

## EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM PROCESSOS DE USINAGEM POR TORNEAMENTO CNC: UMA REVISÃO DA LITERATURA

Jean Carlos Alves Fernandes, [jean.carlos.alves02@aluno.ifce.edu.br](mailto:jean.carlos.alves02@aluno.ifce.edu.br)

Francisco Nélcio Costa Freitas, [fneliocf@ifce.edu.br](mailto:fneliocf@ifce.edu.br)

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – Campus Maracanaú, Av. Parque Central, nº 1315 – Bloco da Indústria/Laboratório de Ensaios Mecânicos – Bairro: Distrito Industrial I - Maracanaú - CE - CEP: 61939-140

**Resumo.** A geração de energia mundial mostrou um crescimento significativo diante da demanda da sociedade, e esse aumento energia ocorre principalmente, devido a globalização, o crescimento populacional e a expansão da indústria. O uso racional de energia, ou a eficiência de máquinas-ferramentas melhoram o desempenho dos processos de usinagem, por conta da melhoria de desempenho econômico e ambiental, transformando-se em um segmento atrativo para o desenvolvimento de pesquisas acadêmicas e aplicadas. Diante disso, o presente artigo tem como objetivo caracterizar os estudos que relacionam a eficiência energética de processos de fabricação por usinagem por meio do torneamento CNC aos parâmetros de corte do referido processo. Para isso, é utilizada uma revisão sistemática da literatura tendo em vista o cumprimento dessa necessidade. Foram identificados nos artigos selecionados as características relacionadas aos materiais utilizados, equipamento para parte experimental, parâmetros de entrada, avaliação e métodos utilizados. A revisão dos trabalhos mostrou que além do consumo de energia, outras métricas são utilizadas na avaliação da usinagem, outro ponto foi que poucas pesquisas desenvolveram a parte experimental em equipamentos fabricados no Brasil e grande parte utilizam técnicas computacionais e/ou ferramentas estatísticas para a otimização da usinagem.

**Palavras chave:** Eficiência energética. Usinagem. Torneamento CNC. Parâmetros de corte.

### 1. INTRODUÇÃO

A disponibilidade de fontes de energia em larga escala é algo que, historicamente, impulsionou o desenvolvimento tecnológico. A globalização, o crescimento da população e a expansão da indústria proporcionaram um aumento significativo na demanda de energia. O relatório *Key World Energy Statistics* de 2019 disponibilizado pela *International Energy Agency* mostra que, considerando o intervalo dos anos de 1973 a 2017, a geração de energia mundial passou de uma demanda 6.131 TWh para 25.606 TWh, um aumento de aproximadamente 318% em 44 anos (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2019).

Toda essa necessidade por parte da sociedade fez com que surgissem novas pesquisas relacionadas as fontes e recursos energéticos, uma vez que o uso em grandes quantidades de combustíveis fósseis contribuíram com 29,3 gigatoneladas de emissões de carbono em 2008 e espera-se que aumente para 35,4 gigatoneladas em 2035 (Campatelli *et al.*, 2015).

Dentre os maiores consumidores de energia e grandes volumes de emissões de CO<sub>2</sub>, podemos destacar as indústrias de manufatura. Segundo o IEA (2007), as mesmas são responsáveis 1/3 da energia total consumida e 36% do total de emissões de CO<sub>2</sub>.

No Brasil, esse número quanto ao consumo de energia não são diferentes. Dos 259, 4 Mtep (Tonelada equivalente de petróleo) o setor industrial foi responsável por 30,4% do consumo de energia do país, perdendo apenas para o setor de transportes, com um consumo de 32,7%. Já nas emissões de CO<sub>2</sub>, o setor foi responsável por 75,8 Milhões de toneladas de dióxido de carbono (Mt CO<sub>2</sub><sup>-eq</sup>), correspondendo a 18,0 % das emissões totais (EPE, 2020). Comparado com o percentual das indústrias de manufatura do mundo, o Brasil apresenta esse valor percentual pelo fato de apresentar um volume significativo de fontes sustentáveis de energia na Indústria.

Em uma pesquisa realizada pela Confederação Nacional da Indústria (CNI) publicado na revista *Sondagem Especial* com indústrias de toda a região do país, 79% dessas utilizam energia elétrica como fonte principal, em segundo lugar o óleo diesel, com 4%.

Considerando as indústrias de manufatura, temos aquelas que desenvolvem atividades relacionadas aos processos de usinagem. Os processos de usinagem são considerados na indústria metalmeccânica como sendo os mais antigos e podem ser aplicados tanto em materiais metálicos, como os não metálicos (Rigatti, 2010).

Representam uma classe importante de processos de fabricação para inúmeros setores que exigem alta precisão e flexibilidade em processamento de diferentes tipos de materiais (Apostolos *et al.*, 2013).

Apesar de sua importância na fabricação de peças e componentes, os equipamentos de usinagem possuem um consumo expressivo de energia elétrica, em certos lugares operam com eficiência abaixo de 30% (Anderberg *et al.*, 2010) e são responsáveis por elevadas taxas de emissão de carbono (Li *et al.*, 2015 e Zhou *et al.*, 2016). Todos esses fatores sinalizam um alto potencial quanto a otimização, economia e uso sustentável de energia.

Sáez-Martínez *et al.* (2016) colocam que as indústrias do setor de manufatura observaram que, estratégias que visam melhorar a eficiência energética e reduzir impactos ambientais trazem negócios sustentáveis e fornecem benefícios aos seus processos.

A Eficiência Energética tem como objeto melhorar a produtividade com a utilização de energia sem aumentar o seu consumo (ABESCO, 2015). O uso racional de energia, ou a eficiência de máquinas-ferramentas melhoram o desempenho dos processos de usinagem, por conta da melhoria de desempenho econômico e ambiental, transformando-se em um segmento atrativo para o desenvolvimento de pesquisas acadêmicas e aplicadas.

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

## 2. METODOLOGIA DE PESQUISA

Para a busca nas bases de dados, foi utilizada uma expressão lógica com as seguintes palavras-chave: (“energy consumption” OR “energy efficiency”) AND (“machining” OR “cutting parameters”) AND (“turning”). Como a pesquisa foi realizada em bases de referência, a língua inglesa limitou a coleta de material. O presente estudo considerou artigos desde 2015. As expressões mencionadas acima foram adequadas à estrutura de pesquisa do *Science Direct*, *Web of Science* e SCOPUS no que diz respeito ao título e palavras-chave. Na busca, foram considerados como critérios de inclusão os estudos que relacionam como ocorre a influência dos parâmetros de corte na eficiência energética em processos de usinagem por torneamento CNC. Já como critérios de exclusão, os estudos que relacionavam características não associadas aos parâmetros de corte no consumo de energia, processos de manufatura não convencionais, usinagem em materiais não metálicos, remoção de material por processos químicos foram desconsiderados.

Ao final dessa etapa, foi obtido um total de 348 trabalhos, sendo 88 na base *Science Direct*, 106 na *Web of Science* e 154 na SCOPUS.

Em seguida, todos os trabalhos foram submetidos a uma seleção e após a identificação, remoção de trabalhos duplicados, títulos e resumos incompatíveis um total de 50 trabalhos foram atribuídos à próxima etapa.

Por fim, cada artigo foi verificado tendo em vista o objetivo principal da pesquisa. Após a análise, 18 artigos foram identificados segundo os objetivos mencionados conforme mostrado na figura 1.

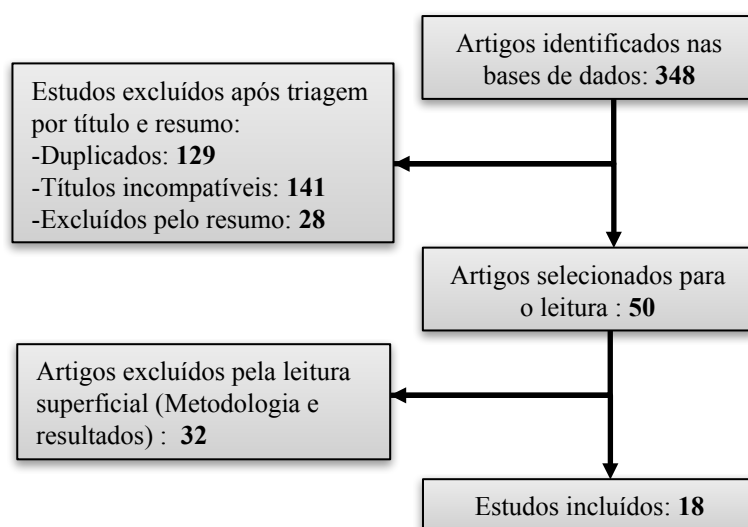


Figura 1. Processo de identificação, triagem e estudos para a revisão sistemática. (Adaptado de GONDIM *et. al.*, 2018)

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A quantidade de estudos relacionados ao consumo de energia em processos de fabricação por usinagem aumentou significativamente nos últimos anos.

Camposeco-Negrete (2015) apresentou um estudo que relaciona o consumo de energia com a otimização dos parâmetros de corte em uma liga de alumínio AISI 6061 T6, considerando o processo de desbaste. A parte experimental foi realizada em um torno SL 10 da HAAS. Com a otimização dos parâmetros, o consumo de energia reduziu em 14,41% e a rugosidade superficial 360,47%.

Um outro estudo desenvolvido por Warsi *et al.* (2015) também analisou o consumo de energia na usinagem, também em uma liga 6061T6 de alumínio, contudo foram utilizados valores mais altos dos parâmetros velocidade de corte e avanço por rotação. Os resultados foram refinados por meio de Análise de Variância (*ANOVA*) e através de gráficos de contorno (*Contour Plots*) foram observadas regiões de menor consumo de energia, aonde serviram de base para experimentos posteriores.

Em 2016, Zhong publicou um estudo sobre regras que podem auxiliar na escolha de parâmetros de corte que tem como objetivo minimizar o consumo de energia, no caso a energia específica de corte. Na pesquisa, são estruturadas sete regras que se possibilitaram a escolha dos parâmetros de corte ideais para um mínimo consumo de energia. Em seguida, os parâmetros obtidos foram aplicados no torneamento externo de aço ao carbono em dois equipamentos, um CK6153i e CK6136i, ambos de fabricante da China. O estudo conclui que as orientações quanto a decisão dos parâmetros de corte para um modelo de Energia Específica de Corte pode ser obtido por meio de manuais técnicos de usinagem (Zhong *et al.*, 2016).

Camposeco-Negrete *et al.* (2016) apresentou uma nova pesquisa experimental com o intuito de reduzir a quantidade de energia consumida por dois centros de torneamento, o SL10 e o CTX 410, modelos da HAAS e GILDEMEISTER respectivamente, durante o processo de remoção de material, considerando os parâmetros de corte no torneamento de um aço AISI com baixo teor de carbono, o 1018.

Para otimização do consumo de energia, foi utilizado o método *Robust Design*, de Taguchi, para identificar os efeitos dos parâmetros de corte na energia consumida. A pesquisa mostrou que uma determinada combinação para os parâmetros velocidade de corte, avanço por rotação e profundidade radial de corte pode levar um consumo mínimo de energia (Camposeco-Negrete *et al.*, 2016).

Também em 2016, Bilga *et al.* (2016) publicou uma pesquisa relacionada ao consumo de energia com os parâmetros de corte em um processo de torneamento. Além dos parâmetros velocidade de corte, avanço e profundidade de corte, Bilga incorpora o raio de ponta no estudo como variável de entrada. O estudo visa avaliar a eficiência energética, energia ativa consumida pela máquina e o fator de potência. A análise experimental foi realizada em um torno Stallion 100 HS (HMT), considerando a operação de desbaste em um aço EN 353. O método Taguchi é utilizado para otimização e a *ANOVA* para verificação do impacto desses parâmetros na dinâmica do corte (Bilga *et al.*, 2016).

Os resultados obtidos no estudo foram que a profundidade de corte é um parâmetro que determina o Fator de Potência e a Eficiência Energética e que com a otimização realizada foi alcançado uma melhora de 61,776%, 57,025% e 7,29% para a Eficiência Energética, Energia Ativa Consumida pela Máquina e o Fator de Potência respectivamente.

Em 2017 os estudos de Kumar *et al.* (2017), He *et al.* (2017) e Sangwan e Kant (2017) foram importantes, pois promoveram novos métodos para análise e otimização do consumo de energia no processo de torneamento.

Kumar *et al.* (2017) desenvolveu uma pesquisa que utiliza técnicas de multicritério para tomada de decisões, com o intuito de melhorar o consumo de energia no torneamento. O estudo é centrado em verificar a influência dos parâmetros velocidade de corte, avanço, profundidade de corte e raio de ponta em respostas de consumo do equipamento (Eficiência do equipamento, de material, potencia e energia ativa consumida pelo equipamento de usinagem e fator de potência) na rugosidade superficial e na taxa de remoção de material. A parte experimental foi realizada em um torno CNC Stallion 100 HS (HMT) na operação desbaste. Por meio das técnicas de multicritério AHP (*Analytic Hierarchy Process*), *Entropy Weight* e TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) e otimização realizada por meio do Método Taguchi e Análise de Variância (*ANOVA*) houve uma melhora expressiva nos parâmetros de corte em comparação com os que são utilizados comumente no torneamento.

No estudo de He *et al.* (2017) predomina uma articulação entre aspectos econômicos e ambientais na usinagem. Nele, são verificados a relação entre a velocidade de corte, avanço por rotação, profundidade radial e axial de corte, e o consumo de energia, força de corte e tempo de usinagem. A parte experimental foi realizada em um torno CNC CK6153i e um centro de usinagem CNC XHK-714F em aço ao carbono C45E4. Através da otimização realizada por meio de algoritmos evolucionários, considerando as Fronteiras de Pareto ideais, pode-se chegar a combinações adequadas para os parâmetros de usinagem para um consumo eficiente de energia.

Sangwan e Kant (2017) trazem um estudo que relacionam os parâmetros avanço por rotação, profundidade axial e radial de corte com o consumo de energia no torneamento de um aço AISI 1045. A pesquisa utiliza a Metodologia de Resposta de Superfície e Algoritmos Genéticos para prever o consumo de energia.

Através do Método Taguchi e a validação por *ANOVA* pode-se observar que a profundidade de corte é o parâmetro que tem maior influência no consumo de energia, seguido pela velocidade de corte e o avanço (Sangwan e Kant, 2017).

A pesquisa de Bagaber e Yussoff (2017) mostra a otimização dos parâmetros velocidade de corte, avanço por rotação e profundidade radial de corte para um menor consumo de energia por meio da Metodologia de Resposta de Superfície e análise de parâmetros de desejáveis no torneamento de um aço inoxidável AISI 316. A parte experimental foi feita em um torno CNC modelo ROM 240 e foram avaliados a energia de corte, a rugosidade superficial e o desgaste de ferramenta.

O artigo conclui que a metodologia utilizada se mostra efetiva para processo de usinagem, pois proporcionou um consumo mínimo de energia de 14,94%, a redução da rugosidade em 4,71% e o desgaste de ferramenta em 13,98% (Bagaber e Yusoff, 2017).

Em 2018, Bagaber e Yusoff publicaram dois novos estudos considerando a usinagem por torneamento no aço inoxidável AISI 316 em um equipamento ROMI. Nos dois estudos, são considerados como parâmetros de entrada a velocidade de corte, o avanço por rotação e profundidade radial de corte. A diferença consta nos parâmetros de avaliação.

No primeiro estudo são avaliados a energia de corte e a rugosidade superficial, e o método de otimização utilizado é a Metodologia de Resposta de Superfície (Bagaber e Yusoff, 2018a). No segundo, são avaliados a energia total e o custo da usinagem, e a otimização é feita através de Algoritmos Genéticos (NSGA-II) (Bagaber e Yusoff, 2018b).

Warsi *et al.* (2018) publicaram duas novas pesquisas no ano de 2018. Nos dois estudos são desenvolvidos mapas de energia para determinação de um menor consumo na operação de torneamento de uma liga de alumínio AISI6061 T6. Nos dois estudos, são considerados como parâmetros de entrada a velocidade de corte, o avanço por rotação e profundidade radial de corte, e a parte experimental é realizada em um torno CNC ML-300 CNC, YIDA.

A diferença entre os dois estudos encontra-se na abordagem, pois uma considera apenas o consumo na máquina-ferramenta (Warsi *et al.*, 2018a) e a outra admite a interação entre peça e a máquina-ferramenta (Warsi *et al.* 2018b).

Já Zhang *et al.* (2018) desenvolveu um estudo com objetivo de relacionar os fatores energia, ruído e custo em processos de torneamento através da otimização de parâmetros de corte. São considerados como parâmetros de entrada a velocidade de corte, o avanço por rotação e profundidade radial de corte. Inicialmente é realizado um experimento ortogonal através da Metodologia de Resposta de Superfície, em seguida é feita uma Análise de Variância para determinar a influência dos parâmetros no nível de ruído e posteriormente, a otimização dos parâmetros é feita por NSGA-II.

Já Cui e Guo (2018) propõe a identificação dos parâmetros de corte ideais em um processo de torneamento intermitente em um aço AISI 1045, considerando a análise da energia específica de corte, o desgaste de ferramenta e a rugosidade superficial. Os resultados mostraram que a energia específica de corte aumenta a medida que ocorre o desgaste da ferramenta e que a faixa de 0,2 a 0,25 mm/volta para o avanço e 110 a 125 m/min para a velocidade de corte sinaliza uma vida útil significativa da ferramenta de corte e um baixo consumo de energia, mantendo a qualidade da rugosidade superficial.

Um estudo muito similar é o de Xie *et al.* (2018), que também busca por parâmetros de corte ideais para um menor consumo de energia. As diferenças estão na operação, que trata-se da de acabamento, nos parâmetros de entrada, que além das velocidade de corte e avanço por rotação, considera a profundidade radial de corte.

A pesquisa avalia a energia específica de corte, a rugosidade superficial, o desgaste de ferramenta e eficiência do equipamento através da construção de um modelo que verifica as melhores possibilidades, por meio de Algoritmos Genéticos (NSGA-III). Os resultados mostram uma redução da rugosidade, da energia de corte e melhoria da eficiência do equipamento (Cui e Guo, 2018).

Zhou *et al.* (2019) propõe um método para otimização de parâmetros de corte, considerando as emissões de carbono geradas, o tempo e o custo de usinagem com o intuito de buscar um equilíbrio entre esses índices. Através de modelos multicritério NSGA-II e NG-NSGA-II são obtidos os parâmetros ideais e a parte experimental é realizada em um torno CNC FTC20 em um aço 38CrMoAl.

A pesquisa conclui que o modelo adotado para o balanceamento das emissões de carbono, tempo e custo de usinagem através dos parâmetros de usinagem proporciona resultados razoáveis e que a questão será abordada em seus estudos futuros.

Um estudo de caso apresentado por Camposeco-Negrete e De Dios Calderón-Nájera (2019) tem como objetivo a otimização de parâmetros de corte para um menor consumo de energia. Diferente dos estudos anteriores, este foi realizado considerando o aço AISI 1045 em um torno SL 10 da HAAS. Através da Metodologia de Resposta de Superfície e análise de parâmetros desejáveis houve uma economia de energia de 4,13% do equipamento, para os valores de avanço por rotação de 0,18 mm/volta, profundidade de 2,22 mm e velocidade de corte de 366 m/min, houve também uma redução de 15,69% de energia específica de corte, diminuição de 26,36% da rugosidade e um aumento da taxa de remoção de material de 3,6%.

A tabela 2 mostra um resumo do comparativo dos artigos que foram estudados considerando o material utilizado na parte experimental, os parâmetros de entrada utilizados, modo de avaliação e os métodos que foram utilizados em cada uma das pesquisas.

Tabela 1. Artigos sobre pesquisas relacionadas ao consumo de energia considerando parâmetros de corte no torneamento (O autor).

| Artigo     | Material utilizado | Equipamento (Mod./ Fabricante) | Parâmetros de Entrada | Avaliação             | Método         |
|------------|--------------------|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------|
| Camposeco- | AISI 6061          | SL 10, HAAS                    | Velocidade de corte,  | Energia específica de | Metodologia de |

| Artigo                                 | Material utilizado            | Equipamento (Mod./ Fabricante)                            | Parâmetros de Entrada                                                                  | Avaliação                                                                                                                                                                         | Método                                                                      |
|----------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| Negrete (2015)                         | T6                            |                                                           | avanço por rotação e profundidade radial de corte.                                     | corte e rugosidade superficial.                                                                                                                                                   | Superfície de Resposta, <i>ANOVA</i> e experimental                         |
| Warsi <i>et al.</i> (2015)             | Tubo de alumínio AISI 6061 T6 | Não informado                                             | Velocidade de corte e avanço por rotação.                                              | Energia específica de corte.                                                                                                                                                      | <i>ANOVA</i> , gráficos de contorno ( <i>Contour plots</i> ) e experimental |
| Zhong <i>et al.</i> (2016)             | Aço ao carbono                | CK6153i e CK6136i, Jinan First Machine Tool Group CO. LTD | Velocidade de corte, avanço por rotação e profundidade radial de corte.                | Energia específica de corte.                                                                                                                                                      | Empírico                                                                    |
| Camposeco-Negrete <i>et al.</i> (2016) | Aço AISI 1018                 | -                                                         | Velocidade de corte, avanço por rotação, profundidade radial de corte e raio de ponta  | Energia total.                                                                                                                                                                    | Análise de efeitos, <i>Robust design</i> (Taguchi) e experimental.          |
| Bilga <i>et al.</i> (2016)             | EN 353                        | Stallion 100 HS (HMT)                                     | Velocidade de corte, avanço por rotação, profundidade radial de corte e raio de ponta. | Eficiência energética, energia ativa consumida pelo equipamento e fator de potência                                                                                               | ANOVA, TAGUCHI e experimental                                               |
| Kumar <i>et al.</i> (2017)             | Aço-liga EN 353               | Stallion 100 HS (HMT)                                     | Velocidade de corte, avanço por rotação, profundidade radial de corte e raio de ponta. | Rugosidade superficial, taxa de remoção de material, eficiência do equipamento, de material, potência e energia ativa consumida pelo equipamento de usinagem e fator de potência. | Simulação computacional (AHP, TOPSIS), TAGUCHI e experimental.              |
| He <i>et al.</i> (2017)                | Aço ao carbono C45            | -                                                         | Velocidade de corte, avanço por rotação, profundidade radial e axial de corte.         | Energia total, tempo de usinagem e força de corte.                                                                                                                                | Algoritmos genéticos e Fronteiras de Pareto.                                |
| Sangwan e Kant (2017)                  | Aço AISI 1045                 | Não informado                                             | Velocidade de corte, avanço por rotação, profundidade radial de corte.                 | Potencia de corte.                                                                                                                                                                | Metodologia de Resposta de Superfície, algoritmos enéticos e experimental.  |
| Bagaber e Yusoff (2017)                | Aço inoxidável AISI 316       | ROM 240                                                   | Velocidade de corte, avanço por rotação e profundidade radial de corte.                | Energia de corte, rugosidade superficial e desgaste de ferramenta.                                                                                                                | Metodologia de Resposta de Superfície, Parâmetros desejáveis e experimental |
| Zhang <i>et al.</i> (2018)             | Não se aplica                 | CAK6136V/750, Shenyang.                                   | Velocidade, avanço por rotação e profundidade radial de corte                          | Ruído e custo.                                                                                                                                                                    | Algoritmos Genéticos (NSGA-II)                                              |
| Cui e Guo (2018)                       | Aço AISI 1045                 | Não informado                                             | Velocidade de corte e avanço por rotação.                                              | Energia consumida, rugosidade superficial e desgaste de ferramenta.                                                                                                               | Elementos Finitos, experimental                                             |
| Xie <i>et al.</i> (2018)               | C45E4                         | CJK0640                                                   | Velocidade de corte, avanço por rotação, profundidade radial de                        | Energia específica de corte, rugosidade superficial, desgaste de                                                                                                                  | Algoritmos Genéticos (NSGA-III) e experimental                              |

| Artigo                                             | Material utilizado      | Equipamento (Mod./ Fabricante) | Parâmetros de Entrada                                                   | Avaliação                                                | Método                                               |
|----------------------------------------------------|-------------------------|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
|                                                    |                         |                                | corte.                                                                  | ferramenta e eficiência do equipamento.                  |                                                      |
| Babager e Yusoff (2018a)                           | Aço inoxidável AISI 316 | ROM 240                        | Velocidade, avanço por rotação e profundidade radial de corte.          | Energia de corte e rugosidade superficial.               | Metodologia de Resposta de Superfície e experimental |
| Bagaber e Yusoff (2018b)                           | Aço inoxidável AISI 316 | ROMI C 420                     | Velocidade de corte, avanço por rotação e profundidade radial de corte. | Energia total e custo de usinagem                        | Algoritmos Genéticos (NSGA-II) e experimental        |
| Warsi <i>et al.</i> (2018a)                        | Al 6061-T6              | ML-300 CNC, YIDA               | Velocidade e profundidade radial de corte.                              | Energia consumida.                                       | Simulação (Mapeamento de energia) e experimental     |
| Warsi <i>et al.</i> (2018b)                        | Al 6061-T6              | ML-300 CNC, YIDA               | Velocidade e profundidade axial de corte                                | Energia consumida.                                       | Simulação (Mapeamento de energia) e experimental     |
| Zhou <i>et al.</i> (2019)                          | 38CrMoAl                | Torno CNC FTC20                | Velocidade de corte, profundidade radial de corte e avanço por rotação. | Emissões de carbono, tempo de corte e tempo de usinagem. | NG – NSGA-II e NSGA-II e experimental.               |
| Camposeco-Negrete e De Dios Calderón-Nájera (2019) | Aço AISI 1045           | HAAS SL10                      | Velocidade, avanço por rotação e profundidade radial de corte.          | Energia consumida e rugosidade superficial.              | Metodologia de Resposta de Superfície e experimental |

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo proposto por este trabalho de caracterizar os estudos que relacionam a caracterizar os estudos que relacionam a eficiência energética de processos de fabricação por usinagem por meio do torneamento CNC, identificando quais os parâmetros de corte do referido processo são utilizados como variáveis de entrada, os métodos utilizados para verificar a sua relação com o seu consumo de energia e outras métricas utilizadas na avaliação da usinagem através de uma revisão sistemática da literatura foi alcançado.

A partir do levantamento das informações por meio da literatura revisada, pode-se realizar algumas considerações sobre os estudos relacionados ao consumo de energia em processos de usinagem por torneamento CNC, considerando os parâmetros de corte, que são:

- Estudos relacionados a avaliação do desempenho em processos de torneamento CNC relacionando o consumo de energia para um único modelo/ciclo de referência, ou ainda outras operações considerando parâmetros de processos não acontecem;
- Pesquisas que envolvem a energia consumida nos processos de fabricação por usinagem devem considerar objetivos que contemplem perspectivas relacionadas ao meio ambiente;
- Com o advento da Indústria 4.0, suas tecnologias podem permitir que haja um monitoramento e análise em tempo real do consumo de energia em equipamentos de usinagem. Com esses dados coletados, a condição de funcionamento dos sistemas terão maior confiabilidade, possibilitando ainda ações específicas de manutenção;
- Dos artigos selecionados, apenas 2 realizaram a parte experimental em equipamentos CNC fabricados no Brasil;
- Além da energia consumida, 7 artigos utilizam a rugosidade superficial como avaliação da qualidade da usinagem;
- A maioria dos trabalhos utilizam uma ou mais técnicas computacionais relacionadas a otimização (Algoritmos Genéticos, NSGA-II e III, Análise de Parâmetros Desejáveis, Elementos Finitos, dentre outras) e estatísticas de dados (*ANOVA*);

- Considerando a demanda de energia no Brasil, 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.

## 5. REFERÊNCIAS

- Anderberg, S.E., Kara, S., Beno, T., 2010. "Impact of energy efficiency on computer numerically controlled machining". *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.* Vol. 224, p.531-541.
- Apostolos, F. Alexios, P. Georgios, P. Panagiotis, S. George, C., 2013 "Energy Efficiency of Manufacturing Processes: A Critical Review" *Procedia CIRP*, Vol. 7, p. 628-633.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE SERVIÇOS DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA - ABESCO. O que é Eficiência Energética? (EE). 2015. 30.10.20. <[http:// www.abesco.com.br/pt/o-que-e-eficienciaenergetica-ee/](http://www.abesco.com.br/pt/o-que-e-eficienciaenergetica-ee/)>.
- Bagaber, S. A., Yusoff, A. R. 2018b "Sustainable Optimization of Dry Turning of Stainless Steel based on Energy Consumption and Machining Cost". *Procedia CIRP* Vol. 77, p. 397-400.
- Bagaber, S.A., Yusoff, A.R., 2017. "Multi-objective optimization of cutting parameters to minimize power consumption in dry turning of stainless steel 316". *J. Clean. Prod.* Vol. 157, p. 30-46.
- Bagaber, S.A., Yusoff, A.R., 2018a. "Multi-responses optimization in dry turning of a stainless steel as a key factor in minimum energy". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 96, p. 1109-1122.
- Bilga, P. S., Singh, S., Kumar, R., 2016. "Optimization of energy consumption response parameters for turning operation using Taguchi method". *Journal of cleaner production*, Vol. 137, p. 1406-1417.
- Campatelli, G., Scippa, A., Lorenzini, L., Sato, R., 2015. "Optimal workpiece orientation to reduce the energy consumption of a milling process". *Int. J. Precis. Eng. Manuf. Green Technol.* Vol. 2, p. 5-13
- Camposeco-Negrete, C., De Dios Calderón-Nájera, J. 2019. "Sustainable machining as a mean of reducing the environmental impacts related to the energy consumption of the machine tool: a case study of AISI 1045 steel machining". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 102, n. 1-4, p. 27-41.
- Camposeco-Negrete, C., Nájera, J. D. D. C., Miranda-Valenzuela, J. C. 2016. "Optimization of cutting parameters to minimize energy consumption during turning of AISI 1018 steel at constant material removal rate using robust design". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.83.5-8, p. 1341-1347.
- Cui, X. e Guo, J. 2018. "Identification of the optimum cutting parameters in intermittent hard turning with specific cutting energy, damage equivalent stress, and surface roughness considered". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 96, n. 9-12, p. 4281-4293.
- 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](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020_sp.pdf)>.
- Gondim, V. J. T., Nogueira, I. C., Alexandria, A. R. D., Gurgel, D. C., Capistrano Júnior, V. L. M., de Barros Filho, E. M. 2018. "Aplicativos de anatomia humana em dispositivos móveis: uma revisão sistemática". *Motricidade*, Vol. 14(1), p. 393-397.
- He, K., Tang, R., Jin, M., 2017. "Pareto fronts of machining parameters for trade-off among energy consumption, cutting force and processing time". *Int. J. Prod. Econ.* Vol. 185, p.113-127.
- IEA, 2007. "Tracking Industrial Energy Efficiency and CO<sup>2</sup> Emissions". 2007.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Key world energy statistics. 2019. 31 Out. 2019. <<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2019.pdf>> .
- Kumar, R., Bilga, P.S., Singh, S., 2017. "Multi objective optimization using different methods of assigning weights to energy consumption responses, surface roughness and material removal rate during rough turning operation". *J. Clean. Prod.* Vol. 164, p. 45-57.
- Li, C., Tang, Y., Cui, L., Li, P., 2015 "A quantitative approach to analyze carbon emissions of CNC-based machining systems." *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 26.5, p. 911-922.
- Rigatti, A. M. Y. 2010. *Avaliação da Força de Usinagem e Energia Específica de Corte no Fresamento com Alta Velocidade de Corte*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista (UNESP), São Paulo.
- Sáez-Martínez, F. J., Lefebvre, G., Hernández, J. J., Clark, J. H. 2016 "Drivers of sustainable cleaner production and sustainable energy options". *Journal of Cleaner Production*, Vol.138, p.1-7.
- Sangwan, K.S. e Kant, G., 2017. "Optimization of machining parameters for improving energy efficiency using integrated response surface methodology and genetic algorithm approach". *Procedia CIRP* Vol. 61, p. 517-522.
- Warsi, S.S., Jaffery, H.I., Ahmad, R., Khan, M., Akram, S., 2015. "Analysis of power and specific cutting energy consumption in orthogonal machining of Al 6061-T6 alloys at transitional cutting speeds". In *Proceedings of the ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, pp. 1-7.



- Warsi, S.S., Jaffery, S.H.I., Ahmad, R., Khan, M., Agha, M.H., Ali, L., 2018a. "Development and analysis of energy consumption map for high-speed machining of Al6061-T6 alloy". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 96.1, p. 91 e 102.
- Warsi, S.S., Jaffery, S.H.I., Ahmad, R., Khan, M., Ali, L., Agha, M.H., Akram, S., 2018b. "Development of energy consumption map for orthogonal machining of Al6061-T6 alloy". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 232, p. 2510-2522.
- Xie, J., Liu, F., Qiu, H., 2016. "An integrated model for predicting the specific energy consumption of manufacturing processes". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 85, p. 1339-1346.
- Zhang, L., Zhang, B., Bao, H., Huang, H., 2018. "Optimization of cutting parameters for minimizing environmental impact: considering energy efficiency, noise emission and economic dimension". *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* Vol. 19, p. 613-624.
- Zhong, Q., Tang, R., Peng, T., 2016. "Decision rules for energy consumption minimization during material removal process in turning". *J. Clean. Prod.* Vol. 140, p.1819-1827.
- Zhou, G., Lu, Q., Xiao, Z., Zhou, C., Tian, C. 2019. "Cutting parameter optimization for machining operations considering carbon emissions". *Journal of cleaner production*, Vol. 208, p. 937-950.
- Zhou, L., Li, J.J., Li, F., Meng, Q., Li, J.J., Xu, X., 2016. "Energy consumption model and energy efficiency of machine tools: a comprehensive literature review", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 112, p. 3721-3734.

## 6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

## ENERGY EFFICIENCY IN CNC TURNING MACHINING PROCESSES: A LITERATURE REVIEW

Jean Carlos Alves Fernandes, [jean.carlos.alves02@aluno.ifce.edu.br](mailto:jean.carlos.alves02@aluno.ifce.edu.br)  
Francisco Nélío Costa Freitas, [fneliocf@ifce.edu.br](mailto:fneliocf@ifce.edu.br)

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – Campus Maracanaú, Av. Parque Central, nº 1315 – Bloco da Indústria/Laboratório de Ensaios Mecânicos – Bairro: Distrito Industrial I – Maracanaú – CE – CEP: 61939-140

**Abstract.** Global energy generation increases the effective growth of society's demand, and this increase in energy occurs mainly due to globalization, population growth and the expansion of industry. The rational use of energy, or the efficiency of machine tools, improves the performance of the machining processes, due to the improvement of economic and environmental performance, becoming an attractive segment for the development of academic and applied research. Therefore, this article aims to characterize the studies that relate the energy efficiency of manufacturing processes by machining through CNC turning to the cutting parameters of that process. For this, a systematic literature review is used in order to fulfill this need. The articles selected were identified as characteristics related to the materials used, equipment for the experimental part, input parameters, evaluation and methods used. The revision of the works revealed that in addition to energy consumption, other metrics are used in the evaluation of machining, another point was that research developed the experimental part in equipment manufactured in Brazil and most of them use computational techniques and / or statistical tools to optimize machining.

**Keywords:** Energy efficiency, machining, CNC turning, cutting parameters

## RESPONSIBILITY NOTICE

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