



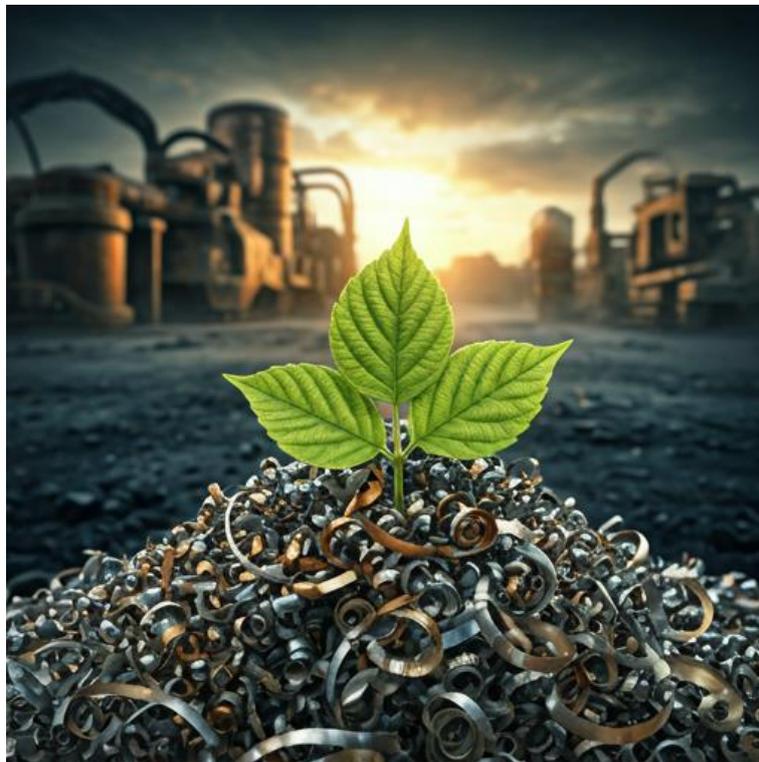
Universidade Federal  
do Paraná  
Setor de Tecnologia



## UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

### Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Manufatura

USINAGEM SUSTENTÁVEL: AVALIAÇÃO EM TEMPO REAL (US-ATR)



**Coordenador:** Prof. Dalberto Dias da Costa

Curitiba, janeiro de 2025



Universidade Federal  
do Paraná  
Setor de Tecnologia



## 1. TÍTULO E IDENTIFICAÇÃO DO PROJETO

Usinagem Sustentável: Avaliação em Tempo Real

**Resumo:** em um sentido mais amplo, sustentabilidade pode ser entendida como uma medida da existência de um dado sistema sem que este implique na extinção de outros. No contexto específico deste projeto, um processo de usinagem será considerado como sustentável se o seu custo de execução e o seu impacto ambiental e social forem inferiores a outros meios de fabricação disponíveis. Entretanto, a avaliação do custo real e dos impactos de um processo produtivo são difíceis de serem auferidos dada a inexistência de procedimentos normalizados e à falta de padrões para comparação. Diante disso, o objetivo de longo prazo deste projeto é criar uma metodologia para modelagem de processos de usinagem e sua atualização continuada de tal modo que a sua sustentabilidade possa ser auferida em qualquer instante de sua aplicação. O principal resultado esperado com o desenvolvimento dessa metodologia será a proposição de um tema de pesquisa para alunos de graduação do Curso de Engenharia Mecânica e de mestrandos no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Manufatura. Acredita-se fortemente que o projeto em tela tem potencial para publicação de artigos em periódicos científicos e registro de software.

Palavras-chave: Usinagem; Sustentabilidade; Gêmeo Digital; Indicadores de Desempenho; Monitoramento

## 2. INTRODUÇÃO E FUNDAMENTAÇÃO

Usinagem é o termo empregado para designar um grupo de processos de fabricação que têm em comum a remoção progressiva de material, na forma de cavacos, para a fabricação de peças. Por meio da usinagem, transforma-se um material sólido, do seu estado bruto (fundidos, conformados ou pré-usinados) para um estado acabado (pronto para uso), dentro das especificações de projeto [1].

Os processos de usinagem encontram aplicação em diversos segmentos industriais, sendo o setor metalmeccânico o seu maior usuário. Peças de diversas formas e dimensões, em diferentes materiais, tais como, ferros fundidos, aços, ligas de alumínio, ligas de cobre, ligas de titânio, e ligas de níquel, são massivamente produzidos por usinagem. Ademais, outros segmentos, tais como a indústria médico-hospitalar (instrumentos e implantes) e a de dispositivos óticos também demandam processos de usinagem para o processamento de outros materiais, tais como as cerâmicas e plásticos de engenharia.

A usinagem pode ser realizada em vários tipos de máquinas-ferramenta. Tais máquinas podem ser operadas manualmente (convencionais), por automação rígida (comes ou circuitos hidropneumáticos), ou por automação flexível (Comando Numérico Computadorizado - CNC). O CNC já se consolidou como uma tecnologia confiável e de larga utilização na indústria. Em alguns casos —

por exemplo, setores automotivo e aeronáutico — ele pode ser encontrado em quase todas as máquinas-ferramenta [2].

Os processos de usinagem são grandes consumidores de energia; basicamente energia elétrica na sua totalidade. De um modo geral, a conversão de energia se dá de forma ineficiente. Ou seja, grande parcela da energia que entra no processo é dissipada na forma de calor. Apenas uma pequena fração é utilizada na remoção. Alguns autores, vide por exemplo Pawanr and Gupta [3], estimam uma eficiência da ordem de 30% para alguns casos. Além disso, a usinagem gera subprodutos, sendo o cavaco o principal deles. Apesar de cavacos serem do mesmo material da peça acabada e, em sua maioria, serem recicláveis, o seu valor é muito inferior à matéria prima virgem. Soma-se a isso que a reciclagem é feita por fundição, o que demanda o emprego de mais energia para transformar cavacos em nova matéria prima. Outra categoria de subprodutos gerados pelos processos de usinagem incluem os fluidos de corte, óleos lubrificantes e ferramentas deterioradas [4].

Embora sustentabilidade seja um conceito de difícil definição, tal como alertado por diversos pesquisadores, por exemplo Bell e Morse [5] e Ruggerio [6] ; no contexto industrial ela tem sido usada como sinônimo de manufatura verde (do inglês green manufacturing) ou manufatura sustentável [7]. Sem se preocupar pela busca de uma definição precisa, pode-se argumentar que tanto a manufatura verde, quanto a manufatura sustentável compreendem a seleção e utilização de processos de fabricação que impliquem em baixo consumo de energia, baixa emissão (ruído e poluentes), e baixo risco operacional. Esta visão está alinhada a uma abordagem sistêmica e holística de sustentabilidade [8].

Uma abordagem mais atual sobre a manufatura sustentável, considera os processos de usinagem como uma etapa dentro do ciclo de vida de um produto e, dessa forma, estabelece bases para uma análise holística sobre seus impactos e ganhos enquanto um meio de produção [9]. A Figura 1 contém uma esquematização do ciclo de vida de um produto. Dentro do ciclo de vida, a usinagem é um meio e não um fim em si mesma. Diante disso, processos de usinagem só devem ser empregados se forem, do ponto de vista da sustentabilidade, a melhor alternativa para a produção de um dado produto.

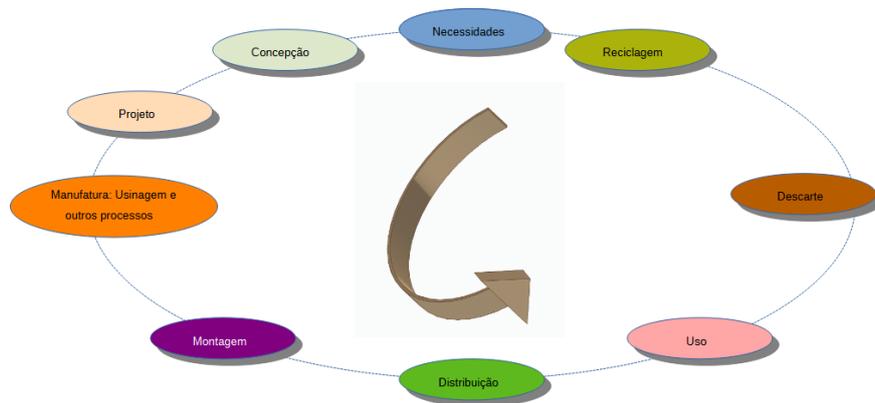


Figura 1. - Representação simplificada do ciclo de vida de um produto

Para a avaliar se um dado processo de manufatura é, ou não, sustentável, vários pesquisadores sugerem o uso de indicadores [10, 11]. Hegab et al. [11], por exemplo, propôs uma lista de indicadores



**Universidade Federal  
do Paraná  
Setor de Tecnologia**



agrupados nas seguintes categorias, a saber: consumo de energia; custos de usinagem; gestão de resíduos; impacto ambiental; saúde e segurança pessoal. Segundo eles, alguns desses indicadores são quantificáveis, por exemplo o consumo e o custo da usinagem e outros dependem de uma avaliação qualitativa, como por exemplo a saúde e a segurança pessoal.

Entretanto, a utilização e análise de indicadores em processos de usinagem não é uma tarefa trivial, devido, principalmente, ao baixo tempo de ciclo desses processos [12] e, não menos importante, ao grande número de fatores que impactam o custo, o consumo de energia e a geração de resíduos [13].

Uma forma de enfrentar esses desafios consiste em monitorar, por meio de sensores instalados na máquina e/ou ferramentas, o comportamento da usinagem em tempo real. Com o advento da Indústria 4.0, o custo desse monitoramento tem reduzido significativamente, facilitando a sua disseminação em larga escala e, por conseguinte, a geração de um grande volume de dados, dando início a uma nova era na indústria denominada por “manufatura baseada em dados” [14].

Entretanto, esse grande volume de dados traz um novo problema: o seu processamento em tempo real. Para isso, o emprego de técnicas de inteligência artificial desponta como solução para converter esse volume de dados em informação e conhecimento. A associação da inteligência com o monitoramento tem propiciado o surgimento de novas tecnologias. Dentre elas, destaca-se a possibilidade de criação de gêmeos digitais, o que vem sendo considerado como fundamental para a implantação da manufatura inteligente [15].

De acordo com Grieves and Vickers [16], gêmeos digitais se baseiam na ideia de que uma representação digital de um sistema físico pode ser criada como uma entidade autônoma. E que essa representação digital se tornaria um “gêmeo” da informação contida no sistema físico e estaria ligada a ele durante todo o seu ciclo de vida.

Novos conceitos e aplicações dos gêmeos digitais podem ser encontrados em um número crescente de publicações científicas [17, 18]. Entretanto, foge ao escopo desse projeto resumi-las neste momento. O intuito aqui é propor que gêmeos digitais podem ser uma alternativa para a avaliação em tempo real da sustentabilidade de processos de usinagem. Os objetivos e a metodologia para o desenvolvimento deste projeto são apresentados nas próximas seções.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 OBJETIVO GERAL**

O objetivo geral, e de longo prazo, deste projeto é criar uma metodologia para modelagem de processos de usinagem e sua atualização continuada de tal modo que a sua sustentabilidade possa ser aferida em qualquer instante de sua aplicação.



### 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os Objetivos Específicos são:

- i) Propor e avaliar indicadores de sustentabilidade para processos de usinagem;
- ii) Desenvolver modelos virtuais do tipo CAM (Computer-Aided Manufacturing) para máquinas-ferramenta;
- iii) Adequar metodologia para cálculo do custo de usinagem em tempo real;
- iv) Aperfeiçoar métodos já criados para medição em tempo real do consumo de energia em máquinas antigas e novas;
- v) Aperfeiçoar métodos já criados para avaliação da deterioração de ferramentas, consumo de fluido de corte e geração de cavacos;
- vi) Testar novas técnicas de monitoramento de processos de usinagem baseadas em análise de vibração, emissão acústica e processamento por redes neurais; e
- vii) Desenvolver gêmeos digitais de processos de usinagem.

### 4. METODOLOGIA E INFRAESTRUTURA DISPONÍVEL

O desenvolvimento deste projeto compreende o seu desmembramento em etapas quase independentes, as quais serão estudadas de forma paralela ou sequencial, concomitante à expansão da Equipe. Essas etapas correspondem aos objetivos específicos delineados na seção anterior acrescidos da condução de uma revisão bibliográfica constante sobre o tema aqui considerado. A previsão para início e término de cada uma dessas etapas pode ser vista na Seção “Cronograma de Desenvolvimento”.

Parte das etapas aqui delineadas já foram consideradas em projetos anteriores, tais como o desenvolvimento de métodos para avaliação da deterioração de ferramentas; medição em tempo real do consumo de energia em máquinas antigas e novas; e o desenvolvimento de modelos virtuais do tipo CAM. Resultados dos referidos projetos já foram publicados e podem ser encontrados em <https://labusig.ufpr.br/pesquisa/>.

Cada uma dessas etapas terá metodologias próprias e serão desenvolvidas futuramente na forma de Trabalhos de Conclusão de Curso (TCCs); projetos de Iniciação Científica (IC); e dissertações de Mestrado (M).

O presente projeto contará com a infraestrutura disponível no Laboratório de Usinagem do Departamento de Engenharia Mecânica (<https://labusig.ufpr.br/infraestrutura/>), o qual encontra-se equipado com máquinas, ferramentas, alguns sensores para monitoramento, e um sistema CAD-CAM completo. Não obstante, planeja-se a submissão deste projeto aos editais de apoio à pesquisa promovidos tanto pela UFPR como também por agências de fomento locais e nacionais.



**Universidade Federal  
do Paraná  
Setor de Tecnologia**



## **5. EQUIPE**

Além deste Coordenador, este projeto conta com o apoio, e participação, dos professores Claudimir José Rebeyka e Pablo Deivid Valle; dos técnicos do Laboratório de usinagem, Srs. Marcelo Arceno e Rafael Pereira da Silva.

Além desse time, se somarão ao projeto alunos do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, para desenvolvimento de seus TCCs; alunos UFPR na modalidade IC; e mestrandos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Manufatura.

## **6. CRONOGRAMA DE DESENVOLVIMENTO**

Este projeto foi pensado para um horizonte de cinco anos, com suas várias etapas sendo executadas de forma quase concomitante, tal como apresentado na Tabela 1. Todavia, os períodos de início e fim de cada etapa poderão variar, tendo em vista que o desenvolvimento de cada etapa dependerá da alocação de um grupo de trabalho dedicado.

As etapas remetem aos objetivos específicos listados anteriormente e estão relacionados da seguinte maneira:

**A1** - Revisão bibliográfica;

**A2** - Propor e avaliar indicadores de sustentabilidade para processos de usinagem;

**A3** - Testar novas técnicas de monitoramento de processos de usinagem baseadas em análise de vibração, emissão acústica e processamento por redes neurais;

**A4** - Desenvolver modelos virtuais do tipo CAM (Computer-Aided Manufacturing) para máquinas-ferramenta;

**A5** - Aperfeiçoar métodos já criados para medição em tempo real do consumo de energia em máquinas antigas e novas;

**A6** - Aperfeiçoar métodos já criados para avaliação da deterioração de ferramentas, consumo de fluido de corte e geração de cavacos;

**A7** - Adequar metodologia para cálculo do custo de usinagem em tempo real; e

**A8** - Desenvolver gêmeos digitais de processos de usinagem.

Tabela 1 – Cronograma

Etapa	2025/1	2025/2	2026/1	2026/2	2027/1	2027/2	2028/1	2028/2	2029/1	2029/2
A1										
A2										
A3										
A4										
A5										
A6										
A7										
A8										

## 7. PRODUTOS E IMPACTO ESPERADOS

O principal e, com certeza, mais importante resultado esperado com este projeto é a formação de Engenheiros e Mestres mais conscientes da importância do planejamento e monitoramento dos processos de usinagem visando um desenvolvimento mais sustentável.

Espera-se também que os resultados obtidos possam ser transferidos para a indústria local e nacional e, desta forma, impactem de forma significativa na redução do consumo de energia e das emissões causadas pelos processos de usinagem.

Além disso, espera-se também o que os resultados alcançados se materializem na forma de publicações em revistas internacionais, registro de software ou patentes.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Black, J.T.; Kohser, R.A. (2020) DeGarmo's Materials and Processes in Manufacturing, 13th ed.; Wiley: Hoboken, NJ, USA; ISBN 978-1-119-49282-5.
- [2] Lynn, R., Helu, M., Sati, M., Tucker, T., & Kurfess, T. (2020). The state of Integrated Computer-Aided Manufacturing/Computer Numerical Control: Prior development and the path toward a Smarter Computer Numerical Controller. *Smart and Sustainable Manufacturing Systems*, 4(2), 25–42. <https://doi.org/10.1520/ssms20190046>
- [3] Pawanr, S., & Gupta, K. (2024). A review on recent advances in the energy efficiency of machining processes for sustainability. *Energies*, 17(15), 3659. <https://doi.org/10.3390/en17153659>
- [4] Goindi, G. S., & Sarkar, P. (2017). Dry machining: A step towards sustainable machining – Challenges and future directions. *Journal of Cleaner Production*, 165, 1557–1571. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.235>
- [5] Bell, S., & Morse, S. (2008). Sustainability Indicators: Measuring the Immeasurable? (2nd ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781849772723>.

- [6] Ruggerio, C. A. (2021). Sustainability and sustainable development: A review of principles and definitions. *The Science of the Total Environment*, 786, 147481. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147481>
- [7] Bhatt, Y., Ghuman, K., & Dhir, A. (2020). Sustainable manufacturing. Bibliometrics and content analysis. *Journal of Cleaner Production*, 260, 120988. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120988>
- [8] Moldavska, A., & Welo, T. (2018). A Holistic approach to corporate sustainability assessment: Incorporating sustainable development goals into sustainable manufacturing performance evaluation. *Journal of Manufacturing Systems*, 50, 53–68. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.11.004>
- [9] Aljamal, D., Salem, A., Khanna, N., & Hegab, H. (2024). Towards sustainable manufacturing: A comprehensive analysis of circular economy key performance indicators in the manufacturing industry. *Sustainable Materials and Technologies*, 40, e00953. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2024.e00953>
- [10] Saad, M. H., Nazzal, M. A., & Darras, B. M. (2019). A general framework for sustainability assessment of manufacturing processes. *Ecological Indicators*, 97, 211–224. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.09.062>
- [11] Hegab, H., Darras, B., & Kishawy, H. (2018). Towards sustainability assessment of machining processes. *Journal of Cleaner Production*, 170, 694–703. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.197>
- [12] Da Costa, D.D., Mehl, V.O. & Aguiar, F.R.T. Real-time assessment of the overall effectiveness of legacy machine tools. *Prod. Eng. Res. Devel.* 18, 983–996 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11740-024-01284-0>
- [13] Yip, W., To, S., & Zhou, H. (2020). Social network analysis for optimal machining conditions in ultra-precision manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 56, 93–103. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.03.011>
- [14] Gökalp, M. O., Gökalp, E., Kayabay, K., Koçyiğit, A., & Eren, P. E. (2021). Data-driven manufacturing: An assessment model for data science maturity. *Journal of Manufacturing Systems*, 60, 527–546. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.07.011>
- [15] Tao, F., Qi, Q., Liu, A., & Kusiak, A. (2018). Data-driven smart manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 48, 157–169. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.01.006>
- [16] Grieves, M., & Vickers, J. (2016). Digital Twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In Springer eBooks (pp. 85–113). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4)
- [17] Karabulut, E., Pileggi, S. F., Groth, P., & Degeler, V. (2023). Ontologies in digital twins: A systematic literature review. *Future Generation Computer Systems*, 153, 442–456. <https://doi.org/10.1016/j.future.2023.12.013>
- [18] Tao, F., Zhang, H., & Zhang, C. (2024). Advancements and challenges of digital twins in industry. *Nature Computational Science*, 4(3), 169–177. <https://doi.org/10.1038/s43588-024-00603-w>