



PRINCÍPIOS DA QUÍMICA VERDE E A PRODUÇÃO DE FERRO-GUSA: UMA REVISÃO INTEGRATIVA

Andressa Tairine Evangelista¹; Yuri Uriel Cerqueira Gil Braz Moreira²; Reinaldo Coelho Mirre³; Ewerton Emmanuel da Silva Calixto⁴; Fernando Luiz Pellegrini Pessoa⁵

¹ Centro Universitário Senai Cimatec; Av. Orlando Gomes, 1845, Piatã; Salvador/BA; andressatairine@hotmail.com

² Centro Universitário Senai Cimatec; Av. Orlando Gomes, 1845, Piatã; Salvador/BA

³ Centro Universitário Senai Cimatec; Av. Orlando Gomes, 1845, Piatã; Salvador/BA

⁴ Centro Universitário Senai Cimatec; Av. Orlando Gomes, 1845, Piatã; Salvador/BA

⁵ Centro Universitário Senai Cimatec; Av. Orlando Gomes, 1845, Piatã; Salvador/BA

Resumo: Este trabalho propõe uma revisão integrativa da literatura com o objetivo de avaliar a aplicação dos Princípios da Química Verde (PQV) na produção de ferro-gusa. A pesquisa mostrou que não há estudos que evidenciem a utilização dos 12 PQV nesse processo, bem como não existe uma metodologia que mensure e analise processos produtivos por meios destes princípios. Assim, a realização deste estudo permitiu identificar lacunas e oportunidades voltadas às pesquisas para aplicação dos PQV na produção do ferro-gusa, bem como apresentar um grande potencial do uso de uma metodologia que avalie e mensure os 12 princípios para a produção de todo e qualquer processo produtivo.

Palavras-Chave: Revisão Integrativa; Química Verde; Ferro-Gusa.

PRINCIPLES OF GREEN CHEMISTRY AND IRON PRODUCTION: AN INTEGRATIVE REVIEW

Abstract: This paper proposes an integrative literature review aiming to evaluate the application of the Green Chemistry Principles (GCP) in pig iron production. The research has shown that there are no studies that evidence the use of the 12 GCP in this process, as well as there is no methodology that measures and analyzes production processes by means of these principles. Thus, the accomplishment of this study allowed to identify gaps and opportunities related to research for the application of GCP in pig iron production, as well as to present a great potential of the use of a methodology that evaluates and measures the 12 principles for the production of any and all productive process.

Keywords: Integrative Review; Green Chemistry; Pig Iron.



1. INTRODUÇÃO

A minimização de impactos ambientais e as crescentes transformações socioeconômicas são temas cada vez mais preocupantes e desafiadores à humanidade. Estes três aspectos (ambiental, social e econômico) formam, em conjunto, o tripé da sustentabilidade, que vem tendo cada vez mais repercussões internacionais. O uso de fontes de energia não limpas, matérias primas não renováveis e processos industriais não controlados adequadamente constituem fatores que impactam negativamente no desenvolvimento sustentável de um país. Com o propósito de minimizar ou evitar esses riscos adversos à sustentabilidade, foi criado o conceito de Química Verde (QV) no início de 1990, desenvolvida pela Agência de Proteção Ambiental (EPA) dos Estados Unidos da América. Expressa em 12 princípios enunciados por Anastas e Warner, a QV tem a finalidade de proporcionar processos químicos industriais baseados em transformações limpas e seguras [1].

Segundo a União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC) [2], a QV é a invenção, o projeto e a aplicação de processos e produtos químicos para reduzir ou eliminar o uso e a geração de substâncias perigosas. De acordo com Anastas e Eghali [3], o aspecto mais importante da QV é o conceito de *design*, que inclui novidade, planejamento e concepção sistemática. A QV é caracterizada pela elaboração cuidadosa da síntese química e do *design* molecular com o propósito de reduzir as consequências adversas à sustentabilidade. Por meio de um projeto adequado, é possível obter sinergias - não apenas compensações. Os 12 Princípios da Química Verde (PQV) são, portanto, “regras de *design*”, a fim de ajudar os químicos a alcançarem o objetivo intencional da sustentabilidade. Eles são critérios ou diretrizes que fornecem a estrutura para o projeto sustentável, constituindo uma construção abrangente para o *design* de produtos e transformações químicas mais seguras [3].

É sabido que o Brasil é o segundo maior produtor de minério de ferro e o sexto maior produtor de ferro-gusa do mundo [4], matéria-prima elementar do aço. Para a produção do ferro-gusa, os principais componentes são o carvão metalúrgico e o minério de ferro. Contudo, o uso de tais insumos não renováveis no processo propicia elevadas taxas de emissões de CO₂ (gás carbônico), bem como contribui de maneira expressiva para o esgotamento de reservas minerais.

O grande desafio, portanto, da Química Verde no século XXI é eliminar qualquer tipo de contaminação e risco devido às substâncias e transformações químicas, sobretudo no setor industrial, responsável por 21% das emissões de gases do efeito estufa (GEE) no mundo [5]. No Brasil, a produção de ferro-gusa e aço responde por 27% das emissões industriais de GEE do país [5]. Diante deste cenário, a economia circular desponta como um modelo mais sustentável, diferentemente da abordagem linear, que é baseada na filosofia extrair-fabricar-usar-descartar produtos e energias [6]. Denominada também de economia restaurativa por natureza, centrada no uso e no valor restaurativo e regenerativo dos recursos naturais, este conceito teve origem na década de 1970 e pressupõe a ruptura do modelo linear [6,7]. A economia circular é pautada na redução, reutilização, restauração e regeneração de materiais e energia em circuitos fechados [6], conhecidos também como 4Rs. Embora cerca de 20 anos mais antiga que a QV, ambas têm em comum a mesma essência: a



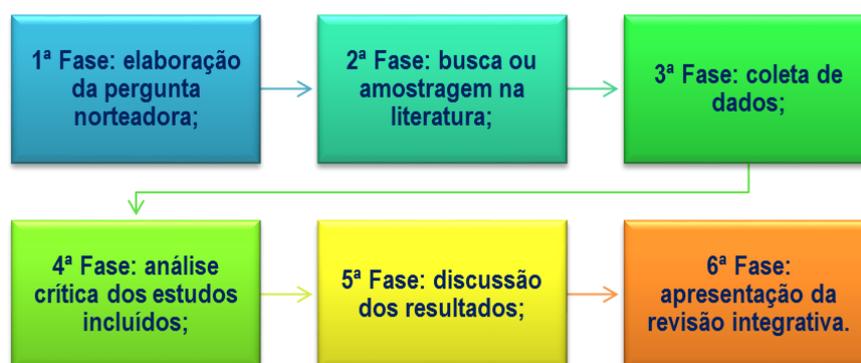
sustentabilidade dos processos. Desta forma, os PQV podem ser utilizados como uma ferramenta para auxiliar na implantação do modelo econômico circular em empresas e organizações, tornando seus processos mais sustentáveis e circulares, sem perder sua eficiência e qualidade.

Assim, com a finalidade de realizar um levantamento bibliográfico, relacionando a produção do ferro-gusa com a aplicação dos princípios da QV, esta pesquisa propõe uma revisão integrativa, a fim de avaliar o cruzamento entre esses temas e verificar o que há de novo que está sendo utilizado na área.

2. METODOLOGIA

Este trabalho apresenta uma revisão integrativa da literatura sobre publicações relacionadas aos PQV e a produção de ferro-gusa. As revisões integrativas possuem estratégia de busca sofisticada e exaustiva, e são divididas em seis etapas, conforme apresentadas na Figura 1, alicerçadas em um protocolo previamente estabelecido, a fim de manterem o rigor científico e metodológico [8].

Figura 1. Etapas da revisão integrativa



Fonte: Os autores.

A pesquisa foi realizada entre os meses de junho e julho de 2019 e não houve restrição para o ano de publicação dos estudos encontrados.

3. REVISÃO INTEGRATIVA APLICADA

3.1. 1ª Fase: Elaboração da Pergunta Norteadora

Na primeira etapa da revisão integrativa são definidas as perguntas norteadoras da pesquisa a ser desenvolvida. A quantidade não é delimitada e varia



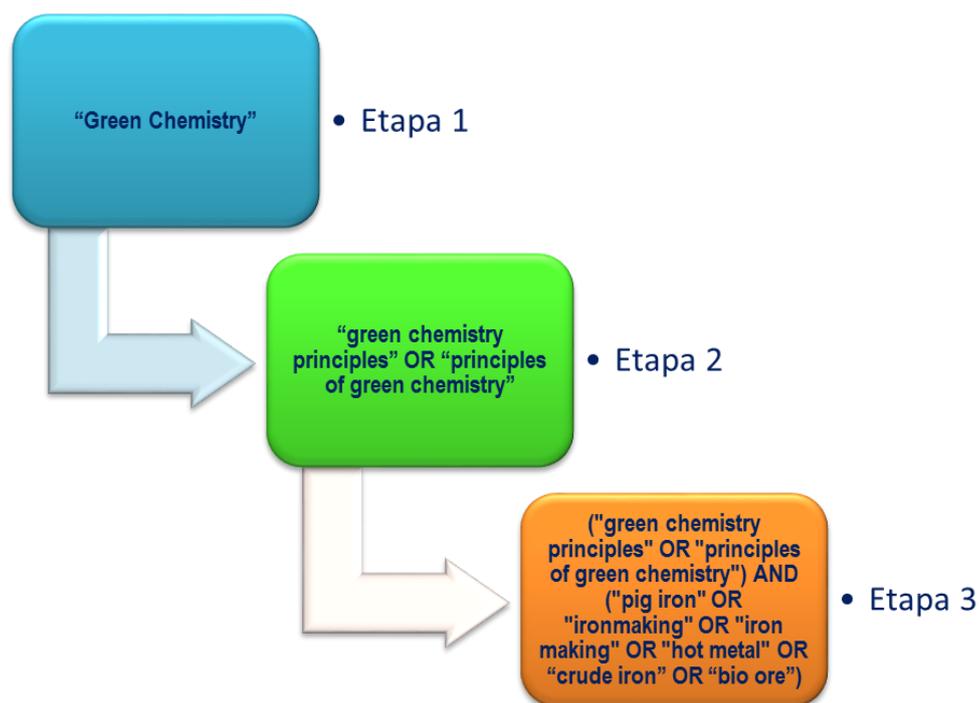
de acordo com a necessidade e o senso crítico do pesquisador. Normalmente, revisões integrativas apresentam de 1 a 3 perguntas. Para a elaboração deste estudo, foram utilizados dois questionamentos:

- 1- Os 12 Princípios da Química Verde estão sendo aplicados nos processos de produção de ferro-gusa?
- 2- Existe algum método/ferramenta que possibilite a aplicação dos 12 Princípios da Química Verde?

3.2. 2ª Fase: Busca ou Amostragem na Literatura

Nesta fase são definidas as *strings* (descritores) utilizadas para busca na literatura e as bases de dados a serem pesquisadas. O levantamento bibliográfico deste trabalho foi feito em três etapas, conforme ilustrado na Figura 2, e as bases de dados utilizadas foram: *Web of Science*, *Acadêmico*, *Science Direct* e *Scopus*.

Figura 2. Etapas de descritores



Fonte: Os autores.

As etapas 1 e 2 foram realizadas apenas para obter uma noção da quantidade de pesquisas existentes sobre o tema QV de forma mais ampla. Contudo, o “suprassumo” deste estudo encontra-se na etapa 3, pois reflete o *crossover*, ou seja, o cruzamento entre os termos PQV e ferro-gusa. É importante ressaltar que, embora



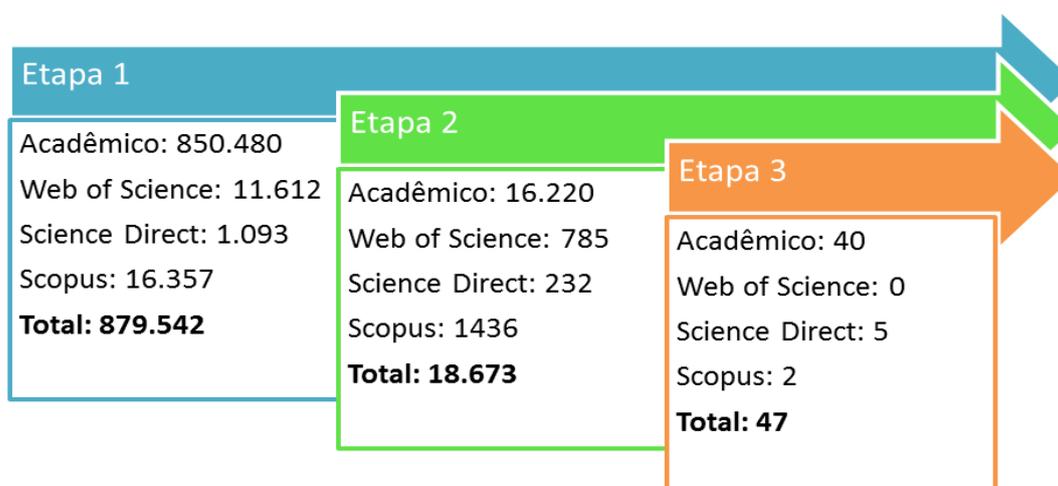
as *strings* da Figura 2 estejam escritas em inglês, a busca também foi realizada em português.

Nesta etapa são determinados também os critérios de inclusão e exclusão de trabalhos. Baseado no estudo de Barra [8], os parâmetros de inclusão foram pesquisas originais, publicadas em inglês ou português, disponíveis na íntegra. Quanto aos de exclusão, foram considerados duplicidade de pesquisas e a não elegibilidade ao tema proposto.

3.3. 3ª Fase: Coleta de Dados

Na terceira fase é feita a organização e sintetização das informações dos trabalhos selecionados. A Figura 3 ilustra a quantidade de publicações encontradas em cada etapa de descritores utilizados.

Figura 3. Quantidade de pesquisas encontradas em cada etapa de descritores



Fonte: Os autores.

Após o levantamento das 47 publicações encontradas na busca da etapa 3 (sendo 45 em inglês e 2 em português), estes documentos foram organizados em tabela, sumarizadas suas informações e, em seguida, foram aplicados os critérios de inclusão e exclusão de trabalhos, de acordo com a Figura 4.



Figura 4. Aplicação dos critérios de exclusão e inclusão nas publicações levantadas



Fonte: Os autores.

Conforme representado na Figura 4, dos 47 documentos levantados, apenas três trabalhos apresentaram elegibilidade ao tema em estudo (após a leitura dos resumos, títulos e palavras-chaves) e serão avaliados com criticidade na próxima fase.

3.4. 4ª Fase: Análise Crítica dos Estudos Incluídos

Nesta etapa é realizada uma análise crítica dos artigos selecionados na fase anterior, após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão de trabalhos. Os estudos a serem analisados são os seguintes:

- *The chemical exploitation of nickel phytoextraction: An environmental, ecologic and economic opportunity for New Caledonia*; Guillaume Losfeld, Vincent Escande, Tanguy Jaffr, Laurent L'Huillier, Claude Grison; França; 2012 [9].
- *Lewis Acid Catalysts: a potential exploitation for zinc and nickel phytoextraction*; G. Losfeld, P. Vidal de la Blache, V. Escande, C. Grison; França; 2012 [10].
- *Chemical exploitation of metal contaminated biomass produced in phytoextraction*; G. Losfeld, V. Escande, P. Vidal De La Blache, C. Grison; França; 2014 [11].



O primeiro estudo trata de um método inovador para recuperação química de biomassa rica em metais produzida por meio de tecnologia de fitoextração. De acordo com os autores, o *design* de todos os processos encontra-se em conformidade com os PQV e representam uma nova alternativa aos materiais minerais não renováveis. O estudo aborda a questão do uso de solventes, o uso de fontes renováveis e de catalisadores, relacionados aos princípios 5, 7 e 9 da QV, respectivamente. Os autores tratam ainda, de forma sucinta, da economia de átomos e da eficiência energética, princípios 2 e 6, nesta ordem. Contudo, o estudo não abrange todos os 12 princípios e não utiliza uma metodologia a fim de mensurar e avaliar os aspectos do processo por meio dos PQV.

Os segundo e terceiro trabalhos tratam do mesmo processo de fitoextração, abordando apenas mais etapas desta técnica. Assim como no artigo anterior, estes estudos evidenciam os mesmos PQV abordados no primeiro, não contemplando uma análise completa dos 12 princípios.

3.5. 5ª Fase: Discussão dos Resultados

Na 5ª etapa, a partir da interpretação e síntese dos resultados, realiza-se a comparação dos trabalhos selecionados com o referencial teórico, identificam-se possíveis lacunas e propõem-se potenciais caminhos para trabalhos futuros [12].

De acordo com a análise feita na fase anterior dos artigos incluídos, observa-se que nenhum deles abrange os 12 PQV, bem como não apresentam uma ferramenta que viabilize a mensuração e análise dos processos por meio destes.

Outra constatação importante é que nenhum dos trabalhos tratam da produção de ferro-gusa, mas sim da recuperação de biomassa rica em metais. Foi realizada uma busca exaustiva de acordo com as *strings* estabelecidas (2ª fase); no entanto, os resultados encontrados não retratam o *crossover* entre os PQV e a produção de ferro-gusa. Os trabalhos analisados refletem apenas a relação, de forma superficial, de alguns dos PQV com o processo de fitoextração. Isto demonstra que há uma lacuna nestes estudos em relação à abordagem de todos os princípios, bem como à ausência de uma ferramenta que auxilie na análise dos processos produtivos por meio destes.

Desta forma, há um grande potencial de estudo para estes trabalhos, relacionando-os com todos os PQV, de forma a deixar a pesquisa mais completa em relação a este tema, bem como existe uma grande lacuna que precisa ser explorada: aplicação dos 12 PQV na produção de ferro-gusa.

3.6. 6ª Fase: Apresentação da Revisão Integrativa

Nesta etapa é feito um *overview* (visão geral) da revisão integrativa proposta, fazendo a correlação com todas as fases precursoras. Assim, para este estudo, foi realizado um levantamento bibliográfico com as *strings* e as bases de dados definidas na 2ª fase (busca ou amostragem na literatura) e foram encontrados 47 documentos,



conforme apresentados na 3ª fase (coleta de dados). Destes trabalhos, apenas três passaram para a 4ª fase (análise crítica dos estudos incluídos), por terem elegibilidade ao tema proposto, e foram discutidos e comparados na 5ª fase (discussão dos resultados). Nesta penúltima etapa foram identificados também os *gaps* (lacunas) existentes e propostas potenciais diretrizes para trabalhos futuros.

É importante ressaltar que nenhum dos trabalhos analisados criticamente responde de forma afirmativa às perguntas norteadoras estabelecidas na 1ª fase. Ou seja, não há um estudo que evidencie a aplicação dos 12 PQV no processo de produção do ferro-gusa, bem como não existe uma metodologia que mensure e analise os processos produtivos por meio destes princípios. Vale destacar também que, como uma forma de englobar o máximo possível de pesquisas referentes a este tema, os trabalhos selecionados foram incluídos na análise crítica devido à estratégia de busca definida na escolha dos descritores (utilização de palavras similares a 'ferro-gusa' em inglês).

Assim, é possível concluir que existe uma grande lacuna voltada a pesquisas relacionadas à aplicação dos 12 PQV no processo de produção de ferro-gusa, bem como há a necessidade de se desenvolver uma metodologia que mensure e analise processos produtivos por meio destes.

4. CONCLUSÃO

A revisão integrativa é um estudo que permite realizar um levantamento bibliográfico referente a determinados temas que se deseja relacionar, realizar uma análise crítica dos trabalhos selecionados, identificar os *gaps* existentes na área de pesquisa e propor caminhos pertinentes a estudos futuros direcionados à sua melhoria. Assim, com o objetivo de investigar a relação entre produção de ferro-gusa e os PQV, foi realizada uma revisão integrativa para responder às perguntas norteadoras da pesquisa ("Os 12 Princípios da Química Verde estão sendo aplicados nos processos de produção de ferro-gusa?" e "Existe algum método/ferramenta que possibilite a aplicação dos 12 Princípios de Química Verde?").

De acordo com o estudo realizado, foram levantados 47 documentos relacionados aos descritores definidos para a pesquisa utilizando as bases de dados da *Web of Science*, *Acadêmico*, *Science Direct* e *Scopus*. Destes trabalhos encontrados, apenas três foram analisados criticamente após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão estabelecidos e leitura dos resumos, títulos e palavras-chaves. Após a realização da análise crítica, constatou-se que os estudos respondem de forma negativa às duas perguntas norteadoras, evidenciando, desta forma, um grande *gap* relacionado à aplicação dos 12 PQV no processo produtivo do ferro-gusa e à ausência de uma metodologia que mensure e analise processos produtivos por meio destes.

Além disso, evidenciou-se também que, embora as publicações literárias selecionadas não abordem sobre o ferro-gusa, elas foram incluídas na análise crítica por apresentarem descritores semelhantes aos definidos na estratégia de busca da pesquisa (similares da palavra 'ferro-gusa' em inglês). A inclusão destes trabalhos foi importante para corroborar a ausência de estudos relacionados aos PQV e a produção



de ferro-gusa e demonstrar que, mesmo para a técnica avaliada (fitoextração), não há pesquisas referentes à análise deste processo por meio de uma metodologia que contemple todos os 12 princípios.

Portanto, a realização deste estudo permitiu identificar lacunas e oportunidades voltadas às pesquisas para utilização dos PQV nos processos produtivos de ferro, bem como apresentar um grande potencial do uso de uma metodologia que avalie e mensure os 12 princípios para a produção de todo e qualquer processo produtivo.

5. REFERÊNCIAS

¹MESTRES, Ramon et al. Química Sostenible: naturaleza, fines y ámbito. **Educación Química**, v. 24, n. 1, p. 103–112, 2013.

²IUPAC. International Union of Pure and Applied Chemistry. **Green Chemistry and Sustainable Development**. Green Chemistry Directory. Venice. Disponível em: <<http://www.incaweb.org/transit/iupacgdir/overview.htm>>. Acesso em: 19 fev. 2019.

³ANASTAS, Paul; EGHBALI, Nicolas. **Green Chemistry: principles and practice**. 2009. Disponível em: <10.1039/B918763B>. Acesso em: 14 jan. 2019.

⁴WORDSTEEL. World Steel in Figures. **World Steel Association**, p. 17, 2019

⁵FERREIRA, André L. et al. **Emissões dos setores de energia, processos industriais e uso de produtos**. Documento de análise, 2018.

⁶SILVA, Valdenildo Pedro Da. Economia circular: um novo valor para negócios sustentáveis. **RAE-Revista de Administração de Empresas**, São Paulo, 2019.

⁷AZEVEDO, Juliana Laboissière De. A economia circular aplicada no Brasil: Uma análise a partir dos instrumentos legais existentes para a logística reversa. **XI Congresso Nacional de Excelência em Gestão**, p. 16, 2015.

⁸BARRA, Daniela Couto Carvalho et al. Métodos para desenvolvimento de aplicativos móveis em saúde: revisão integrativa da literatura. **Texto contexto - enfermagem**, v.26, n.4, 2017.

⁹LOSFELD, Guillaume et al. The chemical exploitation of nickel phytoextraction: an environmental, ecologic and economic opportunity for New Caledonia. **Chemosphere**, v. 89, n. 7, p. 907–910, 2012. b.

¹⁰LOSFELD, G. et al. Lewis acid catalysts: A potential exploitation for zinc and nickel phytoextraction. **WIT Transactions on Ecology and the Environment**, v. 162, p. 563–575, 2012. a.

¹¹LOSFELD, G. et al. Chemical exploitation of metal contaminated biomass produced in phytoextraction. **International Journal of Sustainable Development and Planning**, v. 9, n. 3, p. 400–416, 2014.

¹²SOUZA, Marcela Tavares de. et al. Revisão integrativa: o que é e como fazer Integrative review: what is it? How to do it? **Einstein - Instituto Israelita de Ensino e Pesquisa Albert Einstein**, v. 8, n. 1, p. 102–108, 2010.