



De 11 a 14 - NOVEMBRO DE 2024

**Inteligência Artificial
na Gestão de Operações:**
Limitações e possibilidades



AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE PEÇAS METÁLICAS PRODUZIDAS POR BMD: INFLUÊNCIA DAS MATRIZES ENERGÉTICAS BRASILEIRA E ITALIANA

RUBENS FERREIRA DA SILVA JUNIOR – rubens.ferrer@gmail.com
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS - UFSCAR

MURILO LATANCE DEL BEN – murilodelben@gmail.com
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS - UFSCAR

ANA CAROLINA GODOY ALBINO – carolinagodoyalbino@gmail.com
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS - UFSCAR- Sorocaba - PGPUR-So

DIOGO APARECIDO LOPES SILVA - diogo.apls@ufscar.br
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS - UFSCAR - Sorocaba-DEP-So

ÁREA: 9º - ENGENHARIA DA SUSTENTABILIDADE

SUBÁREA: 9.3 - GESTÃO DE RECURSOS NATURAIS E ENERGÉTICOS

RESUMO: A MANUFATURA ADITIVA, ESPECIFICAMENTE A TECNOLOGIA DE DEPOSIÇÃO DE METAL LIGADO (BMD), OFERECE VANTAGENS SIGNIFICATIVAS NA CRIAÇÃO DE PEÇAS METÁLICAS COMPLEXAS, MAS ENFRENTA DESAFIOS RELACIONADOS AO ALTO CONSUMO ENERGÉTICO. ESTE ESTUDO COMPAROU O IMPACTO AMBIENTAL DA PRODUÇÃO DE AMOSTRAS METÁLICAS USANDO BMD EM DUAS DIFERENTES MATRIZES ENERGÉTICAS: A ITALIANA, COM UMA COMBINAÇÃO DE FONTES DE ENERGIA, E A BRASILEIRA, PREDOMINANTEMENTE RENOVÁVEL. A AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) FOI CONDUZIDA COM BASE NO ESTUDO DE IACOPO ET AL. (2022), UTILIZANDO O SOFTWARE OPENLCA. OS RESULTADOS MOSTRARAM QUE A MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA PODE REDUZIR DRASTICAMENTE AS EMISSÕES DE CO₂ E A DEMANDA ENERGÉTICA CUMULATIVA. ALÉM DISSO, A COMPARAÇÃO ENTRE SIMAPRO E OPENLCA INDICOU QUE A FERRAMENTA LIVRE PODE FORNECER RESULTADOS CONSISTENTES E CONFIÁVEIS, TORNANDO A ACV ACESSÍVEL A UM PÚBLICO MAIS AMPLO. AS CONCLUSÕES REFORÇAM A IMPORTÂNCIA DE CONSIDERAR A MATRIZ ENERGÉTICA NOS PROCESSOS DE MANUFATURA ADITIVA E A VIABILIDADE DE USAR FERRAMENTAS DE CÓDIGO ABERTO PARA ANÁLISES AMBIENTAIS ROBUSTAS.

PALAVRAS-CHAVE: ANÁLISE DO CICLO DE VIDA, BOUND METAL DEPOSITION, MANUFATURA ADITIVA.

1. INTRODUÇÃO

O aquecimento global, a emissão de gases de efeito estufa e os impactos das mudanças climáticas são temas que têm ganhado cada vez mais popularidade desde o século XX. A emissão de gases de efeito estufa (GEE), como o dióxido de carbono (CO₂), acelera o processo de aquecimento global (DRIZO; PEGNA, 2006).

A manufatura industrial é uma das maiores contribuidoras para as emissões de GEE, sendo responsáveis por 19% das emissões globais (DIAZ *et al.*, 2010). Qualquer redução no consumo de energia ou recursos no nível industrial contribuirá para um desenvolvimento mais sustentável, o que está levando à pesquisa e desenvolvimento de métodos de produção alternativos, além da manufatura tradicional. A manufatura aditiva é um dos muitos métodos promovidos, com o objetivo de desenvolvimento sustentável da indústria (FORD; DESPEISSE, 2016).

A manufatura aditiva, ou impressão 3D, é uma tecnologia que cria objetos tridimensionais (3D) pela deposição de material camada por camada. Desde seu início na década de 1980, essa técnica tem revolucionado a prototipagem e a produção de peças complexas a um custo menor do que métodos tradicionais. É aplicada em diversas indústrias, como aeronáutica, automotiva e biomédica. Apesar de avanços significativos, a manufatura aditiva ainda enfrenta desafios que limitam sua adoção em larga escala para produção de produtos (MERCADO RIVERA; ROJAS ARCINIEGAS, 2020).

A fabricação de peças através da impressão 3D foi identificada como um processo com menor impacto ambiental em comparação com a manufatura tradicional. A manufatura aditiva contribui para o desenvolvimento sustentável ao permitir o redesenho de produtos, reduzindo o desperdício gerado no processo devido à maior liberdade de design geométrico. Além disso, possibilita a extensão do ciclo de vida do produto através de abordagens técnicas e simplifica a logística da cadeia de produção, aproximando a indústria do consumidor (FORD; DESPEISSE, 2016). A manufatura aditiva contribui para a redução da pegada de carbono ao diminuir o consumo de matéria-prima e eliminar a produção de ferramentas que demandam muita energia (DIAZ *et al.*, 2010). De acordo com Gebler e Uiterkamp (2014), a utilização dessa tecnologia permitirá a redução das emissões de CO₂ e do consumo de energia em aproximadamente 5%, até 2025.

No entanto, a taxa acelerada de crescimento da manufatura aditiva na indústria não tem sido acompanhada pelo desenvolvimento significativo de pesquisa sobre o impacto

ambiental desse processo de manufatura. Algumas tecnologias de manufatura aditiva tiveram pouca ou nenhuma avaliação de impacto ambiental (KELLENS *et al.*, 2017).

Dentre os métodos, a Deposição de Metal Ligado (*Bound Metal Deposition* - BMD) destaca-se pela sua capacidade de criar peças metálicas complexas com alta precisão. O processo envolve a extrusão de uma mistura de ligante polimérico termoplástico e pó de metal, formando as chamadas peças verdes, que são impressas ligeiramente maiores para compensar a retração durante a sinterização. Após a impressão, o ligante primário é removido em um banho químico, e o secundário é eliminado durante o pré-aquecimento no forno. A sinterização densifica as peças em até 98%. O BMD usa suportes removíveis com material cerâmico, facilitando a liberação das peças sem corte, combinando liberdade de design e robustez do metal para geometrias complexas (PARENTI *et al.*, 2022).

A tecnologia BMD oferece flexibilidade na fabricação de peças metálicas com diferentes propriedades mecânicas e densidades relativas. Essa flexibilidade permite ajustar a produção para atender a necessidades específicas de resistência e peso, embora isso venha com *trade-offs* em termos de tempo e custo de fabricação. Peças com alta densidade relativa, por exemplo, exigem mais material e tempo de produção (THAWON *et al.*, 2022), que vai ocasionar um maior gasto de energia elétrica, o que pode aumentar significativamente os custos e o impacto ambiental.

A análise do impacto ambiental de amostras metálicas produzidas pela tecnologia de impressão 3D por BMD foi realizada por Iacopo *et al.* (2022) utilizando a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV). O estudo comparou dois cenários: peças logo após o processo de sinterização e peças tratadas termicamente através de um processo de envelhecimento. Os resultados mostraram que o processo de envelhecimento, apesar de representar menos de 5% dos impactos ambientais totais, melhora significativamente o desempenho mecânico do material. As fases de impressão e sinterização foram responsáveis pela maior parte dos impactos ambientais, contribuindo com 80% da carga total devido ao alto consumo de energia da máquina de impressão e do forno. Os materiais de entrada, principalmente o aço inoxidável, apresentaram impactos menores em relação ao consumo de energia, variando entre 9,6% e 12,5% do total. Esse estudo foi realizado em uma fábrica italiana, onde a matriz energética é mista, composta por 50% de gás natural, 38% de energias renováveis (principalmente hidrelétrica e solar fotovoltaica), e menos de 5% de carvão (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2023).

Deste modo, essa pesquisa tem como objetivo comparar os resultados do estudo de Iacopo *et al.* (2022), e compará-los, em uma análise de sensibilidade, com o cenário brasileiro

que é composto 84% por fontes renováveis (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2023), por meio do emprego dos métodos de ACV.

2. METODOLOGIA

A metodologia deste estudo baseou-se no estudo de Iacopo *et al.* (2022), no qual foi realizada a ACV de uma amostra metálica em aço inoxidável 17-4 PH. A partir dos dados do estudo original, a ACV foi reproduzida, utilizando o software OpenLCA versão 2.1.1 (OPENLCA, 2024), para possibilitar a troca das fontes de energia elétrica e então foi feita a comparação dos resultados. Esta análise visa contrastar esse cenário com o potencial impacto ambiental caso a mesma peça fosse produzida em uma fábrica instalada no Brasil, também no ano de 2022.

A reprodução da ACV foi baseada na norma NBR ISO 14044 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009), que fornece diretrizes e requisitos para a condução de uma ACV de produtos e serviços. A ACV é uma técnica utilizada para avaliar os impactos ambientais associados a todas as etapas da vida de um produto, desde a extração das matérias-primas até a disposição final.

A norma NBR ISO 14044 estabelece quatro etapas fundamentais para a realização de uma ACV:

1. **Objetivo e Escopo da ACV:** envolve definir claramente o objetivo do estudo, incluindo a razão e o público-alvo, além de determinar o escopo, que abrange a unidade funcional, os limites do sistema e as suposições feitas.
2. **Inventário do Ciclo de Vida (ICV):** consiste na coleta e quantificação de todas as entradas e saídas para o sistema de produto ao longo de seu ciclo de vida, abrangendo dados sobre consumo de energia, materiais, emissões e resíduos.
3. **Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV):** avalia os impactos ambientais potenciais com base nos dados do ICV, classificando e caracterizando os dados em categorias de impacto.
4. **Interpretação do Ciclo de Vida:** analisa os resultados do ICV e da AICV para tirar conclusões e fazer recomendações, identificando pontos críticos e propondo melhorias no desempenho ambiental do produto.

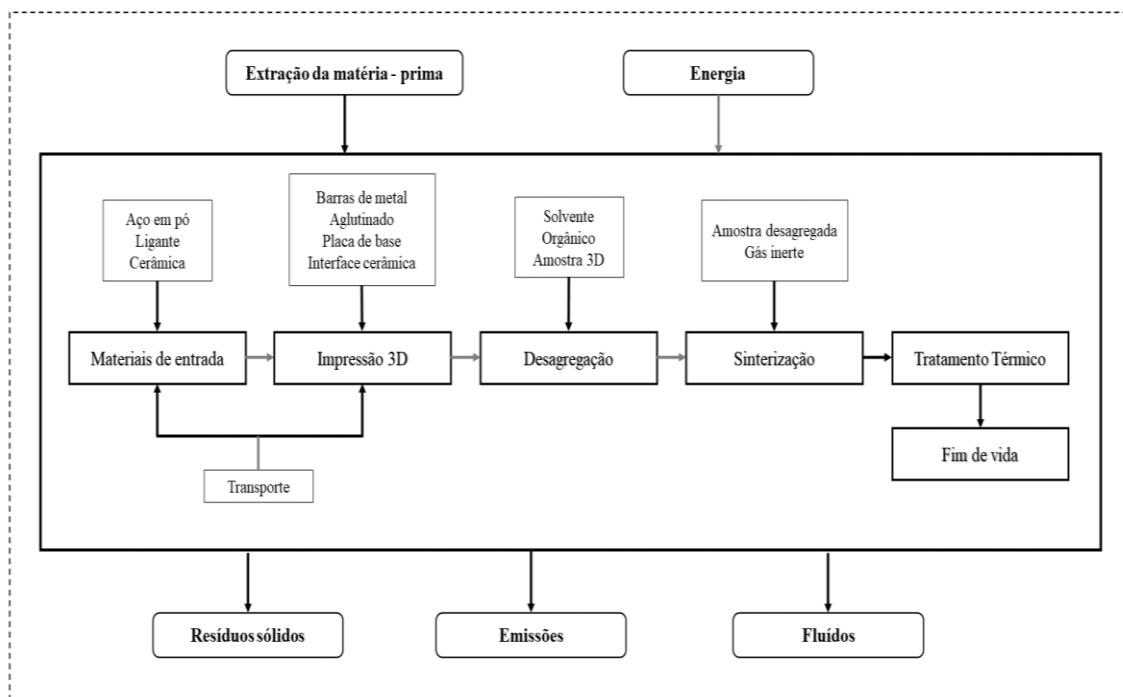
2.1. Objetivo, Escopo e Unidade Funcional

O escopo adotado para esta avaliação abrange um sistema de produto *cradle-to-grave*,

que considera todas as fases do ciclo de vida do produto. Isso inclui desde a extração e processamento dos materiais de entrada, passando pela fabricação da peça através da tecnologia BMD, até o descarte e a reciclagem dos materiais resultantes no final de sua vida útil. As categorias de impacto analisadas são: Potencial de Aquecimento Global (Global Warming Potential, GWP) e a Demanda Cumulativa de Energia (Cumulative Energy Demand, CED). O método de cálculo utilizado foi o Recipe-Midpoint, como o utilizado por Iacopo *et al.* (2022).

As fronteiras do sistema estudado são ilustradas na Figura 1, que descreve as diferentes etapas do processo, desde a extração da matéria-prima até o fim de vida do produto, incluindo os materiais de entrada, impressão 3D, desagregação, sinterização e tratamento térmico, bem como os resíduos sólidos, emissões e fluidos gerados em cada fase.

FIGURA 1 – Fronteiras do sistema.



Fonte: Elaboração própria.

No estudo original, foram avaliados dois cenários distintos de ACV: o primeiro cenário abrange o processo da peça até o estágio de sinterização, enquanto o segundo estende a análise até o estágio de tratamento térmico. Para efeitos de comparação neste estudo, optou-se por focar no segundo cenário, devido ao fato deste cenário apresentar uma melhor contrapartida na relação entre as propriedades mecânicas gerais da peça e o consumo de

energia elétrica dos processos, conforme evidenciado no estudo de Iacopo *et al.* (2022).

A unidade funcional é a produção de uma amostra de tração em aço inoxidável 17-4 PH por meio da tecnologia BMD e um peso final de 40,6 g. O sistema não possui multifuncionalidade.

2.1. Análise do Inventário de Ciclo de Vida

No estudo de Iacopo *et al.* (2022) a ACV foi processada utilizando o software SimaPro 9.1.0.11 e a base comercial Ecoinvent 3.1. A reprodução foi feita através do software OpenLCA 2.1.1. A Tabela 1 representa as adaptações de materiais e *providers* feitas no OpenLCA.

TABELA 1 – Adaptações de materiais e *providers* do OpenLCA em relação ao SimaPro.

Processo	Entradas	SimaPro / Ecoinvent	OpenLCA
Materiais de Entrada	Aço em Pó	Steel, chromium steel 18/8	Add SS304 Stainless Steel SS304 Profiles Items 47%PCR - AU
	Ligante	Polyethylene, high density, granulate	Glue High Density Polyethylene 19gsm Profile or Damp-Proof Membrane DPM - AU
	Interface Cerâmica	Ceramic (unspecified)	Haul Pastel Glazed Ceramic Floor or Wall Tile 1,500km - AU
Impressão 3D	Placa de Base	Polypropylene, granulate	Add Injection Moulded Polypropylene Item - AU
Desagregação	Solvente	Solvent, organic	White Solvent-based Enamel Sealer - AU
Sinterização	Gás Inerte	Argon, liquid	Liquify Argon on Site - GLO
Todos	Consumo de energia elétrica	Não especificado	Electricity, production mix UCTE

Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 1 destaca as substituições de materiais realizadas no OpenLCA em comparação ao SimaPro/Ecoinvent, mostrando como cada material de entrada utilizado no SimaPro/Ecoinvent possui uma correspondente adaptada no OpenLCA. Por exemplo, o "Steel, chromium steel 18/8" foi substituído por "Add SS304 Stainless Steel SS304 Profiles Items 47%PCR - AU". Além disso, algumas adaptações refletem a especificidade regional, como o uso de "Haul Pastel Glazed Ceramic Floor or Wall Tile 1,500km - AU" para a interface cerâmica, indicando a distância de transporte considerada.

Já a Tabela 2 mostra as entradas e saídas por processo, bem como o balanceamento de materiais, que foi estimado e calculado no software Microsoft Excel, com base no inventário fornecido por Iacopo *et al.* (2022).

TABELA 2 – Entradas, saídas e balanceamento de materiais por processo

Processo	Entradas	Valor	Saídas	Valor
Materiais de Entrada	Aço em Pó	102,1g	Barras de Metal Aglutinado	106,3g
	Ligante	4,2g	Interface Cerâmica	1,54g
	Energia	0,08 kWh		
	Cerâmica	1,54g		
Impressão 3D	Barras de Metal Aglutinado	106,3g	Amostra (impressa)	42,2g
	Placa de Base	45g	Aço (reciclagem)	61,54g
	Interface Cerâmica	1,54g	Ligante (descarte)	2,53g
	Energia	4,48 kWh	Placa de Base (reuso)	4,5g
			Interface Cerâmica (descarte)	1,54g
Desagregação	Amostra (impressa)	42,2g	Amostra (desagregada)	40,6g
	Solvente Orgânico	14,6g	Solvente (descarte)	14,6g
	Energia	0,14 kWh	Ligante (descarte)	1,6g
Sinterização	Amostra (desagregada)	40,6g	Amostra (sinterizada)	40,6g
	Gás Inerte	250g		
	Energia	3,57 kWh		
Tratamento	Amostra (sinterizada)	40,6g	Amostra (envelhecida)	40,6g
Térmico	Energia	0,45 kWh		

Fonte: Elaboração própria.

O balanceamento de materiais foi realizado considerando os seguintes fatores:

- O processo Materiais de Entrada refere-se à atomização do pó metálico, a produção do ligante e do material de interface cerâmica, e a extrusão das barras de metal aglutinado que alimentarão a impressora 3D, que consiste na junção do aço em pó com o ligante.
- Após o processo de Impressão 3D, a amostra impressa ainda contém o ligante, pesando 42,2g, o que equivale a 39,7% do peso total de barras de metal aglutinado de entrada. Segundo Watson *et al.* (2020), isso deve-se ao fato de que durante a impressão, o processo usa uma parte do material de entrada para criar estruturas de suporte, que são adicionadas para sustentar partes complexas da peça durante a construção. A peça é unida ao suporte através de uma interface cerâmica, permitindo que sejam destacados um do outro sem danificar a peça principal. O descarte da

estrutura de suporte no processo Impressão 3D está dividido entre 61,54g de aço para a reciclagem e 2,53g de ligante que será descartado em aterro.

- A placa de base do processo Impressão 3D pode ser utilizada para a impressão de até 10 peças, portanto o seu peso considerado de saída foi 10% do valor de entrada.
- Após o processo de Desagregação, a amostra é separada do ligante.
- O impacto ambiental do transporte foi dividido entre os processos de Materiais de Entrada e Impressão 3D, sendo 11.000 km de transporte transoceânico e 150 km de transporte em caminhões de 16-32 ton.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida

TABELA 3 – Comparativo dos resultados da ACV no SimaPro e no Open LCA

	Potencial de Aquecimento Global (kg CO ₂ eq)				Demanda Cumulativa de Energia (MJ)			
	SimaPro	%	OpenLCA	%	SimaPro	%	OpenLCA	%
Materiais								
Entrada	0,68	11,74	0,59	15,25	9,95	9,62	13,8	14,50
Impressão 3D	2,34	41,41	1,69	43,67	40,46	39,12	39,68	41,69
Desagregação	0,28	4,84	0,08	2,07	6,15	5,95	1,94	2,04
Sinterização	2,41	41,62	1,53	39,53	44,58	43,10	36	37,82
Tratamento Térmico	0,25	4,32	0,16	4,13	4,35	4,21	3,81	4
Fim de Vida	-0,17	-2,94	-0,18	-4,65	-2,06	-1,99	-0,04	-0,04
Total	5,79	100%	3,87	100%	103,43	100%	95,19	100%

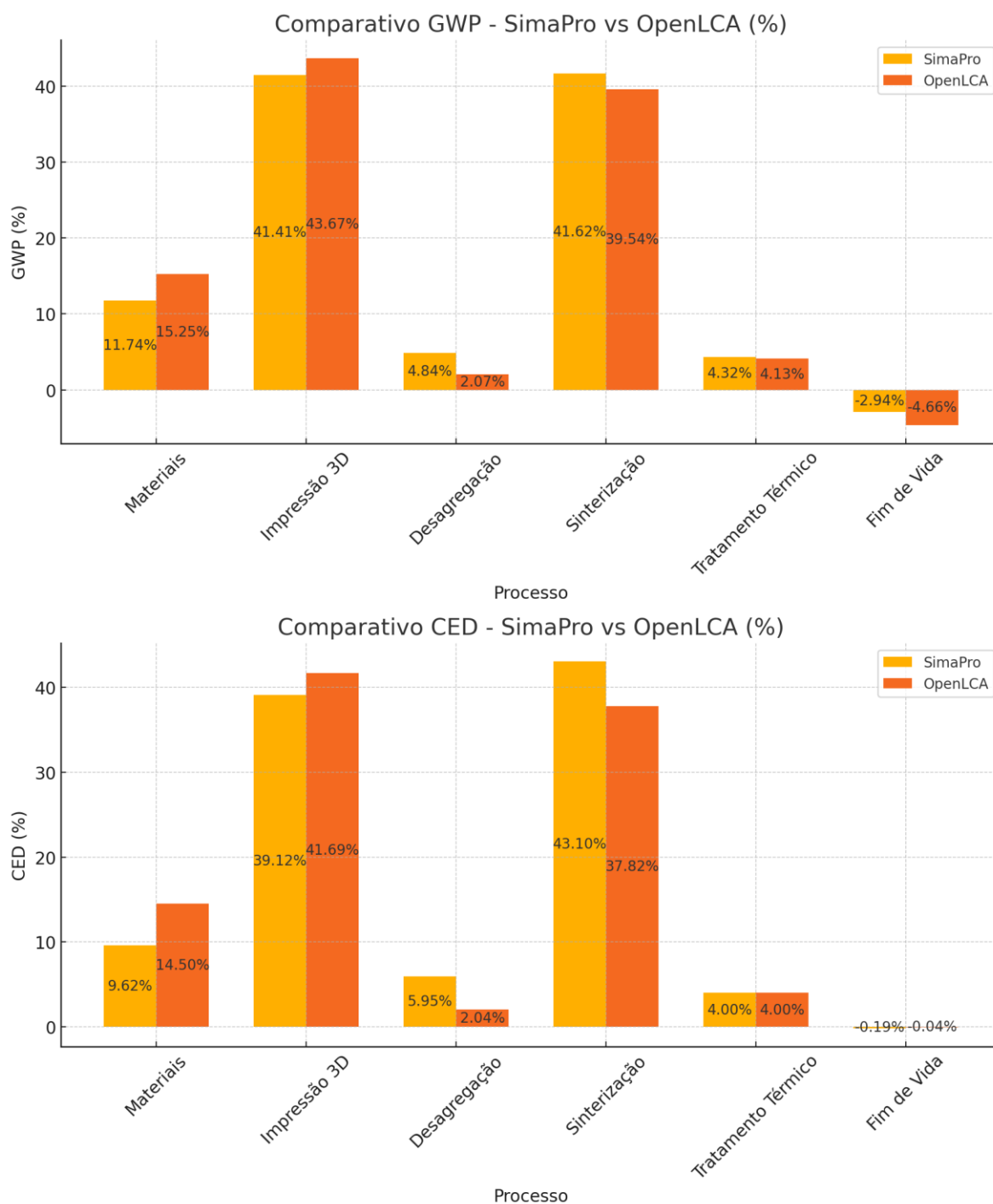
Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 3 apresenta um comparativo dos resultados da ACV entre os softwares SimaPro e OpenLCA, destacando o Potencial de Aquecimento Global (*Global Warming Potential*, GWP) e a Demanda Cumulativa de Energia (*Cumulative Energy Demand*, CED). Os dados mostram que tanto o GWP quanto a CED são mais elevados nas etapas de Impressão 3D e Sinterização, com contribuições significativas em ambas as ferramentas. No entanto, o OpenLCA tende a apresentar valores ligeiramente menores em algumas etapas, como Sinterização e Desagregação, quando comparados ao SimaPro. Essas diferenças

destacam a importância de considerar a especificidade dos dados e as adaptações regionais ao realizar a ACV.

A Figura 2 apresenta um comparativo visual dos resultados da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) entre os softwares SimaPro e OpenLCA, destacando o Potencial de Aquecimento Global (GWP) e a Demanda Cumulativa de Energia (CED).

FIGURA 2 - Comparativo dos resultados da ACV no SimaPro e no Open LCA



Fonte: Elaboração própria.

A maior diferença observada está presente no valor total, onde o SimaPro apresenta um valor significativamente maior (5,79 kg CO₂ eq.) em comparação ao OpenLCA (3,87 kg CO₂ eq.). Os resultados de CED entre SimaPro e OpenLCA são relativamente próximos, mas o OpenLCA mostra uma demanda energética ligeiramente menor no total (92,2% do valor obtido no SimaPro). No entanto, as diferenças mais notáveis ocorrem em fases específicas, como Materiais de Entrada e Desagregação.

Ambas as ferramentas identificam a Impressão 3D e a Sinterização como as fases com maior impacto tanto em GWP quanto em CED, o que sugere consistência na identificação das etapas mais críticas em termos de contribuição para os impactos ambientais das categorias analisadas.

3.2.1 Análise de Sensibilidade

Como análise de sensibilidade, foi desenvolvido um cenário com o objetivo de propor uma matriz energética otimizada e comparar diferentes condições de avaliação de impactos ambientais. Esta proposta foi motivada pelo fato de que os processos de impressão 3D e sinterização, identificados como os maiores contribuintes para os impactos ambientais totais, estão associados ao elevado consumo de energia elétrica nessas etapas. Neste estudo consideramos a produção da amostra no contexto brasileiro, substituindo o *provider* de energia elétrica *Electricity, production mix UCTE* por *Electricity from hydroelectric power plant – product mix at plant*, demonstrados na Tabela 4 e na Figura 3 visando explorar melhores alternativas e apoiar decisões sustentáveis.

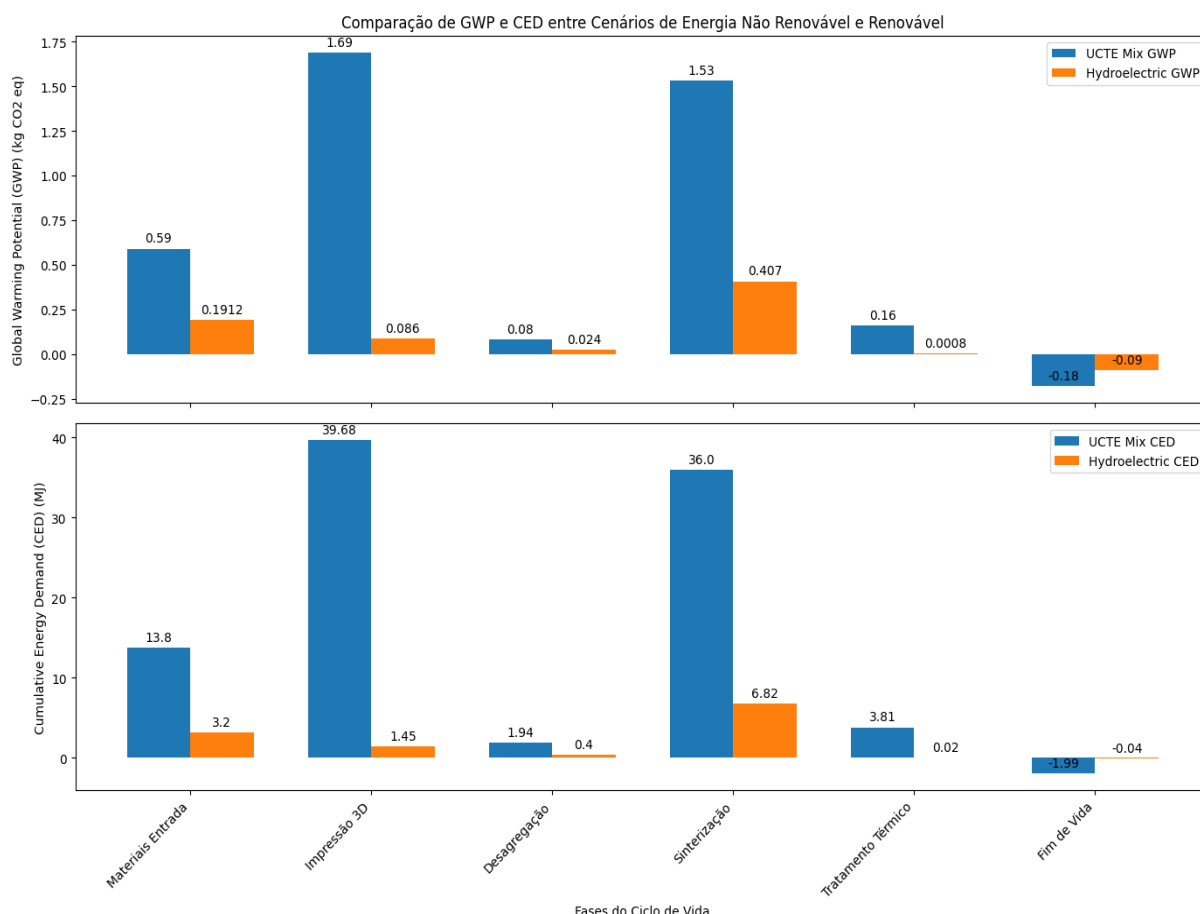
TABELA 4 – Resultados de cenários para GWP e CED entre Cenários de Energia Não Renovável e Renovável

	OpenLCA - UCTE Mix	OpenLCA - Hydroelectric	OpenLCA - UCTE Mix	OpenLCA - Hydroelectric
	Global Warming Potential (kg CO ₂ eq)		Cumulative Energy Demand (MJ)	
Materiais de Entrada	0,59	0,191	13,80	3,20
Impressão 3D	1,69	0,086	39,68	1,45
Desagregação	0,08	0,024	1,94	0,40
Sinterização	1,53	0,407	36,00	6,82
Tratamento Térmico	0,16	0,0008	3,81	0,02
Fim de Vida	-0,18	-0,09	-1,99	-0,04
Total	3,87	0,709	95,19	11,89

Fonte: Elaboração própria.

Comparando os cenários de energia não renovável (*UCTE Mix*) e energia renovável (hidrelétrica), observamos reduções significativas nos impactos ambientais. No Potencial de Aquecimento Global (GWP), o uso de energia hidrelétrica reduz as emissões de CO₂ eq. de 3,87 kg para 0,71 kg, uma diminuição de mais de 80%. Na Demanda Energética Cumulativa (CED), a energia hidrelétrica reduz o consumo de 95,19 MJ para 11,89 MJ, uma redução de mais de 85%. Os maiores benefícios ocorrem na Impressão 3D e na Sinterização, onde as emissões e o consumo de energia são drasticamente reduzidos. Além disso, a sinterização passa a ter um consumo energético proporcional maior no cenário hidrelétrico (57,38% do CED total) comparado ao *UCTE Mix* (37,82%). Os materiais de entrada também ganham mais importância relativa no GWP, aumentando de 15,24% para 27%.

FIGURA 3 – Comparação de cenários para GWP e CED



Fonte: Elaboração própria.

Esses resultados enfatizam a importância de considerar a matriz energética ao avaliar o impacto ambiental de processos industriais. A substituição de fontes de energia não renováveis por renováveis, como a hidrelétrica, pode reduzir drasticamente tanto as emissões

de gases de efeito estufa quanto o consumo de energia, promovendo uma produção mais sustentável.

A análise de custo-benefício para energias renováveis revela que, apesar dos maiores custos iniciais, as fontes renováveis oferecem vantagens econômicas e ambientais significativas a longo prazo. Os menores custos operacionais, a menor volatilidade dos preços de energia e os benefícios ambientais cumulativos são fatores que favorecem as energias renováveis (ADEFARATI; BANSAL, 2019). A redução da poluição pode levar a economias significativas nos custos de saúde pública, como menos doenças respiratórias e cardiovasculares, resultando em menores despesas médicas e maior produtividade da força de trabalho (SHAN; HUIFENG, 2010).

Empresas que adotam práticas sustentáveis podem se beneficiar de uma imagem de marca mais positiva, atraindo consumidores ambientalmente conscientes e investidores que priorizam a sustentabilidade, proporcionando um diferencial competitivo importante (GUDLAUGSSON *et al.*, 2021). Além disso, as fontes de energia renovável localizadas podem aumentar a resiliência energética, reduzindo a dependência de combustíveis importados e a vulnerabilidade a flutuações de preços internacionais (NATARAJAN *et al.*, 2015).

Cenários semelhantes a este estudo corroboram com os resultados obtidos, como por exemplo, o estudo de Presciutti *et al.* (2023) realizou uma ACV comparativa entre a Sinterização Seletiva a Laser (SLS) e a Fusão de Filamento Metálico (mFFF) para a produção de amostras metálicas, do qual revelou que, apesar das excelentes propriedades dos produtos fabricados via SLS, o método envolve custos iniciais elevados e maior consumo de energia elétrica. A SLS demonstrou um consumo energético de 0,32 kWh, enquanto o mFFF apresentou 7,31 kWh. No entanto, ao considerar um cenário alternativo com geração de energia elétrica por meio de painéis fotovoltaicos, o mFFF mostrou um resultado ambiental mais sustentável que a SLS.

Outro estudo focou na ACV de quatro cenários de construção com impressão 3D de concreto (3DCP) versus métodos convencionais. Os resultados indicaram que a 3DCP reduz significativamente os impactos ambientais em termos de Potencial de Aquecimento Global, Potencial de Acidificação, Potencial de Eutrofização, Potencial de Formação de Smog e Depleção de Combustíveis Fósseis. No entanto, essas melhorias ambientais diminuem quando elementos de reforço convencionais são utilizados. Além disso, a utilização de uma mistura de concreto alternativa na 3DCP mostrou uma redução ainda maior nos impactos ambientais (MOHAMMAD *et al.*, 2020).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo revelou a importância da matriz energética no impacto ambiental da manufatura aditiva, especificamente no processo de Deposição de Metal Ligado (BMD). A comparação entre os cenários de produção na Itália e no Brasil demonstrou que a utilização de fontes de energia renováveis, como a hidrelétrica predominante no Brasil, pode reduzir significativamente os impactos ambientais associados ao processo. A redução observada de mais de 80% nas emissões de CO₂ e de mais de 85% na demanda energética cumulativa reforça a necessidade de considerar a matriz energética na ACV de processos industriais.

Os resultados destacam que, apesar dos avanços e benefícios da tecnologia BMD, como a flexibilidade e precisão na produção de peças metálicas complexas, os desafios relacionados ao consumo energético ainda são um obstáculo. A sinterização e a impressão 3D foram identificadas como as fases de maior impacto, sugerindo áreas prioritárias para melhorias tecnológicas e eficiência energética.

Além disso, a análise de sensibilidade demonstrou a potencialidade de políticas energéticas sustentáveis para a minimização dos impactos ambientais. A mudança para fontes de energia mais limpas não só reduz a pegada de carbono, mas também oferece uma perspectiva de produção mais sustentável e competitiva globalmente.

Portanto, este estudo não apenas valida a importância de integrar a matriz energética na ACV, mas também serve como referência para a indústria de manufatura aditiva e outras indústrias intensivas em energia. A transição para uma economia de baixo carbono exige a colaboração entre setores industriais e governos para promover o desenvolvimento e a implementação de tecnologias mais limpas e eficientes. Conclui-se que, com uma matriz energética mais sustentável, a manufatura aditiva, especialmente a tecnologia BMD, pode se tornar uma alternativa ainda mais viável e ambientalmente amigável para a produção de peças metálicas complexas.

Uma observação adicional relevante deste estudo é a comparação entre os resultados obtidos com a ferramenta comercial SimaPro e a ferramenta de código aberto OpenLCA. Ambas as ferramentas identificaram consistentemente as fases de impressão 3D e sinterização como as de maior impacto ambiental, demonstrando que o uso de uma ferramenta livre, como o OpenLCA, pode fornecer resultados confiáveis e comparáveis aos de ferramentas comerciais. Esta constatação é especialmente importante para pesquisadores e pequenas empresas que podem não ter acesso a softwares pagos. O OpenLCA, ao oferecer uma plataforma acessível e de código aberto, democratiza a capacidade de conduzir a ACV,

permitindo uma análise ambiental robusta sem a necessidade de altos investimentos. A escolha de uma ferramenta livre, portanto, não compromete a qualidade da análise e promove a inclusão de mais participantes na prática de avaliação ambiental, incentivando a adoção de práticas sustentáveis em um espectro mais amplo de setores e regiões.

REFERÊNCIAS

ADEFARATI, Temitope; BANSAL, Ramesh C. **Reliability, economic and environmental analysis of a microgrid system in the presence of renewable energy resources**. Applied energy, v. 236, p. 1089-1114, 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil). **Matriz Energética Nacional**. Brasília: ANEEL, 2023. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/matriz-energetica-nacional>. Acesso em: 22 jun. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14044**. Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Requis. e orientações. RJ, ABNT, 2009.

DIAZ, N.; HELU, M.; JAYANATHAN, S.; CHEN, Y.; HORVATH, A.; DORNFELD, D. **Environmental analysis of milling machine tool use in various manufacturing environments**. In Proceedings of the 2010 IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology, Arlington, VA, USA: IEEE, May 2010, p. 1–6.

DRIZO, A.; PEGNA, J. **Environmental impacts of rapid prototyping: an overview of research to date**. Rapid Prototyp. J., vol. 12, no. 2, p. 64–71, Mar. 2006.

FORD, Simon; DESPEISSE, Mélanie. **Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges**. Journal of Cleaner Production, v. 137, p. 1573-1587, 2016.

GBLER, Malte; UITERKAMP, Anton JM Schoot; VISSER, Cindy. **A global sustainability perspective on 3D printing technologies**. Energy policy, v. 74, p. 158-167, 2014.

GUDLAUGSSON, B.; AHMED, T.; DAWOOD, H.; OGWUMIKE, C.; DAWOOD, N. **Application of cost benefits analysis for the implementation of renewable energy and smart solution technologies: a case study of InteGRIDy project**. Environmental sciences proceedings, v. 11, n. 1, p. 15, 2021.

IACOPO, B.; TOMMASO, M.; MASSIMILIANO, P.; ALESSIO, V. **Environmental impacts assessment of Bound Metal Deposition 3D printing process for stainless steel**. Procedia CIRP, v. 105, p. 386-391, 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Italy 2023 Energy Policy Review. Paris: International Energy Agency, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/italy-2023>. Acesso em: 20 jun. 2024.

KELLENS, K.; BAUMERS, M.; GUTOWSKI, T. G.; FLANAGAN, W.; LIFSET, R.; DUFLOU, J. R. **Environmental Dimensions of Additive Manufacturing: Mapping Application Domains and Their Environmental Implications**. J. Ind. Ecol., vol. 21, no. S1, pp. S49–S68, Nov. 2017.

MERCADO RIVERA, F. J.; ROJAS ARCINIEGAS, A. J. **Additive manufacturing methods: techniques, materials, and closed-loop control applications**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 109, p. 17-31, 2020.

MOHAMMAD, Malek; MASAD, Eyad; AL-GHAMDI, Sami G. **3D concrete printing sustainability: a comparative life cycle assessment of four construction method scenarios**. Buildings, v. 10, n. 12, p. 245, 2020.

NATARAJAN, P.; NALINI, G. S. **Social cost benefit analysis of solar power projects**. Prabandhan: Indian Journal of Management, v. 8, n. 5, p. 36-42, 2015.

OPENLCA. Versão 2.1.1. [S. l.], GreenDelta, 2024. Disponível em: <https://www.openlca.org/download-form/>. Acesso em: 20 jun. 2024.

PARENTI, P.; PUCCIO, D.; COLOSIMO, B. M.; SEMERARO, Q. **A new solution for assessing the printability of 17-4 PH gyroids produced via extrusion-based metal AM**. Journal of Manufacturing Processes, v. 74, p. 557-572, 2022.

PRESCIUTTI, A.; GEBENNINI, E.; LIBERTI, F.; NANNI, F.; BRAGAGLIA, M. **Comparative life cycle assessment of SLS and mFFF additive manufacturing techniques for the production of a metal specimen**. Materials, v. 17, n. 1, p. 78, 2023.

SHAN, Ren; HUIFENG, Xue. **The monetary quantitative methods of environmental and health benefits of renewable energy**. The 2nd Conference on Environmental Science and Information Application Technology. Vol. 3. IEEE, p. 20-23, 2010.

THAWON, I.; FONGSAMOOTR, T.; MONA, Y.; SUTTAKUL, P. **Investigation of the mechanical properties of additively manufactured metal parts with different relative densities**. Applied Sciences, v. 12, n. 19, p. 9915, 2022.

WATSON, Alexander; BELDING, John; ELLIS, Brett D. **Characterization of 17-4 PH processed via bound metal deposition (BMD)**. TMS 2020 149th Annual meeting & exhibition supplemental proceedings, Springer International Publishing, p. 205-216, 2020.