



DESENSOLVIMENTO SUSTENTÁVEL NA ENGENHARIA: A IMPORTÂNCIA DE ANALISAR O IMPACTO AMBIENTAL EM PROCESSOS DE NANOFABRICAÇÃO

DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2022.3947

Matheus José Cunha de Oliveira - matheus.oliveira@ifsudestemg.edu.br
IF SUDESTE MG

Elery Lionidas Jardim de Andrade Lopes - elery-fac@hotmail.com
Instituto Federal do Sudeste de Minas

Lecino Caldeira - lecino.caldeira@ifsudestemg.edu.br
IF Sudeste Mg

ANDRE LUIZ MOLISANI - andre.molisani@ifsudestemg.edu.br
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO SUDESTE DE
MINAS GERAIS

Emanuel Augusto de Oliveira e Silva - emanuel.aos@hotmail.com
Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais IFSUDESTEMG

Resumo: *O desenvolvimento de nanomateriais tem crescido nos últimos anos. Para uma aplicação futura mais promissora de um processo usando nanotecnologia é importante analisar conjuntamente o seu impacto ambiental. O impacto ambiental de nanotecnologia só pode ser corretamente analisado a partir de todos os aspectos de suas aplicações, variando desde a produção do material, manufatura, uso do produto até a disposição final. O consumo de energia e os resíduos de materiais gerados na nanofabricação são particularmente importantes na determinação de seu desempenho ambiental. A intensidade energética da nano-fabricação é superior quando comparado às tecnologias convencionais de fabricação. A melhor oportunidade para controle e mitigação do impacto ambiental da nanotecnologia é aplicar estratégias de prevenção da poluição durante seu desenvolvimento inicial e aplicação. A engenharia deve contribuir na implementação de uma consciência ambiental e levar em consideração aspectos da sustentabilidade para possibilitar a consolidação da manufatura sustentável em processos de nanofabricação e desenvolvimento tecnológico.*

Palavras-chave: *Desenvolvimento sustentável, ACV, nanofabricação*



DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL NA ENGENHARIA: A IMPORTÂNCIA DE ANALISAR O IMPACTO AMBIENTAL EM PROCESSOS DE NANOFABRICAÇÃO

1 INTRODUÇÃO

O termo "sustentabilidade" é amplo e muitas vezes ambíguo. A sustentabilidade é usada para qualquer ação que leva em consideração impactos sociais, econômicos e ambientais, às vezes de maneira integrada, outras apenas no tangente ao ambiental. Não há uma única definição universal para sustentabilidade (Farley e Smith, 2013). Quando analisado sob uma perspectiva de manufatura pode-se definir desenvolvimento sustentável de acordo com a *World Commission on Environment and Development*: "desenvolvimento que atende às necessidades do presente sem comprometer a habilidade das futuras gerações de atenderem suas próprias necessidades" (Dornfeld, 2013).

Desta forma a sustentabilidade está fundamentada nos três pilares: econômico, social e ambiental. A manufatura ambientalmente sustentável, também denominada de manufatura verde deve ser o sistema ou processo que atenda ao mesmo tempo criticamente os três critérios, também chamados de as Três Linhas Básicas (*Triple Bottom Line* - TBL) da sustentabilidade. Um desafio constante, no entanto, é corretamente dimensionar e avaliar as métricas para atingir este objetivo. Existe uma dificuldade na condução da avaliação dessas métricas devido à falta de orientação e padronização (Dornfeld, 2013). Uma ferramenta eficaz na condução da avaliação da sustentabilidade de um produto ou processo é a chamada Avaliação de Ciclo de Vida (ACV).

A ideia de um ciclo de vida tem suas origens nas ciências biológicas. Um material para ser produzido necessita ser extraído da natureza, refinado ou separado, conformado e até transformado para posterior uso seguido do descarte. Cada uma dessas etapas requer entradas e culmina em saídas do sistema. As principais entradas são caracterizadas por: matéria-prima, energia e transporte; enquanto as principais saídas envolvem emissões de: particulados, despejos tóxicos, CO₂, NO_x, SO_x, calor, etc (Ashby, 2009). A ACV pode ser definida como a compilação e análise de todos os insumos, produtos e impactos ambientais em potencial de um sistema ou cadeia passando por todas as etapas do seu ciclo de vida (Hellweg e Canals, 2014). De acordo com Kirchain *et al.* (2017) a ACV é uma ferramenta fundamental para moldar o futuro a um ritmo que o mesmo possa suportar.

A avaliação do impacto é a relação entre as entradas e saídas do sistema. Essa relação é feita com o uso de um único indicador métrico como os gases de efeito estufa (GEE) ou de forma mais complexa, como indicadores de comprometimento da saúde humana, toxicidade de ecossistemas e depreciação de recursos (Ashby, 2009, Kirchain *et al.*, 2017). Ainda, a análise de consequências ambientais é um fato chave para redução de custo no desenvolvimento de produtos com qualidade.

A ACV é feita de acordo com norma ISO 14040 seguindo quatro etapas básicas principais: descrição do escopo e objetivos com definição da fronteira do sistema; compilação de inventário com levantamento dos recursos consumidos e emissões emitidas; avaliação do impacto através do agrupamento em categorias e convertidos em

uma unidade funcional para comparação; interpretação dos resultados (Figura 1). As ferramentas de ACV começaram após reuniões constantes da *Society for Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC), entre 1991 e 1993. E após 1997 regularizados pela ISO 14040 e subseções 14041, 14042, 14043 e principalmente 14044 (Ashby, 2009, Kirchain *et al.*, 2017, ABNT NBR ISO 14040:2014).

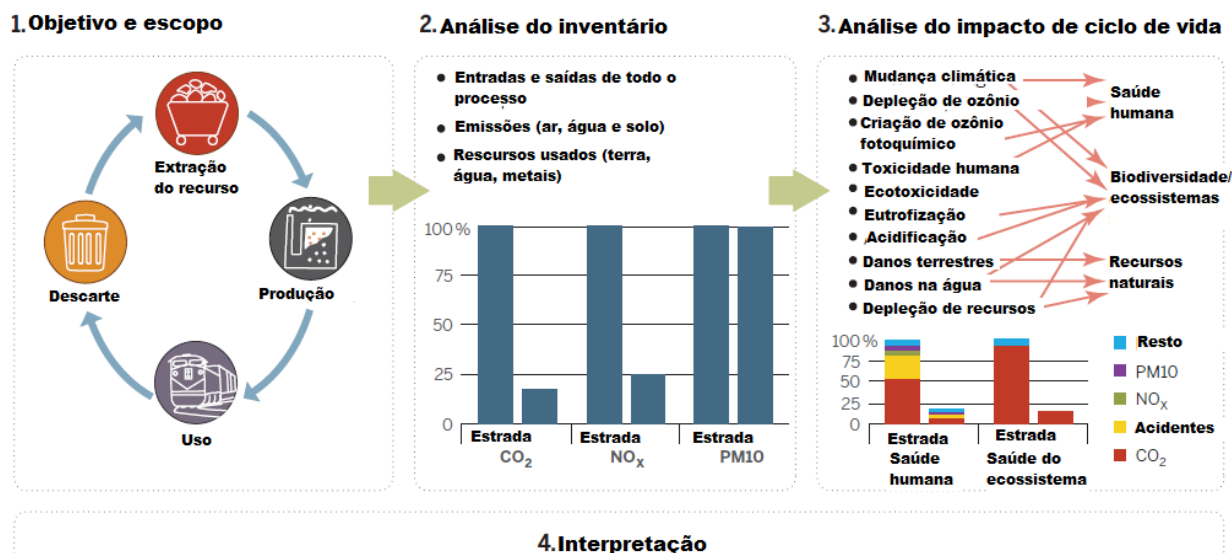


Figura 1 - Metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida (Hellweg e Canals, 2014).

A energia consumida é uma das formas mais comuns de comparar os impactos gerados entre processos e produtos industriais, uma vez que esta energia está diretamente relacionada a emissões de carbono na atmosfera. Um processo energeticamente mais eficiente pode contribuir com redução de emissões de carbono (Dornfeld, 2013).

A literatura reporta o uso dessa ferramenta para análise do impacto de processos industriais (Daniyan, *et al.*, 2021, Zanuto *et al.*, 2019). No entanto, na escala industrial, comparativamente, os processos de nanofabricação demandam uma quantidade elevada de energia, denotando, assim, seu impacto ambiental significativo.

2 AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE NA NANOFABRICAÇÃO

A nanotecnologia está em constante desenvolvimento. Em uma perspectiva positiva, estudos apontam um mercado para nanomateriais ultrapassando 55 bilhões de dólares até o final de 2022. Mesmo em um cenário com crescimento menor o mercado mundial ainda demandaria um montante superior a 11 bilhões de dólares até o final de 2020. A taxa de crescimento anual composta esperada entre os anos de 2016 a 2021 atinge quase 40% para o mercado de nanofibras, representando esta uma das maiores taxas de crescimento entre os principais mercados de nanomateriais (Inshakova e Inshakov, 2017).

Com o aumento da produção de nanomateriais nos últimos 30 anos observou-se também um aumento de resíduos gerados pelos processos de nanofabricação. Hamers (2017) exemplifica este fato com as nanopartículas de TiO₂, que apesar de serem consideradas inertes e não poluentes, na presença de radiação UV podem tornar-se

tóxicas à microrganismos presentes em águas doces, mesmo em concentrações da ordem de partes por bilhão.

Apesar dos nanomateriais possuírem um potencial grande de aplicações para minimizarem o consumo de combustíveis fósseis e impulsionar tecnologias alternativas de energia, seus processos de fabricação, ou síntese, é um desafio em larga escala, devido à dificuldade de entender, avaliar e quantificar como esses materiais impactam diretamente na sustentabilidade do processo (Hamers, 2017). Dessa forma um material na escala nanométrica pode diminuir ou até aumentar o impacto ambiental de um processo ou produto entregue à sociedade (Pallas *et al.*, 2018).

O impacto ambiental de nanotecnologia só pode ser corretamente analisado a partir de todos os aspectos de suas aplicações, variando desde a produção do material, manufatura, uso do produto até a disposição final. O consumo de energia e os resíduos de materiais gerados na nanofabricação são particularmente importantes na determinação de seu desempenho ambiental. A intensidade energética da nanofabricação é superior quando comparada às tecnologias convencionais de fabricação. A melhor oportunidade para controle e mitigação do impacto ambiental da nanotecnologia é aplicar estratégias de prevenção da poluição durante seu desenvolvimento inicial e aplicação (Dornfeld, 2013).

A ACV é uma ferramenta holística que no atual cenário de desenvolvimento tecnológico do uso de nanomateriais possibilitará uma avaliação precoce dos impactos ambientais e na qualidade de vida humana. Desta forma pretende-se evitar assim uma provável adaptação futura destas tecnologias que poderia mesmo limitá-las como consequência (Tsang *et al.*, 2017). Para Windsor *et al.* (2018) apesar da crescente preocupação sobre os riscos ambientais associados aos nanomateriais as principais ferramentas de medição, incluindo a ACV, carecem de dados mais robustos do impacto associados aos nanomateriais. Os trabalhos envolvendo processos de nanofabricação que realizam ACV limitam-se na síntese do produto e negligenciam o que talvez sejam as fases mais importantes de impacto para a sociedade, o uso e descarte do nanomaterial.

Estudos aplicando ACV em nanotecnologia são escassos e as revisões não são conclusivas sobre as causas reais de impacto. Realizar uma ACV durante as etapas de fabricação em tecnologias inexploradas, como a nanotecnologia é um desafio constante devido à falta de informação disponível, dificuldade em representar em análises laboratoriais o processo produtivo ou, ainda, possíveis implicações ambientais dos nanomateriais até então desconhecidas (Wender e Seager, 2011, Hischier e Walser, 2012, Simon *et al.*, 2016).

O consumo energético associado a processos convencionais de fabricação é muito alto, no entanto quando contrastado a grande produção em massa destes com a pequena escala atual dos processos de nanofabricação, fazem com que esses últimos sejam mais exigentes energeticamente. A intensidade do consumo energético de processos de fabricação em nano-escala (*sputtering*, CVD, oxidação etc.) são tipicamente 3 a 5 ordens de magnitude maiores que o dos processos fabricação convencional (usinagem, injeção, retificação, etc.), como pode ser observado na Figura 2 (Gutowski *et al.* 2006). Os estágios de ACV de um processo usando nanotecnologia envolvem alta demanda de energia e consumo de recursos no estágio de processamento e manufatura, além de exposição ocupacional das nanopartículas geradas, exposição essa ainda mais crítica no estágio de uso do material, extrapolando para todo o meio ambiente. Ainda, a reciclagem é extremamente complexa devido a uma natureza normalmente não biodegradável e possíveis liberações de tóxicos para terra, água e atmosfera (Dhingra *et al.*, 2010).

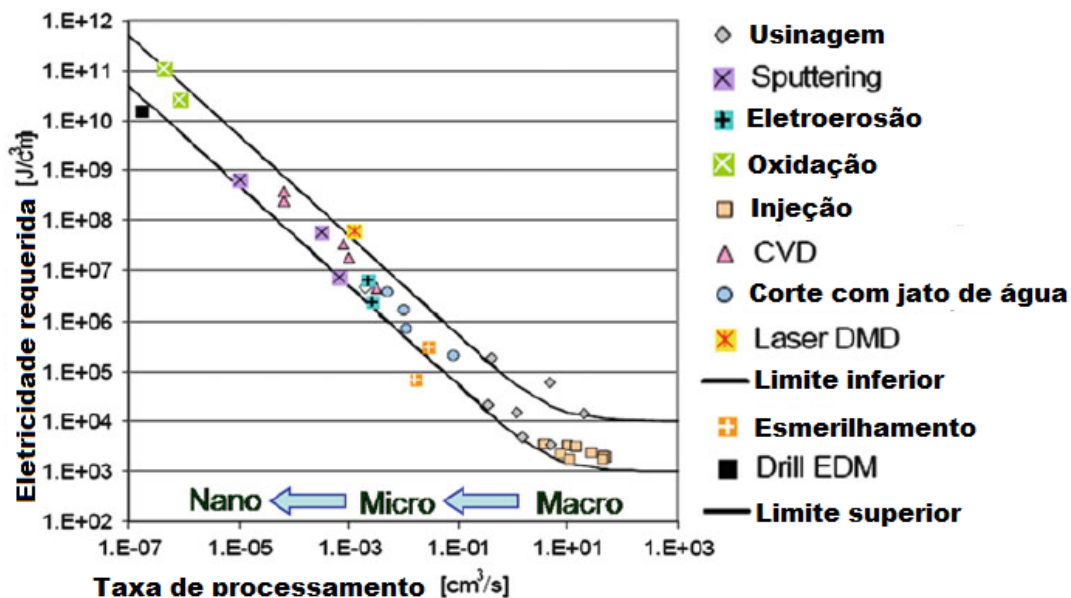


Figura 2 - Consumo energético em processos de fabricação (Dornfeld, 2013).

No entanto, ainda há muitas limitações do uso da ACV integrada, como falta de informações específicas nos bancos de dados, e métodos de análises de impacto de nanopartículas que formam estes materiais ou que são originadas principalmente na sua etapa de fabricação e uso; permanecendo então um desafio constante para os pesquisadores da área (Dornfeld, 2013, Linkov, *et al.*, 2017, Hellweg e Canals, 2014).

Pallas *et al.* (2018) propuseram uma análise de das afirmações de classificação de nanomateriais como “limpo e sustentável” aplicados em diferentes setores industriais, como energia, alimentação e tecnologia médica. Os autores concluíram que esse nanomateriais produzem elevadas emissões de carbono. As análises de ciclo de vida realizados nos estudos englobam quase na totalidade (aproximadamente 95%) apenas os primeiros estágios de pesquisa e desenvolvimento do material. E que essas análises devem ser incorporadas nos processos de nanofabricação. Os estudos reportados pelos autores não incorporam o depósito dos nanomateriais no ambiente e sua consequência direta. Provavelmente devido à falta de banco dados disponíveis e limitações da ACV. Evidenciando ainda mais a necessidade do aprimoramento das técnicas de medição e controle desses impactos.

Muitos trabalhos buscam quantificar, mesmo que em estado inicial, o impacto ambiental associado à nanofabricação. O que evidencia uma preocupação crescente na comunidade acadêmica a cerca desse tópico emergente.

Deorsola *et al.* (2012) após sintetizar por via úmida e caracterizar nanopartículas de MoS₂ realizaram um estudo prospectivo do impacto ambiental na produção desse nano material com o objetivo de alavancar estudos a cerca do impacto ambiental na produção de nanomateriais. Os autores observaram que a maior parte do impacto analisado na síntese, isto é, potencial de aquecimento global e demanda acumulada de energia foi devido ao elevado consumo energético do processo.

Abbasi (2014) realizou uma avaliação do impacto ambiental na produção de nanofibras de fluoreto de polivinilideno (PVDF) pela técnica de eletrofiação. O estudo mostrou que consumos tão altos quanto 1186,5 kWh foram necessários para produção de um quilograma do material apenas demandados pelo equipamento de eletrofiação. Ainda, foi possível observar que para produção de fibras com diâmetros reduzidos os parâmetros



de eletrofição devem ser ajustados, como aumento do diferencial de potencial, o que resulta em um gasto energético ainda superior.

Simon *et al.* (2016) realizaram uma ACV na produção de nanofibras de eletrodos de ferrofosfato de lítio (LiFePO_4) obtidas por eletrofição comparando com fibras comerciais. A alta voltagem necessária nos processos de eletrofição correspondeu a uma parcela significativa em todo o processo nas diversas categorias de impacto, juntamente aos processos de condicionamento e secagem das fibras. Isso pode ser explicado devido ao elevado consumo energético de cada um destes processos.

Em estudos realizados por Navajas *et al.* (2018) sobre o impacto ambiental de membranas de zeólita os autores reportaram que a etapa mais crítica do processo era a etapa de preparação do suporte cerâmico e que nesta aplicação os impactos poderiam ser minimizados com o uso de fibras mais finas e solventes menos agressivos.

Mais recentemente Oliveira *et al.* (2021) e Lopes *et al.* (2022) realizaram uma avaliação ambiental do uso de reagentes na produção de nanofibras de hidroxiapatita pela técnica de Fiação por Sopro em Solução. Mesmo sendo um estudo inicial com limitação de banco de dados os autores reportaram a elevada toxicidade dos reagentes de síntese e o elevado consumo energético do processo na obtenção do material, mesmo esta sendo uma rota de produção que não utiliza uma fonte de tensão direta para fabricação.

É importante ressaltar que a maior parte dos processos de nanofabricação envolve uso de equipamento em escala de laboratório ou piloto. Em um possível *scale-up* esses consumos energéticos podem ser amplamente minimizados com uso de equipamentos com alta eficiência energética ou ainda, por exemplo, com uso de dispositivos que permitam aumento do rendimento e produção do nanomaterial.

Dessa forma devido à consciência global dos riscos ambientais além da necessidade de competir através de eficiência, sistemas de manufatura deverão estar evoluídos em um novo paradigma: o da sustentabilidade (Deif, 2011).

3 A SUSTENTABILIDADE PARA A ENGENHARIA

O engenheiro necessita possuir uma consciência ambiental e levar em consideração aspectos da sustentabilidade seja no ecodesign, no projeto ou processo produtivo. Por maior que sejam os desafios no desenvolvimento de ferramentas para avaliações ambiental (Jacquemin *et al.*, 2012), essa é uma realidade a ser atendida. O engenheiro não precisa se tornar um ecologista, por exemplo, mas aprender a linguagem correta e necessária para a comunicação com os profissionais que atuam diretamente no tema (Shields *et al.*, 2014).

Segundo Thurer *et al.* (2018) apesar da discussão sobre sustentabilidade ter evoluído saindo apenas do âmbito político e impactando diretamente na educação, principalmente a educação superior, ainda há uma enorme defasagem no que diz respeito a implementação direta do tema aplicado diretamente no currículo das engenharias, de acordo com a pesquisa realizada em oitenta e duas universidades pelos autores. A maior parte das pesquisas envolvendo abordagem de tópicos específicos de sustentabilidade na educação em engenharia ocorre principalmente nos Estados Unidos e Europa, com baixa expressão das demais regiões do globo.

No entanto, a sustentabilidade não deve ser encarada apenas como um conteúdo a ser implementado em currículos de engenharia já "sobrecarregados" (Staniskis e Katiliute, 2016). Deve ser sim aplicada em uma mudança perpassando a pedagogia, de forma



integrativa possibilitando uma visão sistemática da sustentabilidade no ensino, na pesquisa e na extensão.

4 Considerações FINAIS

O desenvolvimento de materiais em escala nanométrica por processos de nanofabricação tem crescido nos últimos anos. Para uma aplicação futura mais promissora de um processo usando nanotecnologia é importante analisar conjuntamente o seu impacto ambiental. A manufatura verde para nanotecnologias é de fundamental necessidade, principalmente no início do estágio de desenvolvimento e aplicação. E será valiosa para uso no futuro durante a gestão ambiental da nanofabricação. Assim, um maior aprofundamento das técnicas de análise de impactos ambientais desses processos deve ser realizado para permitir o desenvolvimento sustentável de indústrias de nanomateriais ao invés de estas se tornarem um futuro entrave ambiental, gerando uma preocupação futura ainda maior que os problemas que as técnicas anseiam resolver.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sudeste de Minas Gerais, campus Juiz de Fora pelo aporte financeiro.

REFERÊNCIAS

- ABBASI, S. A. Exergetic Life Cycle Assessment of Electrospun Polyvinylidene Fluoride Nanofibers. Dissertação de mestrado. **Universidade do Sul da Flórida**, 2014.
- ASHBY, M. F. **Materials and the Environment**, Elsevier, 2009.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas **ABNT NBR ISO 14040:2009 - 2014**. Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura, 2014.
- DANIYAN, I.; MPOFU, K.; RAMATSETSE, B.; GUPTA, M. Review of life cycle models for enhancing machine tools sustainability: lessons, trends and future directions. **Heliyon**, v. 7, e. 06790, 2021.
- DEIF, A.M. A system model for green manufacturing. **Journal of cleaner production**, v. 19, p.1553-1559, 2011.
- DEORSOLA, F. A., RUSSO, N., BLENGINI, G. A., FINO, D. Synthesis, characterization and environmental assessment of nanosized MoS₂ particles for lubricants applications. **Chemical Engineering Journal**, v. 195-196, p. 1-6, 2012.
- DORNFELD, D. A. **Green Manufacturing Fundamentals and Applications**. Springer, 2013.
- FARLEY, H. M., SMITH, Z. A. **Sustainability: If It's Everything, Is It Nothing?** Routledge, 2013.
- GUTOWSKI, T., DAHMUS, J., THIRIEZ, A. Electrical energy requirements for manufacturing processes. **13th CIRP international conference on life cycle engineering**, Leuven, Belgium May-June, 2006.
- HAMERS, R. J. Nanomaterials and Global Sustainability. **Accounts of Chemical Research**, v. 50, n. 3, p. 633-637, 2017.
- HELLWEG, S., CANALS, L. M. Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment. **Science**, v. 344, p. 1109-1113, 2014.





- HISCHIER, R., WALSER, T. Life cycle assessment of engineered nanomaterials: State of the art and strategies to overcome existing gaps. **Science of the Total Environment**, v. 425, p. 271-282, 2012.
- INSHAKOVA, E., INSHAKOV, O. World market for nanomaterials: structure and trends. **MATEC Web of Conference**, 129, 02013, 2017.
- JACQUEMIN, L.; PONTALIER, P.Y.; SABLAYROLLES, C. Life cycle assessment (LCA) applied to the process industry: a review. **International Journal of Life Cycle Assessment**, Springer Verlag, v. 17, p.1028-1041, 2012.
- KIRCHAIN, R. E., GREGORY, J. R., OLIVETTI, E. A. Environmental life-cycle assessment, **Nature Materials**, v. 16, 2017.
- LOPES, E. L. J. A., et al.. Avaliação ambiental do uso de reagentes na produção de nanofibras de hidroxiapatita pela técnica de fiação por sopro em solução. **Brazilian Journal of Development**, v. 8., n. 3, p. 22312-22327, 2022.
- LINKOV, I., TRUMP, B. D., WENDER, B. A., SEAGER, T. P., KENNEDY, A. J., KEISLER, J. M. Integrate life-cycle assessment and risk analysis results, not methods. **Nature Nanotechnology**, v. 12, 2017.
- NAVAJAS, A., MITTAL, N., RANGNEKAR N., ZHANG, H., CORNEJO, A., GANDÍA, L. M., TSAPATIS, M. Environmental Evaluation of the Improvements for Industrial Scaling of Zeolite Membrane Manufacturing by Life Cycle Assessment. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 6, p. 15773 – 15780, 2018.
- OLIVEIRA, M. J. C. et al.. AVALIAÇÃO AMBIENTAL DO USO DE DIMETILFORMAMIDA NA PRODUÇÃO DE NANOFIBRAS DE HIDROXIAPATITA PELA TÉCNICA DE FIAÇÃO POR SOPRO EM SOLUÇÃO.. In: **Anais do Simpósio de Engenharia, Gestão e Inovação**. Juazeiro do Norte(CE) URCA, 2021.
- PALLAS, G.; PEIJNENBURG, W. J. G. M.; GUINÉE, J. B.; HEIJUNGSR.; VIJVER, M. G. Green and Clean: Reviewing the Justification of Claims for Nanomaterials from a Sustainability Point of View. **Sustainability**, v. 10, n. 3, p. 1-17, 2018.
- SHIELDS, D.; VERGA, F.; BLEGINI, G. A. Incorporating sustainability in engineering education: Adapting current practices to mining and petroleum engineering education. Adapting current practices to mining and petroleum engineering education. **International Journal of Sustainability in Higher Education**, v. 15, n. 4, p. 390-403, 2014.
- SIMON, B. BACHTIN, K., KILIÇ, A., AMOR, B., WEIL, M. Proposal of a Framework for Scale-Up Life Cycle Inventory: A Case of Nanofibers for Lithium Iron Phosphate Cathode Applications. **Integrated Environmental Assessment and Management**, v. 12, p. 465–477, 2016.
- STANISKIS, J. K.; KATILIUTE, E. Complex evaluation of sustainability in engineering education: case & analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 120, p. 13-20, 2016.
- THEIS, T., BAKSHI, B. R., DURHAM, D., FTHENAKIS, V. M., GUTOWSKI, T. G., ISAACS, J. A., SEAGER, T., WIESNER, M. R. A life cycle framework for the investigation of environmentally benign nanoparticles and products. **Physica Status Solidi (RRL) - Rapid Research Letters**, v. 5, n. 9, p. 312-317, 2011.
- THURER, M.; TOMASEVIC, I.; STEVENSON, M.; QU, T.; HUISINGH, D. A systematic review of the literature on integrating sustainability into engineering curricula. **Journal of Cleaner Production**, v. 181, p. 608-617, 2018.
- TSANG, M. P., KIKUCHI-UEHARA, E., SONNEMANN, G. W., AYMONIER, C., HIRAO, M. Evaluating nanotechnology opportunities and risks through integration of life-cycle and risk assessment. **Nature Nanotechnology**, v. 12, 2017.
- WENDER, B. A., SEAGER, T. Towards prospective life cycle assessment: Single wall carbon nanotubes for lithium-ion batteries. **IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology (ISSST)**, 2011.



WINDSOR, R.; CINELLI, M.; COLES, S. R. Comparison of tools for the sustainability assessment of nanomaterials. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, v. 12, p. 69-75, 2018.

ZANUTO, R. S.; HASSUI, A.; LIMA, F.; DORNFELD, D. A. Environmental impacts-based milling process planning using a life cycle assessment tool. **Journal of Cleaner Production**, v. 206, p. 349–355, 2019.