

# AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA DO FERRO GUSA PRODUZIDO POR DIFERENTES TECNOLOGIAS: REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA

**Adriano Souza Leão**<sup>1</sup>; Edna dos Santos Almeida<sup>2</sup>; Henrique Leonardo Maranduba<sup>3</sup>; Arilma do Carmo Tavares<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Bolsista de mestrado; Tecnologia de Desenvol. de Produtos (EMBRAP/II/PD&I); adrianoleaoeng@outlook.com

<sup>2</sup> Dra em Química; Centro Universitário SENAI CIMATEC; Salvador-BA; ednasa@fieb.org.br

<sup>3</sup> Dr em Desenvolvimento e Meio Ambiente; Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia; henrique.leo@gmail.com

<sup>4</sup> MSC em Engenharia Ambiental; Centro Universitário SENAI CIMATEC; Salvador-BA; arilma@fieb.org.br

## RESUMO

O ferro gusa é a principal matéria prima do aço. O setor siderúrgico de ferro e aço tem sofrido pressões e transformações determinantes nos últimos anos. As discussões sobre escassez das matérias-primas nobres estão em pauta e impulsionam o desenvolvimento de novos materiais. Concomitantemente, com a temática da mudança climática em evidência, o setor se vê pressionado pois as tecnologias em uso são intensivas em energia e emissão de gases de efeito estufa. Rotas alternativas emergentes tem apontado um potencial de performance ambiental superior. A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta reconhecida internacionalmente por possibilitar a mensuração e comparação do perfil ambiental de produtos e serviços industriais. Este estudo realiza uma avaliação sistemática da literatura que concerne à questão dos impactos ambientais do ciclo de vida da produção de ferro gusa com o intuito de elencar as contribuições científicas e evidências existentes. Os resultados da busca foram classificados e analisados. Verificou-se que 15 trabalhos respondem às perguntas levantadas parcial ou totalmente, sendo 7 nos últimos 3 anos, e apenas 3 voltados à questão central desta pesquisa, porém com lacunas a serem preenchidas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Impacto ambiental, ecologia industrial, alto-forno, ferro primário

## 1. INTRODUÇÃO

O ferro gusa, também chamado de gusa ou ferro primário, é o produto da redução de minério de ferro por um agente redutor rico em carbono que é fonte de energia do processo [1]. Essa redução se processa em fornos industriais com auxílio de fluxantes e outros materiais. O gusa é produzido no mundo inteiro majoritariamente via alto-fornos [2]. A maior parte (~ 70%) é consumida na produção de aço e, em menor proporção, de ferro fundido e outros. A composição mássica típica do ferro gusa possui pelo menos 92% de ferro (Fe), 3,5-4,5% de carbono (C), podendo conter silício (Si), enxofre (S), fósforo (P) e manganês (Mn) como impurezas [1].

De acordo com Relatório Estatístico Anual da Associação Mundial de Aço [3], em 2017, a produção mundial de gusa foi da ordem de 1,2 trilhões de toneladas. A China foi o país com maior produção, representando cerca de 61,4% desse total. Em sexto lugar, posicionou-se Brasil com 2,4%. Segundo dados do Anuário Estatístico do Setor Metalúrgico [4], 32,1 milhões de toneladas de gusa foram produzidas no Brasil. O perfil produtivo nacional é representado pelos estados de Minas Gerais com 72,6%, Maranhão e Pará juntos (conhecidos como Carajás) com 14,5%, Espírito Santo com 9,1% e Mato Grosso do Sul com 3,8%.

Diante do cenário global de mudanças no mercado de matérias-primas, alternativas economicamente sustentáveis para siderurgia tem sido desenvolvidas [5]. Ao mesmo tempo, diante da pressão das mudanças climáticas no setor, os esforços também estão sendo direcionados para redução do consumo de energia, bem como das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), aspectos que permeiam a temática da ecologia industrial. A indústria de ferro e aço está entre as mais intensivas em uso de energia e corresponde à maior parcela de emissão de CO<sub>2</sub> do setor manufatureiro, aproximadamente 27% [6]. Uma gama de tecnologias de baixo consumo de energia e de emissão aplicáveis à indústria siderúrgica já estão em estado de comercialização [6]. Todavia, a informação sobre tecnologias emergentes ou avançadas ainda não comercializadas é limitada.

De acordo com relatório do Centro de Gestão e Estudos Estratégicos [7], na discussão acerca do “desenvolvimento sustentável” no setor siderúrgico brasileiro são preocupações centrais, dentre outras, a normalização cada vez mais restritiva no tocante à exploração de recursos naturais e fortalecimento das ações das organizações ambientais. Estrategicamente, o setor caminha para articular-se aderindo à programas ambientais e metas de redução de GEE voluntários. Além disso, temas já conhecidos, mas não resolvidos, também são pauta como cadeia logística, gestão de resíduos, redução de geração na fonte, tecnologias fim de tubo, reciclagem, reuso e gestão do uso da água.

Recentemente, os mais novos altos-fornos sofreram modificações e melhorias consideráveis focadas principalmente no aprimoramento dos principais materiais de carregamento e injeção de combustíveis

auxiliares [2]. Isso pode tornar o processo mais fluido e eficiente, aumentando produtividade e, ao mesmo tempo, reduzindo a demanda de agentes redutores. O potencial de uso de briquetes como carga se apresenta como alternativa para explorar resíduos de ferro e carbono no processo.

Uma das ferramentas de análise ambiental de produtos e serviços da indústria é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), uma metodologia internacionalmente reconhecida e consolidada [8]. O método consiste em compilar as entradas e saídas de recursos materiais e energéticos do início ao final da vida de um sistema de produto e estimar os impactos produzidos sobre o meio ambiente [9]. Isso permite conhecer o fluxo de recursos naturais, renováveis ou não, associados a um produto, seus impactos na biosfera, litosfera, hidrosfera e atmosfera, e os danos potenciais sobre reservas naturais, ecossistema e saúde humana. Em virtude da sua padronização, é possível estabelecer comparações entre os sistemas produtivos (*benchmarking* ecológico).

Diante do exposto, este trabalho se propõe a investigar o estado da arte da avaliação de ciclo de vida ambiental da produção de ferro gusa através de uma revisão sistemática da literatura.

## 2. METODOLOGIA

Realizou-se uma revisão sistemática da literatura. A estratégia usada foi buscar trabalhos em repositórios científicos concernentes ao tema, obedecendo uma sequência de ações, a saber: sistematização de perguntas de pesquisa; definição dos descritores e período/ano de publicação; filtragem de trabalhos após leitura de título e resumo; seleção para refinamento da amostra após leitura dinâmica seguindo os critérios de exclusão; e, por fim, identificação de quais trabalhos respondem parcial ou totalmente às perguntas:

Q1. Existem trabalhos que utilizam ACV para avaliar o perfil ambiental do ferro gusa produzido por pelo menos uma rota/tecnologia?

Q2. Existem trabalhos que estimam a pegada de carbono da produção de ferro gusa?

Q3. Existem trabalhos que estimam eficiência energética da produção de ferro gusa?

Foram utilizados os seguintes conjuntos de descritores:

- Ferro gusa, Siderurgia, ACV, Eficiência energética, Carbono, Ambiental;
- *Pig iron, Ironmaking, LCA, Energy efficiency, Carbon, Environmental.*

A busca foi realizada nos repositórios *Scholar Google*, *Web of Science*, *Science Direct* e *Scielo*. O período considerado para o estado da arte foram os últimos 3 anos e o ano correte (2016 - 2019). Considerou-se também publicações relevantes dos anos anteriores (2000 - 2015). Os critérios de seleção foram (nessa ordem):

- Descritores contidos no título, resumo e/ou palavras-chave;
- Título e resumo aderentes ao tema;
- Acesso ao documento completo (visualização ou *download*);
- Metodologia, resultados, discussão e conclusões aderentes às questões levantadas.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As buscas foram realizadas no dia 03 de maio de 2019. A Tabela 1 mostra o número de publicações encontradas na primeira busca. A Tabela 2 apresenta os resultados após verificação e seleção por título e resumo.

**Tabela 1: Primeira rodada - número de trabalhos recuperados inicialmente**

Repositório	Com descritores em inglês / português					Total
	2019	2018	2017	2016	2000-2015	
<i>Scholar Google</i>	1 / 0	10 / 5	5 / 6	5 / 4	32 / 23	101
<i>Web of Science</i>	0 / 0	2 / 0	0 / 0	1 / 0	10 / 0	13
<i>Science Direct</i>	0 / 0	2 / 0	0 / 0	2 / 0	4 / 0	6
Scielo	0 / 0	0 / 1	0 / 1	0 / 1	0 / 21	24

**Tabela 2: Segunda rodada - após leitura de título e resumo**

Repositório	Com descritores em inglês / português					Total
	2019	2018	2017	2016	2000-2015	
<i>Scholar Google</i>	0 / 0	4 / 0	3 / 0	4 / 0	3 / 2	16
<i>Web of Science</i>	0 / 0	0 / 0	0 / 0	1 / 0	7 / 0	8
<i>Science Direct</i>	0 / 0	1 / 0	0 / 0	1 / 0	1 / 0	3
Scielo	0 / 0	0 / 0	0 / 0	0 / 0	0 / 1	1

Dos 28 trabalhos selecionados, 22 estavam disponíveis para leitura completa. A maior parte dos artigos (*papers*) publicados de 2017 para trás estava disponível, outros mais recentes não estavam disponíveis, provavelmente, pelo acesso ser exclusivo aos assinantes dos periódicos, passando a ter acesso livre (*open access*) normalmente após dois anos de sua publicação. Na terceira fase, as publicações com acesso ou

download permitido dentro do VPN concedido ao SENAI CIMATEC pela CAPES, foi feita seleção após leitura dinâmica e um confronto com as perguntas levantadas (Tabela 3).

**Tabela 3: terceira rodada - confronto com as perguntas após leitura dinâmica dos trabalhos disponíveis**

Ano	Título	Pergunta			Resposta	
		Q1	Q2	Q3	Total	Parcial
2002	Princípios de ecologia industrial aplicados à sustentabilidade ambiental e aos sistemas de produção de aço		x	x		x
2007	<i>On the use of Process Integration Methods - Evaluation of Energy and CO2 emission Strategies in Blast Furnace Ironmaking and Oxygen Steelmaking</i>		x	x	x	
2008	Balanço de materiais na gestão ambiental da cadeia produtiva do carvão vegetal para produção de ferro gusa em Minas Gerais	x			x	
2011	<i>Reducing the greenhouse gas footprint of primary metal production: Where should the focus be?</i>		x	x		x
2012	<i>Effects of Biomass Use in Integrated Steel Plant – Gate-to-gate Life Cycle Inventory Method</i>			x		x
2012	<i>Fossil fuels consumption evaluation in blast furnace technology based on different life cycle impact assessment methods</i>	x			x	
2013	<i>Life cycle assessment of steel production in Poland: a case study</i>	x				x
2014	<i>Charcoal injection in blast furnaces (Bio-PCI): CO2 reduction potential and economic prospects</i>			x		x
2016	<i>Assessment of midterm CO2 emissions reduction potential in the iron and steel industry: a case of Japan</i>		x	x	x	
2016	<i>Biomass applications in iron and steel industry: An overview of challenges and opportunities</i>			x	x	
2016	<i>Sustainability evaluation of a steel production system in China based on energy</i>		x			x
2017	<i>Environmentally sustainable industrial development</i>		x	x	x	
2017	<i>Extensive review of the possibilities to use biomass-based fuels in iron and steelmaking processes</i>		x	x		x
2018	<i>Reducing industrial energy demand in the UK: A review of energy efficiency technologies and energy saving potential in selected sectors</i>		x	x		x
2018	<i>Use of biomass in integrated steelmaking – Status quo, future needs and comparison to other low-CO2 steel production technologies</i>		x	x		x

Foram encontrados 15 trabalhos que respondem às perguntas levantadas, sendo 7 dos últimos 3 anos. Houve mais respostas parciais que totais. Somente 3 trabalhos responderam à pergunta central da pesquisa (Q1), porém analisando apenas a principal rota, o alto-forno. Dois trabalhos consideraram apenas 2 categorias de impacto (diferentes entre si), outro não apresentou resultados desagregados onde o foco era produção do aço. Outras categorias como toxicidade humana, depleção de recursos naturais, acidificação atmosférica, etc. não foram avaliadas. Na maior parte dos estudos, a comparação foi feita com diferentes matérias-primas ou alternativas tecnológicas pontuais e incrementais para melhoria da eficiência energética e/ou redução do potencial de mudança climática. Observou-se ainda que é limitado o número de referências com análise ambiental de tecnologias alternativas emergentes como os fornos COREX, HISMELT, TECNORED e outros.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Verificou-se que somente 3 dos trabalhos selecionados tratavam de ACV do ferro gusa, com limitações e distintos enfoques, sendo portanto uma ferramenta ainda pouco explorada para avaliação desse segmento. A próxima etapa consistirá em uma meta-análise dos trabalhos mais aderentes encontrados nesta revisão.

#### 5. REFERÊNCIAS

- 1 IIMA (International Iron Metallurgy Association). **Pig Iron: Overview**. 2018.
- 2 SMIL, V. **Ironmaking and Steelmaking Processes: Greenhouse Emissions, Control, and Reduction**. Pasquale Cavaliere; 2016.
- 3 WSA (World Steel Association). **Statistics: Crude Steel Production**. 2018.
- 4 MME (Ministério de Minas e Energia). **Anuário Estatístico do Setor Metalúrgico**. 2018.
- 5 GORDON, Y.; KUMAR, S.; FREISLICH, M.; YAROSHENKO, Y.; SPIRIN, N. **The Modern Technology of Iron and Steel Production and Possible Ways of their Development Introduction**. 2015.
- 6 HASANBEIGI, A.; PRICE, L.; ARENS, M. **Emerging Energy-efficiency and Carbon Dioxide Emissions-reduction Technologies for the Iron and Steel Industry**. 2013.
- 7 CGEE (Centro de Gestão e Estudos Estratégicos). **Siderurgia no Brasil: 2010-2025**. 2010.
- 8 ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR ISO 14040: Gestão ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e Estrutura**. 2009.
- 9 IBICT (Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia). **Desenvolvimento Sustentável e Avaliação de Ciclo de Vida**. 2014.