

A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM PROCESSO DE USINAGEM POR FRESAMENTO: UMA REVISÃO NA LITERATURA

Francisco Roberto de Sá Pereira

Francisco Nélio Costa Freitas

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – Campus de Maracanaú
frpereirasa@gmail.com; fneliofc@ifce.edu.br

Resumo: A eficiência energética tem se tornado uma parte integrante das indústrias de fabricação por processo de usinagem como um meio de melhorar o desempenho econômico e ambiental aumentando assim a competitividade. As Máquinas-ferramentas não são apenas o principal consumidor de energia na indústria de manufatura, no entanto é possível melhorar a eficiência energética dessas máquinas reduzindo o consumo de energia por meio da otimização dos parâmetros de usinagem, uma vez que estudos comprovam que em uma fresadora a usinagem representa 65% de consumo de energia. Dentre os processos de usinagem destaca-se o fresamento pois tem ampla aplicação na fabricação de componentes mecânicos encontrados principalmente nas indústrias da Metalmecânica. Por isso é importante analisar o consumo de energia realizado pela fresagem de forma a entender seu comportamento que é complexo e dinâmico. Diante do exposto a presente pesquisa objetiva caracterizar os principais estudos relacionados a eficiência energética e o consumo de energia no processo de fresamento contribuindo para a fomentação de outras pesquisas acadêmicas relacionadas a essa temática. Neste artigo de revisão, a literatura de referência é identificada usando uma metodologia sistemática realizada nas bases da Science Direct, Web of Science e SCOPUS seguida de uma descrição e análise de conteúdo para compreender a evolução das pesquisas em eficiência energética no processo de usinagem por fresamento. Foram utilizados como critérios de inclusão nessa revisão os artigos dos últimos cinco anos que relacionam eficiência energética, consumo de energia, influência dos parâmetros de corte, fluidos de corte e parâmetros das ferramentas em processos de usinagem de materiais metálicos por fresamento em máquinas a Comando Numérico Computadorizado (CNC) e máquinas convencionais. Como critérios de exclusão, os estudos que relacionavam processo de microfresagem no consumo de energia, usinagem em materiais não metálicos, remoção de material por processos de descargas elétricas e fresagem com tecnologia a laser. A revisão da literatura mostra que as pesquisas na área têm grande desenvolvimento nos últimos anos. Observa-se que os modelos de consumo de energia estão mais precisos devido ao aumento do uso de métodos computacionais. Foi constatado nas pesquisas que a otimização dos parâmetros de usinagem em fresamento tem sido testada apresentando resultados satisfatório. Para tanto percebeu-se a necessidade de ampliação de estudos para caracterização de consumo de energia em fresadora convencional, aproximação de aplicações práticas com acadêmicas e maiores quantidades de trabalhos de caráter experimental.

Palavras-chave: Eficiência Energética, Usinagem, Fresamento.

1. INTRODUÇÃO

A usinagem é aplicada a todos os processos de fabricação onde ocorre a remoção de material sob a forma de cavaco. As operações de usinagem têm por objetivo conferir uma geometria a uma peça por meio de processos onde ocorram a remoção progressiva de material formando o cavaco (FERRARESI, 1977). A parte de material que é removida pela ferramenta que se apresenta com geometria irregular é definido como sendo o cavaco conforme Machado et al. (2009).

Segundo Ferraresi (1977) existe uma classificação dos processos de usinagem onde o fresamento mostrado na Fig. 1 está incluído como de grande importância sendo definido como um processo de remoção progressiva de material fazendo uso de ferramentas com múltiplas arestas de corte que são chamadas de fresas. Para isso, ocorrer o movimento da peça se desloca em uma trajetória enquanto a ferramenta gira.

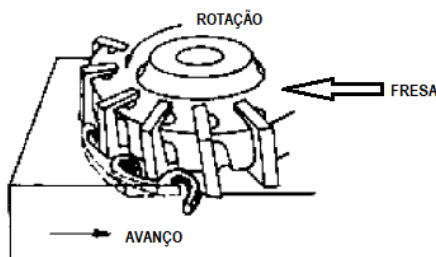


Figura 1 – Representação do fresamento frontal (FERRARESI, 1977)

Ao longo do tempo o desenvolvimento de tecnologias tem grande crescimento, levando em consideração a larga escala de fontes energéticas. A expansão industrial tem contribuído para o aumento da demanda de energia em todo o mundo.

No Brasil o setor industrial foi responsável por consumir cerca de 32,1% do total de energia consumida no ano de dois mil e vinte. De acordo com o plano decenal de expansão energética esse consumo pode chegar a 47% no ano de 2027 (EPE,2020).

A alta demanda por energia, leva a sociedade a procurar meios que possam reduzir o consumo de energia. Mesmo que embora as tecnologias de energia verde tenham sido desenvolvidas, os combustíveis fósseis ainda são os principais recursos para geração de energia. Uma vez que o uso de grande quantidade desses combustíveis contribuiu com 29,3 gigatoneladas de emissões de carbono em 2008, e é esperado que esse valor se eleve para 35,4 gigatoneladas em 2035 (Campatelli et al., 2015).

Nesse contexto notamos que a eficiência energética é caracterizada como a diminuição da demanda de energia de produtos ou serviços, com um menor consumo de energia, obtendo um produto final com a mesma qualidade requerida pelo mercado consumidor, ou seja, é a redução do consumo de energia provendo o mesmo nível de serviço energético. Grande é a busca por equipamentos que apresentem alta eficiência energética, no entanto os parâmetros de processos quando otimizados contribuem para a redução do consumo de energia.

Dessa forma a eficiência energética tornou-se um objetivo principal da indústria de manufatura nas últimas duas décadas, devido aos altos preços da energia, políticas ambientais rigorosas, e aumento da conscientização do cliente. Uma parte da manufatura de produtos passa por processos de fabricação por usinagem em máquinas-ferramentas que geralmente operam com menos de 30% de eficiência (He et al.,2012). No entanto esse setor apresenta um grande potencial para economia de energia e ganho de eficiência energética.

Os conhecimentos de pesquisas relacionados ao processo de fabricação por usinagem são necessários para que por meio desses possamos avançar e melhorar qualitativamente e quantitativamente em novos trabalhos que façam referência a eficiência energética dos equipamentos utilizados.

No entanto o processo de fabricação por fresagem se destaca como um processo muito utilizado na fabricação de peças mecânicas. Muitas pesquisas têm sido realizadas para avaliar a eficiência energética nesse processo de usinagem embora a eficiência energética seja um indicador mais complexo do que consumo de energia e potência, que geralmente é associada a muitos fatores como estados da máquina-ferramenta, condições da ferramenta e do corte.

Diante do exposto, o presente artigo tem como objetivo caracterizar as pesquisas que relacionam a eficiência energética de processos de fabricação por usinagem utilizando o fresamento de materiais metálicos, identificando quais os parâmetros de corte do referido processo que são utilizados como variáveis de entrada, os métodos utilizados para verificar a sua relação com o consumo de energia e outras métricas utilizadas na avaliação da usinagem por fresamento. Para isso, é utilizada uma revisão sistemática da literatura tendo em vista o cumprimento dessa necessidade.

Outro ponto de vista importante é que diante dos resultados apresentados nessa pesquisa espera-se contribuir para os estudos do estado da arte de trabalhos de dissertações que estejam relacionados com a eficiência energética em processos de usinagem por fresamento.

Esse trabalho está estruturado seguindo numa seção de metodologia onde será apresentada como foi realizada a pesquisa, os resultados que são caracterizados por uma análise dos artigos selecionados, conclusão e referências bibliográficas.

2. METODOLOGIA

Para realizar a busca nas bases de dados, foi utilizada uma expressão lógica com as seguintes palavras-chave: (“*energy efficiency*” AND “*machining*”) OR (“(*energy efficiency*” AND “*milling*”). A presente pesquisa considerou artigos publicados nos últimos anos. As expressões mencionadas acima foram adequadas à estrutura de pesquisa do *Science Direct*, *Web of Science* e *Scopus* considerando o título e palavras-chave. Na busca, foram considerados como critérios de inclusão os estudos que relacionados com a influência dos parâmetros de corte, fluídos de corte e parâmetros das ferramentas de corte na eficiência energética em processos de usinagem por fresamento. Como critérios de exclusão, os estudos que relacionam com o processo de microfresagem no consumo de energia, usinagem em materiais não metálicos, remoção de material por processos de descargas elétricas e fresagem com tecnologia a laser.

Ao finalizar essa etapa, foi obtido um total de 118 trabalhos, sendo 51 na base *Science Direct*, 25 na *Web of Science* e 42 na *Scopus*.

Em seguida, todos os trabalhos foram submetidos a uma seleção e após a identificação, foram removidos trabalhos duplicados, títulos e resumos incompatíveis. Dessa forma um total de 25 trabalhos foram atribuídos à próxima etapa.

Por fim, cada artigo foi verificado tendo em vista o objetivo principal da pesquisa. Após a análise, 15 artigos foram identificados segundo os objetivos mencionados conforme mostrado na Fig. 2.

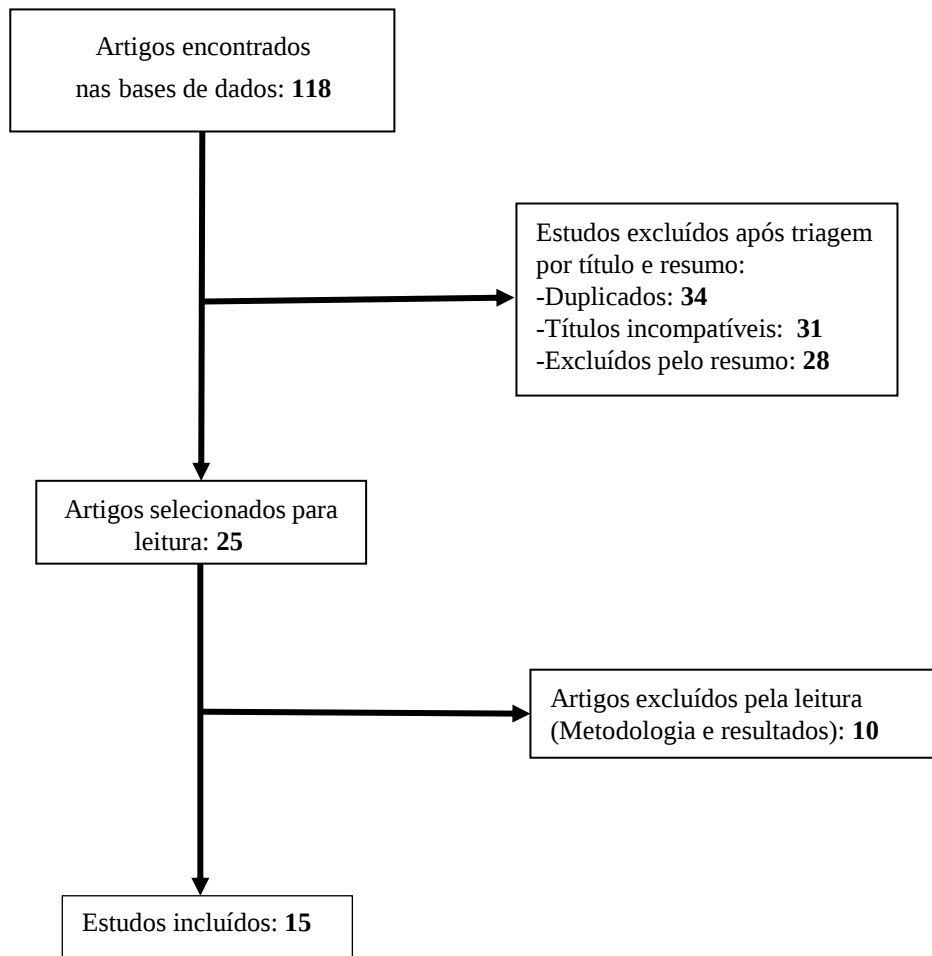


Figura 2. Processo de identificação, triagem e estudos para a revisão sistemática, (Autores, 2023).

3. RESULTADOS

É expressiva a quantidade de pesquisas relacionadas a eficiência energética em processos de fabricação por usinagem nos últimos anos. Pesquisas tem sido desenvolvida na modelagem e monitoramento da eficiência energética para o processo de fresamento, propiciando a otimização dos parâmetros de usinagem por meio de técnicas computacionais de forma *online*.

Shin et al. (2017) desenvolveram uma modelagem denominada de modelos de componentes, para implementar a otimização de consumo de energia em uma fresadora de forma online. Os modelos foram criados usando os dados históricos, incluindo planos de processos, programas *numerical control* (NC) e dados de monitoramento da máquina. Um experimento foi realizado no processo de fresamento para viabilizar o método estudado. A principal métrica considerada no estudo foi a energia, não sendo considerado os padrões de rugosidade da usinagem. Para viabilizar a metodologia se considerou os parâmetros de corte: velocidade de corte, avanço de corte e profundidade de corte. Ficou concluído nesse estudo que a energia consumida é reduzida com o aumento dos referidos parâmetros.

No trabalho desenvolvido por Cain et al. (2018) foi considerado inicialmente ser muito difícil identificar o estado de eficiência energética nos processos de fresamento uma vez que a eficiência energética é diferente da potência e do consumo de energia. Sabendo que fatores como condições da máquina e desgaste da ferramenta tem uma grande influência nesse aspecto. Então é proposto em sua pesquisa a identificação do estado de eficiência energética em processo de fresamento usando o modelo oculto de Markov e raciocínio das informações. A trabalho experimental foi realizado na fresadora modelo DMUSO, sendo que a alta eficiência foi vista quando as taxas de velocidade do fuso e remoção do material são maiores. O método apresentado no trabalho é viável para identificação do estado de eficiência energética em fresagem.

Haas et al. (2019) apresentaram em seu trabalho uma plataforma de monitoramento inteligente de consumo de energia para processo de usinagem por meio de um único indicador de consumo de energia elétrica (EECI). Eles usaram o monitoramento de consumo de energia em processo de fresamento com medição de energia e força de corte. Para testar a eficiência do EECI foram realizados testes de usinagem em dois tipos de fresadoras com os mesmos parâmetros de corte, em segundo lugar teste que foi realizado utilizando apenas uma fresadora com variação dos parâmetros de corte,

em terceiro lugar outro teste é realizado com variação da ferramenta de corte. Foi constatado pelos testes a eficácia do método na avaliação da eficiência energética nos processos de usinagem e máquinas-ferramentas.

Outra vertente dos estudos é analisar a influência das estratégias de usinagem e complexidade das superfícies na eficiência energética do processo de fresamento.

Li et al. (2017) analisaram a influência do número de passes e dos parâmetros de corte na eficiência energética e custos de produção em processos de usinagem. O processo analisado foi o fresamento. Para tanto foi realizada uma modelagem matemática e a otimização do modelo foi obtida com algoritmo AMOPSO. A validação dos resultados ocorreu mediante testes de usinagem, onde os melhores resultados obtidos para retirada de 12 mm de material apresentaram a seguinte configuração: 3 passes de desbaste e 1 passe para acabamento. Reduzindo assim o consumo de energia do equipamento em 23,6% e os custos de produção em 12,4%.

Carlini et al. (2020) avaliaram o consumo de energia elétrica e o desgaste da ferramenta de corte levando em consideração a estratégias de usinagem no processo de fresamento. Os ensaios de fresamento foram realizados com uma fresa com diâmetro de 10 mm de metal duro revestida de AlCrN. Os parâmetros de corte foram fixados em: avanço de corte de 2000 mm/min, profundidade de corte de 3 mm, profundidade de corte radial de 2 mm e velocidade de corte de 20 m/min. A usinagem foi realizada usando três tipos de trajetórias fornecidas pelo software Edgcam: Spiral, Waveforme e Laceform. Os resultados indicaram que a estratégia Spiral apresentou um tempo de usinagem 50% menor em relação as outras duas estratégias e 31% de eficiência energética. A estratégia Laceform apresentou maior desgaste de ferramenta.

Zhao Junhua et al. (2019) analisaram a influência da complexidade da superfície da peça na eficiência energética e no consumo de energia do processo de usinagem por fresamento. Foi desenvolvido um modelo matemático da complexidade da superfície e os experimentos foram realizados na operação de desbaste e acabamento de uma liga de alumínio C6061. Os resultados apresentaram que o aumento da complexidade de superfície da peça gera um acréscimo no consumo de energia e no tempo de usinagem.

Muitas pesquisas têm sido desenvolvidas na eficiência energética para o processo de fresamento, buscando a otimização dos parâmetros de usinagem por meio de técnicas computacionais. Os resultados são precisos quando comparados com as medições experimentais.

Zhao Guoyong et al. (2018) estudaram a influência dos parâmetros de corte na qualidade da superfície usinada da peça e no consumo de energia do processo de fresamento. A otimização dos parâmetros de corte foi realizada pelo método de análise relacional GREY. Os parâmetros ideais para produzir um menor consumo de energia foram: profundidade de corte de 1 mm, profundidade de corte radial de 16 mm, avanço de corte de 500 mm/min e número de rotação por minuto de 600 rpm, para a usinagem do aço 1045 na operação de semi acabamento.

Cai et al. (2018) propuseram um modelo de estado de eficiência energética para o processo de fresamento. Os resultados comprovaram que o modelo apresentou alta eficiência energética com um percentual de 42,83%.

Pawar et al. (2021) estudaram o consumo de energia no fresamento levando em consideração as geometrias circulares de usinagem. Foi desenvolvido um modelo matemático da geometria considerando as variáveis do processo como: avanço por dente, ângulos de entrada e saída do dente. Em seguida é realizado a modelagem de força considerando as variáveis das geometrias e constantes de corte. Por último o consumo energético também é modelado com base na componente da força instantânea e velocidade de corte da ferramenta para estimar a potência consumida no fresamento de geometrias circulares. Os experimentos foram realizados para validar o modelo, concluindo-se que as geometrias circulares côncavas consomem maior energia do que as convexas.

Li et al. (2020) abordaram uma análise exegética para avaliar a eficiência energética abrangente de uma fresadora, considerando o consumo de energia para remoção de material e estabilidade térmica. Os resultados mostraram que a eficiência energética convencional (considerando apenas a remoção de material) foi de 14,38% que é um valor considerado baixo. Enquanto que quando a estabilidade térmica é alcançada esse valor de eficiência energética vai para 21,57%.

Zhou et al. (2018) apresentaram um modelo de otimização de parâmetros de corte focando na minimização de tempo e consumo de energia por material removido na operação de fresamento de topo. Para realizar a otimização foi utilizado um algoritmo genérico (GA) e os experimentos foram feitos pela metodologia de Taguchi. Os resultados comprovaram que a otimização dos parâmetros de corte reduziu o consumo de energia e tempo de processamento do fresamento de topo.

Chen et al. (2019) estudaram a otimização dos parâmetros de corte e da ferramenta de corte de forma integrada. A otimização foi resolvida por meio de algoritmo multi-objetivos. Os testes de validação do modelo de otimização foram realizados com uma série de ferramentas de diâmetro e números de dentes variados na usinagem de aço com resistência de 650 Mpa. O modelo de otimização integrada dos parâmetros de corte e ferramenta de corte apresentou redução no consumo de energia de 30,96% em relação a otimização dos parâmetros relacionados e ferramenta e de 28,05% em relação aos parâmetros de corte.

Outro fator estudado por meio das pesquisas é a influência da refrigeração de corte na rugosidade e na eficiência energética para os processos de fresagem. Percebe-se que os fluídos de corte por sua vez melhoram a qualidade das superfícies usinadas por fresamento, contribuindo também para a redução do desgaste das ferramentas fato que levará a uma redução do consumo de energia do equipamento.

Jamil Muhammad et al. (2020) estudaram a influência da aplicação de refrigeração de corte com nanofluidos na eficiência energética no fresamento da liga de titânio Ti-6Al-4V. Os resultados apresentaram que o uso dos nanofluidos híbridos Al₂O₃-MWCNTs fornecem boa lubrificação reduzindo o desgaste da ferramenta e por consequente o baixo consumo de energia. Com base nessa lubrificação conseguiu-se uma energia de corte mínima de 327 W com velocidade de rotação de 2150 rotações por minuto, avanço por dente da fresa de 0,012 mm/dente.

Em outro estudo realizado por Jamil et al. (2021) foi analisado a influência da refrigeração de corte na eficiência energética do processo de fresagem da liga de titânio Ti6AlV4. A análise foi realizada levando em consideração os seguintes modos de refrigeração: a seco, mínima quantidade de líquido (MQL) e nevoas de CO₂. Após a usinagem sob essas condições de refrigeração verificou-se que a refrigeração criogênica LN₂ obteve alta eficiência de 30,72% usando uma fresa com ângulo de hélice de 30° e velocidade de corte de 110 m/min.

Osman et al. (2020) estudaram os efeitos da lubrificação do corte com concentração de nanopartículas de nitreto de boro hexagonal na operação de fresagem em ligas de titânio. O estudo visou analisar a influência da lubrificação na rugosidade de superfície da peça e na força de corte. Ficou comprovado que o uso de nanopartículas de nitreto de boro com concentração de 24,75% reduz a força de corte em 19,8% e 35,24% na rugosidade de superfície da peça. O fluxo do fluido de corte também desempenhou uma significativa influência na força de corte e na rugosidade sendo que o fluxo 40,11 ml/h reduz a força de corte em 42,55% e 28,47% da rugosidade em relação ao fluxo 18,8 ml/h. A alta eficiência de energia foi conseguida com o uso de algoritmo PSO no software MATLAB. Os parâmetros otimizados foram: avanço de corte 0,0105 mm/dente, velocidade de corte de 73,165 m/mim, profundidade de corte de 0,81 mm, fluxo de fluido de corte de 18,8 ml/h com concentração de partículas de 0,252%.

Como foi observado que as pesquisas em geral apresentam uma concentração na otimização dos parâmetros de usinagem com o objetivo de reduzir o consumo de energia elétrica das máquinas – ferramentas, contribuindo assim para um crescimento da eficiência energética desses equipamentos.

Na Tabela 1 é apresentado um resumo comparativo dos artigos que foram estudados levando em consideração os materiais utilizados na parte experimental, os parâmetros de entrada utilizados, o equipamento utilizado e os métodos que foram necessários em cada uma das pesquisas.

Tabela 1. Comparativo sobre os artigos das pesquisas relacionadas a eficiência energética considerando os métodos, as variáveis de entrada e saída do processo de fresamento, (Autores, 2023).

Artigo	Material utilizado	Equipamento (Mod./ Fabricante)	Método	Variáveis de entrada do Processo	Resposta de saída do processo
Shin et al. (2017)	Aço 1018	Fresadora CNC MORI SEIKI NVD 1500 DCG	Modelos de componentes	Velocidade de corte, avanço por dente e profundidade de corte	Energia
Cain et al. (2018)	Inconel 625	Fresadora CNC DMU50	Modelo Hidden Markov	Velocidade de corte, avanço e profundidade de corte	Eficiência energética
Haas et al. (2019)	Aço St 52	Fresadora CNC DMG MORI e VMC600	Experimental	Velocidade de corte, avanço e profundidade de corte	Força de corte e indicador de consumo de energia elétrica
Li et al. (2017)	Aço carbono S45C	Fresadora vertical CNC VGC1500	Algoritmos AMOPSO (Adaptive multi-object particle swarm optimization)	Velocidade de corte, avanço profundidade de corte axial e radial, número de passes	Consumo de energia específica (SEC)
Carlini et al. (2020)	Aço P20 – 1.2711	Fresadora CNC ROMI D600	Experimental	Estratégias de usinagem: spiral, waveforme e laceform	Desgaste da ferramenta, volume de material removido, tempo de corte e potência consumida
Zhao Guoyong et al. (2018)	Aço 45	Fresadora Vertical CNC XD-40A	Análise de correlação GREY	Rotação por minuto, avanço, profundidade de corte axial e radial.	Consumo de energia específica (SEC) e rugosidade
Zhao Junhua et al. (2019)	Liga de alumínio C6061	Fresadora CNC JTV C650B	Algoritmo de agrupamento Fuzzy c-mens.	Modelo pentágono: peça, equipamento, corte, meta e processo	Potência total

Artigo	Material utilizado	Equipamento (Mod./ Fabricante)	Método	Variáveis de entrada do Processo	Resposta de saída do processo
Cai et al. (2018)	Aço 45	Fresadora CNC X5030A	Experimental	Número de rotações por minuto, avanço, profundidade de corte	Estado de eficiência energética
Jamil Muhammad et al. (2020)	Liga de titânio Ti6Al4V	Fresadora CNC – CARVER 400M-RT	Análise de variância (ANOVA)	Número de rotação por minuto, avanço por dente, profundidade de corte axial e radial	Volume de material removido, rugosidade e energia de corte
Pawar et al. (2021)	Liga de alumínio Al6351-T6	Fresadora CNC KODI-40	Experimental	Número de rotação por minuto, profundidade de corte e avanço	Potência de corte e potência total
Li et al., (2020)	Aço AISI 1045	Fresadora Vertical CNC	Experimental	Potência de corte, potência dos periféricos	Potência total
Zhou et al. (2018)	Aço AISI 1045	Fresadora Vertical CNC XKA 714B/B	Algoritmo Genérico	Numero de rotação por minuto, avanço, profundidade de corte axial e radial	Rugosidade, Potência e tempo
Chen et al. (2019)	Aço carbono S45C	Fresadora Vertical CNC	Algoritmo MOCS	Velocidade de corte, avanço, profundidade de corte axial e radial	Energia Total
Osman et al. (2020)	Liga de titânio Ti6Al4V	Fresadora CNC 3 eixos	Análise de variância (ANOVA)	Velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, vazão de fluido de corte e percentual de nitreto de boro	Força de corte, Rugosidade e Consumo de energia específica (SEC).
Jamil Muhammad et al. (2021)	Liga de titânio Ti6Al4V	Fresadora CNC – MICRON UCP - 710	Experimental	ângulo de helice, temperatura e velocidade de avanço	Potência total e a rugosidade de superfície

Dessa forma a partir do levantamento das informações por meio da literatura revisada, pode-se realizar algumas considerações sobre os estudos relacionados a eficiência energética em processos de usinagem por fresamento, considerando a otimização dos parâmetros de usinagem.

Nos artigos apresentados por Shin et al., Cain et al., Haas et al. e Cai et al., que tratam do monitoramento da eficiência energética com otimização dos parâmetros de usinagem online. Dessa forma conclui-se que ainda é pequena essa linha de pesquisa, podendo expandir e integrar esses parâmetros com as tecnologias da indústria 4.0 de forma a aumentar a sustentabilidade e a confiabilidade dos processos.

Li et al., Carlini et al., Zhao et al. e Pawar et al. concentraram suas pesquisas na influência das estratégias de usinagem, geometrias e complexidade da superfície fresada na eficiência energética. Os trabalhos foram realizados de forma não integrada. A busca por resultados com a integração dessas estratégias de usinagens com a quantidade de passes e complexidade da superfície a ser trabalhada na usinagem deve apresentar situações de otimização mais próximo da condição de usinagem real.

Zhou et al., Chen et al., estudaram a influência dos parâmetros de usinagem na eficiência energética visando a otimização desses parâmetros para um menor consumo de energia. Os estudos foram validados na usinagem de aços de médio teor de carbono podendo também ser validados em aço de baixo e alto carbono, atingindo dessa maneira uma maior totalidade dos aços carbono comerciais utilizados na indústria.

Jamil et al. e Osman et al. apresentaram estudos de pesquisa sobre a influência da refrigeração de corte na eficiência energética. Os resultados apresentados mostraram que o tipo de lubrificação de corte tem influência na eficiência energética na fresagem de ligas de titânio. Considerando que os fluidos de corte são prejudiciais ao meio ambiente e ao ser humano essa vertente de pesquisa deve ser mais explorada.

As pesquisas que envolvem a eficiência energética nos processos de usinagem por fresamento devem considerar objetivos que contemplem perspectivas relacionadas ao meio ambiente.

É importante salientar que os estudos realizados pelos autores dessa revisão de literatura fazem o uso de técnicas computacionais e equipamentos comandados por computadores (CNC). Essas técnicas propiciaram através do uso de algoritmos uma aproximação precisa dos valores calculados em relação aos valores mensurados experimentalmente. Por outro lado, as máquinas CNCs apresentam maior flexibilidade do processo, repetibilidades das operações de usinagem, precisão dimensional e bons acabamentos superficiais das peças ensaiadas, esse é um fator contribuinte para a realização dos estudos.

Outro aspecto que podemos analisar a partir da Tab. 1 é o tipo de material que é utilizado para os estudos em cada pesquisa. A Figura 3, apresenta em termos percentuais os materiais que foram utilizados nas pesquisas que foram selecionadas para esse trabalho.

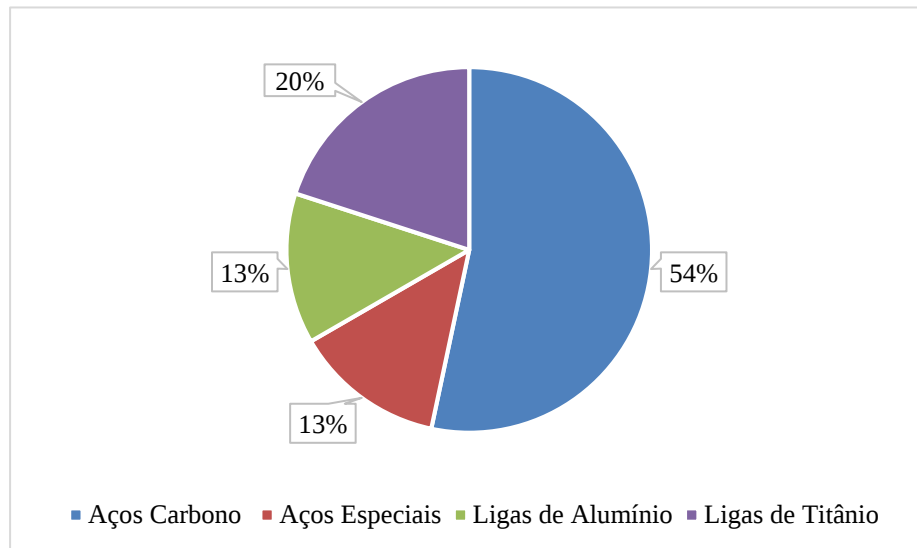


Figura 3 – Gráfico do percentual dos materiais utilizados nas pesquisas nos últimos anos, (Autores, 2023).

De forma geral fica expressiva a tendência do uso dos aços carbono para os estudos sobre as análises de consumo de energia elétrica nos processos de usinagem por fresamento nos últimos anos, sendo as ligas metálicas não ferrosas os materiais menos utilizados.

Na Tabela 2 é apresentado um resumo dos principais modelos dos trabalhos pesquisados para determinar o consumo de energia.

Tabela 2 – Principais modelos utilizados na determinação do consumo de energia, (Autores, 2023).

Artigo	Modelo	Observações
Jamil Muhammad et al. (2021)	$SCE = \frac{E_{machining}}{MRR}$	As unidades de medidas para a Energia de usinagem e taxa de remoção do material são: kwh e mm ³ /min respectivamente.
Zhao Guoyong et al. (2018)	$SEC = \frac{P_{total}}{MRR}$ $SEC = k_0 + \frac{P_{rfo} + P_{coll} + C}{MRR} + \frac{S}{MRR} + n$ $SEC = k_0 + \frac{k_1}{MRR} + \frac{k_2}{MRR} + n$ k0, k1 e k2 são coeficientes.	A potência total é determinada levando em consideração a bomba de refrigeração e a potência do fuso em vazio.
Cain et al. (2018)	$E = \frac{P_c}{60n_s Z}$ Ns é o coeficiente de energia especifica do fuso principal.	Foi levado em consideração também a eficiência energética instantânea.
Jamil Muhammad et al. (2020)	$y = \alpha_0 + \sum_i \alpha_i b_i + \sum_{i < j} \alpha_{ij} b_i b_j + \sum_i \alpha_{ii} b_i^2 + \epsilon$ y é a reposta de saída (Ec), α são os coeficientes e b são as variáveis de interação ou de ordem superior.	Utilizado um modelo de regressão de ordem superior a unidade da SEC e da Ra são: Watts e Micrometros respectivamente.

Artigo	Modelo	Observações
Chen et al. (2019)	$E_{footprint} = E_{electrical} + E_{tool-embodied}$	A energia de faceamento no fresamento é a soma da energia da máquina com a energia da ferramenta.
Haas et al. (2019)	$EECI = \frac{E}{RMV k_c}$ Kc é a força de corte específica do material.	O EECI é um indicador de consumo de energia elétrica e o E é a energia elétrica consumida
Li et al. (2017)	$E_{total} = E_{start-up} + E_{standby} + \sum_{i=1}^m (E_{air}^i + E_{machining}^i) + E_{tc}$ I = 1,2 ...significa a i-ésima passada de desbaste.	A energia total é determinada levando em consideração todo o processo de fresamento de múltiplas passadas.
Li et al., (2020)	$E = \frac{E_{MR} + \Delta Q}{E_{ELEC.TOTAL}}$ ΔQ é a energia térmica dissipada e EMR é a energia de remoção do material.	Para esse estudo foi considerado a energia térmica.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve como objetivo trazer a luz, por meio de uma revisão sistemática de literatura, estudos que envolvem as características de pesquisas que relacionam a eficiência energética de processos de fabricação por usinagem em operações de fresamento, evidenciando materiais e equipamentos empregados em testes, parâmetros de processo utilizados como variáveis de entrada, métodos e técnicas aplicadas na avaliação da usinagem e sua relação com o consumo de energia.

Por meio da leitura e análise dos materiais coletados, pode-se realizar considerações importantes sobre estudos relacionados ao consumo de energia, que são:

- A análise da eficiência energética baseada na remoção de material tem um enfoque amplo em todas as pesquisas revisadas nesse artigo, fazendo parte da literatura de referência. Isto é, foi observado que a energia de corte é influenciada pelos parâmetros de corte: velocidade de corte, avanço de corte e profundidade de corte utilizados no processo de fresamento;
- A importância de pesquisas que relacionam o consumo eficiente e racional de energia em processos de usinagem classificados como puramente convencionais (torneamento, furação) e os não convencionais (mandrilhamento, brochamento, jato de água), considerando a importância dos mesmos na fabricação de componentes que fazem parte dos sistemas mecânicos.
- Estudos que associam a performance dos processos de usinagem não podem dissociar aspectos qualitativos quando associados ao consumo de energia;
- A otimização dos parâmetros de corte é uma abordagem comum para melhorar o desempenho das máquinas-ferramentas levando em consideração fatores como: taxa de produção, qualidade da superfície usinada e vida útil da ferramenta de corte;
- O consumo de energia na usinagem varia com diferentes caminhos da ferramenta, estratégias de usinagem, complexidade da geometria da peça e com o uso de diferentes técnicas de refrigeração da peça como por exemplo a mínima quantidade de líquido (MQL).
- Levando em consideração a demanda de energia no Brasil e o grande número de equipamento de usinagem observa-se uma necessidade de mais pesquisas sobre a eficiência energética, consumo, perda de energia e otimização de parâmetros de corte em processos de usinagem.
- As pesquisas desenvolvidas nessa área também favorecem ao melhoramento dos projetos de máquinas – ferramentas, considerando os aspectos econômicos, humanos e de meio ambiente.

5. REFERÊNCIAS

- Cai, Y., Yuana, J., Shao, H., Liao, S. 2018. "Energy Efficiency State Mechanism and Identification in Milling Processes". *Procedia CIRP* 72, p.1487-1492.
- Cai, Y., Shi, X., Shao, H., Wang, R., Liao, S. 2018. "Energy efficiency state identification in milling processes based on information reasoning and Hidden Markov Model". *Journal of Cleaner Production*. 193, p.397-413.
- Campatelli, G., Scippa, A., Lorenzini, L., Sato, R., 2015. "Optimal workpiece orientation to reduce the energy consumption of a milling process". *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. Vol. 2, p. 5-13.
- Carlini, G. C., Moura, C. R., Silva C. 2020. "Avaliação do consumo de energia elétrica e desgaste de ferramenta durante o processo de fresamento sobre diferentes trajetórias". *Revista Gestão Industrial*. vol.16, p.76-91.
- Chen, X., Li, C., Tang, Y., Li, L., Du, Y., Li, L. 2019. "Integrated optimization of cutting tool and cutting parameters in face milling for minimizing energy footprint and production time". *Energy*. 175, p.1021-1037.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Balanço Energético Nacional. 2020. 30 Nov. 2020 <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020_sp.pdf>.
- Ferraresi, D. "Fundamentos da usinagem dos metais". São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1977.
- Haas, F., Suárez, A., Cus, F., Zuperl, U. 2019. "Platform for monitoring and comparing machining processes in terms of energy efficiency". *Transactions of the ASME*. p. 31-47.
- He, Y., Liu, B., Zhang, X., Gao, H., Liu, X., 2012a. "A modeling method of task-oriented energy consumption for machining manufacturing system". *Journal of Cleaner Production* 23, 167e174.
- Jamil, M., Khan, A. M., Hegab, H., Gupta, M. K., Mia, M., He, N., Zhao, G., Song, Q., Liu, Z. 2020. "Milling of Ti-6Al-4V under hybrid Al₂O₃-MWCNT nanofluids considering energy consumption, surface quality, and tool wear: a sustainable machining". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. p.1-17.
- Jamil, M., Zhao, W., He, N., Gupta, M. K., Sarikaya, M., Khan, A. M., Sanjay M. R., Siengchin, S., Pimenov, D. Y. 2021. "Sustainable milling of Ti-6Al-4V: A trade-off between energy efficiency, carbon emissions and machining characteristics under MQL and cryogenic environment". *Journal of Cleaner Production*. 281, p.1-15.
- Li, B., Cao, H., Hon, B., Liu, L., Gao, X. 2020. "Exergy-based Energy Efficiency Evaluation Model for Machine Tools Considering Thermal Stability". *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. p.1-12.
- Machado, A. R. et al.: "Teoria da Usinagem dos Metais". 1ª ed., São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2009.
- Li, C., Chen, X., Tang, Y., & Li, L. 2017. Selection of optimum parameters in multi-pass face milling for maximum energy efficiency and minimum production cost. *Journal of Cleaner Production*, 140, 1805-1818.
- Osman, K. A., Yilmaz, V., Ünver, H. O., Eker, U. S., Kılıç, S. E. 2020. "Slot milling of titanium alloy with hexagonal boron nitride and minimum quantity lubrication and multi-objective process optimization for energy efficiency". *Journal of Cleaner Production*. 258, p. 1-15.
- Pawar, S.S., Bera, T.C., Sangwan, K.S. 2021. "Modelling of Energy Consumption for Milling of Circular Geometry". *Procedia CIRP* 98, p.470-475.
- Shin S-J, Woo J, Rachuri S. 2017. "Energy efficiency of milling machining: Component modeling and online optimization of cutting parameters". *Journal of Cleaner Production*. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.05.013, p.1-36.
- Zhao, G., Guob, Y.B., Zhua, P., Zhao, Y. 2018. "Energy Consumption Characteristics and Influence on Surface Quality in Milling". *Procedia CIRP* 71, p.111-115.
- Zhao, J., Li, L., Wang, Y., Sutherland, J. W. 2019. "Impact of surface machining complexity on energy consumption and efficiency in CNC milling". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. p.1-15.
- Zhou, L., Li, J., Li, F., Mendis, G., Sutherland, J. W. 2018. "Optimization Parameters for Energy Efficiency in End milling". *Procedia CIRP* 69, p.312-317.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

ENERGY EFFICIENCY THE MILLING MACHINING PROCESS: A LITERATURE REVIEW

Francisco Roberto de Sá Pereira

Francisco Nélío Costa Freitas

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – Campus de Maracanaú
frpereirasa@gmail.com; fneliofc@ifce.edu.br

Abstract.

Energy efficiency has become an integral part of machining manufacturing industries as a means of improving economic and environmental performance thereby increasing competitiveness. Machine tools are not only the main consumer of energy in the manufacturing industry, however it is possible to improve the energy efficiency of these machines by reducing energy consumption through the optimization of machining parameters, since studies show that in a milling machine machining represents 65% of energy consumption. Among the machining processes, milling stands out because it has wide application in the manufacture of mechanical components found mainly in the Metalworking industries. Therefore, it is important to analyze the energy consumption performed by milling in order to understand its complex and dynamic behavior. Given the above, this research aims to characterize the main studies related to energy efficiency and energy consumption in the milling process, contributing to the promotion of other academic research related to this theme. In this review article, the reference literature is identified using a systematic methodology carried out on the bases of Science Direct, Web of Science and SCOPUS followed by a description and content analysis to understand the evolution of research on energy efficiency in the milling machining process. Articles from the last five years that relate energy efficiency, energy consumption, influence of cutting parameters, cutting fluids and tool parameters in machining processes of metallic materials by milling in numerical control machines were used as inclusion criteria in this review. Computerized (CNC) and conventional machines. As exclusion criteria, studies that related the micro milling process to energy consumption, machining in non-metallic materials, material removal by electrical discharge processes and milling with laser technology. The literature review shows that research in the area has developed greatly in recent years. It is observed that energy consumption models are more accurate due to the increased use of computational methods. It was verified in the researches that the optimization of the machining parameters in milling has been tested presenting satisfactory results. For that, it was noticed the need to expand studies to characterize energy consumption in a conventional milling machine, bringing practical and academic applications closer together and greater amounts of experimental work.

Keywords: Energy Efficiency, Machining, Milling.

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.