as características do ferramental empregado, os parâmetros de corte e também das estratégias de resfriamento, por exemplo, e esses fatores impactam diretamente na quantidade de energia utilizada para o processamento do material.

Finalmente, com base na pesquisa realizada, é possível destacar a importância da eficiência energética e das ações para melhoria no consumo de energia em máquinas-ferramenta, pois as indústrias em todo mundo estão sendo fortemente solicitadas à busca pela sustentabilidade.

3. MÉTODOS

Neste trabalho foi realizada uma revisão bibliográfica com o intuito de investigar o tema: “o alcance da eficiência energética nas indústrias manufatureiras com foco em máquinas-ferramenta e processos de usinagem”, onde definiu-se um método sistemático de seleção de artigos científicos para leitura, análise e assim, estabelecer a relação entre esses estudos. A coleta e a análise dos dados foram realizadas com suporte dos *websites* Elicit e Litmaps, respectivamente.

O Elicit é uma ferramenta de pesquisa que utiliza modelos de linguagem, como o GPT-3, para automatizar parte dos processos de pesquisa, com foco em Revisão de Literatura. Ele gera uma tabela com artigos relevantes e resumos quando um tópico específico ou pergunta é inserido, agilizando a busca de informações para pesquisadores. Por outro lado, o Litmaps é um *software* que auxilia na pesquisa bibliográfica, simplificando a busca por artigos científicos relacionados a um tópico específico. A partir de um artigo de referência, cria um mapa destacando os artigos e suas ligações.

Foram utilizadas palavras-chave relevantes para buscar artigos científicos em bases de dados a partir de 2018, preferencialmente em inglês. Foram realizadas duas etapas distintas: coleta de dados e análise de artigos.

Tabela 1 – Estrutura para pesquisa bibliográfica

Problema de pesquisa	Quais os impactos do consumo energético das indústrias em escala global e quais as estratégias voltadas para a manufatura sustentável em máquinas-ferramenta?
Palavras-chave	Machine tools; Energy efficiency; Sustainable manufacturing; Machining process
Ano de publicação	2018 - 2023
Idioma	Inglês
Publicações	Essenciais para fundamentar a relevância da pesquisa tanto para o setor industrial quanto para o avanço acadêmico, com ênfase em otimização de processos.

Acessando e fazendo login no *website* Elicit, as palavras-chave foram adicionadas na barra de pesquisa, e em seguida, selecionou-se "Search". Após a pesquisa, a página apresentou os trabalhos relacionados ao tema. Foram selecionados os tópicos "Abstract summary", "Intervention" e "Outcomes measured" à esquerda. Além disso, foi aplicado um filtro em "Filter" para exibir apenas os trabalhos publicados após o ano de 2018.

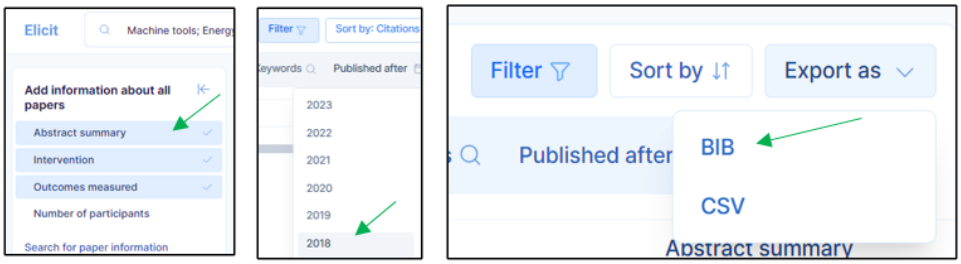


Figura 1 – Seleção de filtros e estratificação no *website* Elicit.

Diversos trabalhos relacionados ao tema foram obtidos por meio da plataforma, totalizando uma base de dados com 68 artigos, o que é significativo para a pesquisa. Para exportar os dados, escolheu-se o formato BIB ao clicar em "Export as", e também era possível optar por CSV, se necessário. Foi possível analisar o mapa de conexão das pesquisas relacionadas no *website* Litmaps com as informações obtidas no *website* Elicit. Após fazer *login*, uma pasta foi criada na opção "Your Library" para armazenar a base de dados coletada no Elicit. Clicou em "+ New" para criar uma nova pasta e adicionou o nome da pasta clicando posteriormente em “Done”.

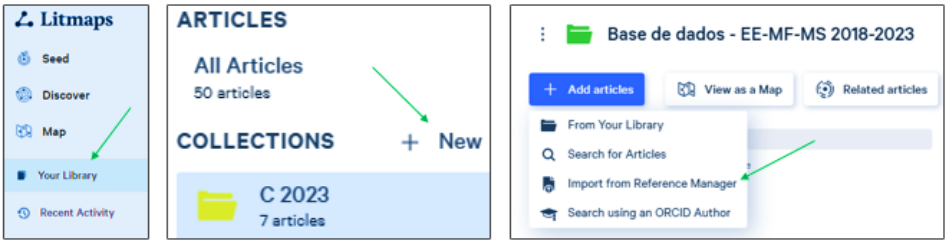


Figura 2 – Criação de pasta e upload de arquivo BIB no *website* Litmaps.

Em seguida, foi utilizada a opção "+ Add articles" e "Import from Reference Manager" para importar a base de dados gerada no Elicit. O upload foi realizado da base estratificada do Elicit em formato BIB ao clicar em "Upload File". Ao final, após a verificação, é exibida uma lista de artigos, que pode ser importada via comando "Import".

Para criar o mapa, selecionou-se "Map" na parte esquerda e, em seguida, escolheu-se "View map" na pasta "Base de dados - EE-MF-MS 2018-2023". Dessa forma o mapa foi criado, conforme apresentado na Fig. (4). Assim, foi possível selecionar os principais trabalhos e suas conexões, que serviram de base para o presente estudo.



Figura 3 – Criação do mapa de conexão no *website* Litmaps.

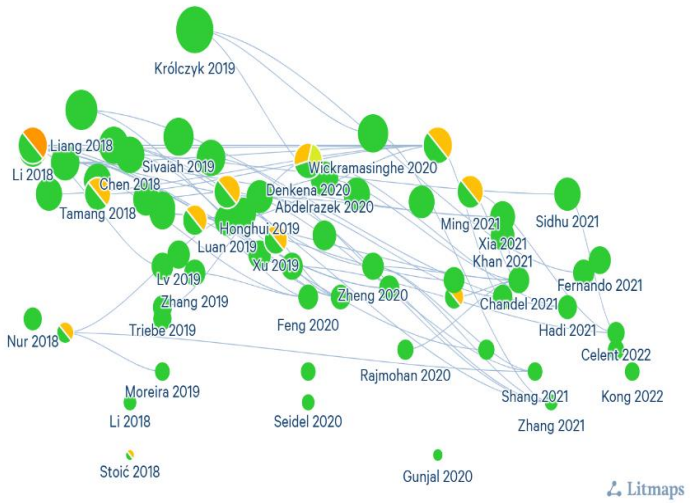


Figura 4 – Mapa de conexão Litmaps.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os artigos de Patterson (1996), Tanaka (2008) e Bunse et al. (2011) destacam a crescente preocupação tanto da indústria quanto da academia em pesquisas relacionadas à eficiência energética. Esse aumento de atenção pode ser atribuído ao cenário mundial e ao entendimento dos impactos ambientais e econômicos do consumo excessivo de energia.

Por outro lado, os estudos de Denkena et al. (2020) e Zhou et al. (2016) citam que as máquinas-ferramenta são alvos importantes para análise de eficiência energética nas indústrias de manufatura, enfatizando a relevância de métodos confiáveis para avaliar a energia elétrica real empregada nos processos. Apresenta-se na Figura (5) a linha do tempo e as ligações das revisões bibliográficas realizadas para o artigo.

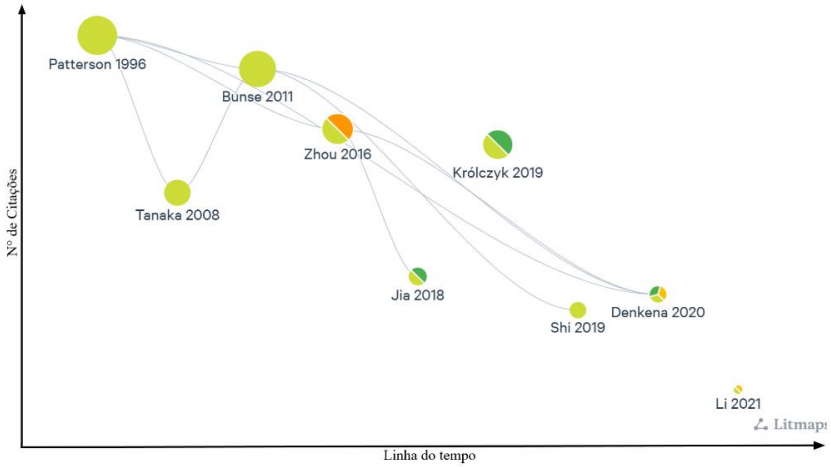


Figura 5 – Mapa de conexões da revisão bibliográfica

Há uma variedade de estudos que investigam técnicas potenciais para reduzir o consumo de energia em máquinas-ferramenta, incluindo análises de estudos de caso na indústria. Como exemplificação, Shi et al. (2019) desenvolveram e validaram um modelo de consumo de energia baseado na potência de corte para o processo de fresamento, abordando dois materiais comuns na indústria aeroespacial. Este modelo demonstrou a capacidade de fornecer previsões confiáveis, apresentando um grande potencial para aprimorar a eficiência energética na produção real. Seguindo a mesma linha, Li et al. (2021) conduziram estudos visando a redução do consumo de energia e o aprimoramento da produtividade e qualidade da usinagem. Isso foi alcançado por meio da otimização dos parâmetros de corte, levando em consideração o

desgaste da ferramenta, e analisando métricas como rugosidade superficial, taxa de remoção de material e consumo de energia.

Segundo Shi et al., (2019), a implementação de modelos de consumo de energia para máquinas-ferramenta não é simples, devido aos diferentes estados do processo que devem ser identificados e modelados. Além disso, os modelos são projetados para estimar o consumo de energia da máquina em qualquer cenário, mas a otimização dos parâmetros de processo só é possível quando a máquina está em operação.

Dessa forma, modelos de consumo de energia que considerem os parâmetros do processo são extremamente necessários para otimização de consumo de energia nas indústrias que fazem uso de máquinas-ferramenta.

5. CONCLUSÕES

A partir da revisão bibliográfica realizada ficou evidente que a medição, otimização e desenvolvimento de modelos de consumo de energia em máquinas-ferramenta são elementos essenciais para a melhoria da eficiência energética na indústria, considerando os parâmetros de usinagem. A pesquisa nesse campo deve aprofundar a compreensão dos processos e parâmetros relacionados à eficiência energética. Entende-se que para o futuro, é importante focar em aprimorar a eficiência energética das máquinas-ferramenta com desenvolvimento de modelos adaptáveis para diferentes processos e máquinas, bem como explorar abordagens baseadas em simulações. Conforme a indústria de manufatura visa melhorar a produção, qualidade e a eficiência energética, é fundamental que a pesquisa continue impulsionando inovações, especialmente em máquinas-ferramenta automatizadas. Os próximos passos compreendem uma análise mais aprofundada sobre o tema, acompanhada da implementação experimental de um modelo de consumo de energia, acreditando-se que um modelo otimizado, considerando parâmetros como trajetórias de ferramentas, uso de fluido refrigerante e parâmetros de corte no processo de usinagem, contribua para a área de pesquisa.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BUNSE, K. et al. 2011. Integrating energy efficiency performance in production management: Gap Analysis Between Industrial Needs and Scientific Literature. Journal of Cleaner Production, Vol. 19, pp. 667-679.

DENKENA, B. et al. 2020. Energy efficient machine tools. CIRP Annals, Vol. 69, pp. 646-667.

International Energy Agency (IEA), Energy Efficiency: Industry, 2019. Disponível em: https://www.iea.org/topics/energyefficiency/industry/. Acesso em: 11.05.2023.

International Energy Agency (IEA), Energy Efficiency: Industry, 2022. Disponível em: https://www.iea.org/topics/energyefficiency/industry/. Acesso em: 12.05.2023.

Instituto Nacional de Eficiência Energética. Eficiência Energética: Uma Busca Permanente, 2019. Disponível em: http://www.inee.org.br/eficiencia_downloads.asp?Cat=eficiencia. Acesso em: 12.05.2023.

International Organization for Standardization. 2017. ISO 14955-1: Machine tools – Environmental evaluation of machine tools: Part 1: Design methodology for energy-efficient machine tools, ISO standard.

Jia, S., Yuan, Q., Cai, W., Li, M., & Li, Z. 2018. Energy modeling method of machine-operator system for sustainable machining. Energy Conversion and Management, 172, 265–276.

Kong, T. et al. 2022. Method for Optimizing Energy Consumption in Machining Manufacturing Process. Hindawi - Mathematical Problems in Engineering. Vol. 2022, pp. 1-8.

Krolczyk, G. M., Maruda, R. W., Krolczyk, J. B., Wojciechowski, S., Mia, M., Nieslony, P., & Budzik, G. 2019. Ecological trends in machining as a key factor in sustainable production – a review. Journal of Cleaner Production.

LI, B. et al. 2021. Modeling and Multi-objective Optimization Method of Machine Tool Energy Consumption Considering Tool Wear. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology, Vol. 9, pp. 127-141.

PATTERSON, M. G. 1996. What is Energy Efficiency? Concepts, Indicators and Methodological Issues. Energy Policy, Vol. 24, pp. 377-390.

SHI, K. N. et al. 2019. An Improved Cutting Power-based Model for Evaluating Total Energy Consumption in General End Milling Process. Journal of Cleaner Production, Vol. 231, pp. 1330-1341.

TANAKA, K. 2008. Assessment of energy efficiency performance measures in industry and their application for policy. Energy Policy, Vol. 36, pp. 2887-2902.

ZHOU, L. et al. 2016. Energy Consumption Model and Energy Efficiency of Machine Tools: A Comprehensive Literature Review. Journal of Cleaner Production, Vol. 112, pp. 3721-3734.

7. AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Universidade Tecnológica Federal do Paraná, SENAI/SP e Capes pelo incentivo e suporte à pesquisa, os quais possibilitam a realização deste trabalho.

8. RESPONSABILIDADES PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.