



CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC
PROGRAMA DE POS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU
GESTÃO E TECNOLOGIA INDUSTRIAL

ANDRESSA TAIRINE EVANGELISTA

**ANÁLISE DO IMPACTO AMBIENTAL DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DO
FERRO-GUSA POR MEIO DOS PRINCÍPIOS DA QUÍMICA VERDE E DE
INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE**

Salvador, 2020

ANDRESSA TAIRINE EVANGELISTA

**ANÁLISE DO IMPACTO AMBIENTAL DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DO
FERRO-GUSA POR MEIO DOS PRINCÍPIOS DA QUÍMICA VERDE E DE
INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu do Centro Universitário SENAI CIMATEC como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Gestão e Tecnologia Industrial

Orientador: Prof. Dr. Fernando Luiz Pellegrini Pessoa

Coorientador: Prof. Dr. Ewerton Emmanuel da Silva Calixto

Salvador, 2020

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Centro Universitário SENAI CIMATEC

E92a Evangelista, Andressa Tairine

Análise do impacto ambiental do processo de produção do ferro-gusa por meio dos princípios da química verde e de indicadores de sustentabilidade / Andressa Tairine Evangelista. – Salvador, 2020.

143 f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Luiz Pellegrini Pessoa.

Coorientador: Prof. Dr. Ewerton Emmanuel da Silva Calixto.

Dissertação (Mestrado em Gestão e Tecnologia Industrial) – Programa de Pós-Graduação, Centro Universitário SENAI CIMATEC, Salvador, 2020.

Inclui referências.

1. Princípios da química verde. 2. Indicadores de sustentabilidade. 3. Ferro-gusa. I. Centro Universitário SENAI CIMATEC. II. Pessoa, Fernando Luiz Pellegrini. III. Calixto, Ewerton Emmanuel da Silva. IV. Título.

CDD: 658.408

CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC

Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia Industrial

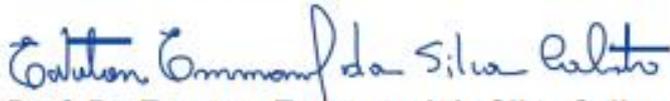
A Banca Examinadora, constituída pelos professores abaixo listados, aprova a Defesa de Mestrado, intitulada "Análise do Impacto Ambiental do Processo de Produção do Ferro-gusa por meio dos Princípios da Química Verde e de Indicadores de Sustentabilidade" apresentada no dia 12 de junho de 2020, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Gestão e Tecnologia Industrial.

Orientador:



Prof. Dr. Fernando Luiz Pellegrini Pessoa
SENAICIMATEC

Coorientador:



Prof. Dr. Ewerton Emmanuél da Silva Calixto
FIEB

Membro Interno:



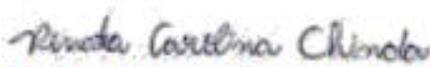
Prof.ª Dra. Lillian Lefol Nani Guarieiro
SENAICIMATEC

Membro Externo:



Prof. Dr. Salvador Ávila Filho
UFBA

Membro Externo:



Prof.ª Dra. Renata Carolina Chinda
UFRJ

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à comunidade científica e aos setores industriais, em especial, o siderúrgico, para contribuir no desenvolvimento de produtos e processos mais verdes, a fim de auxiliar na minimização dos impactos ambientais provocados por esses segmentos e, desta forma, promover um mundo mais sustentável.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, por me dar forças, coragem e discernimento para cumprir mais um ciclo da minha vida. Agradeço também aos meus pais, Antonio e Claudia, e ao meu irmão, Júnior, pelo suporte dado e pela compreensão em alguns momentos de ausência (às vezes não compreendidos rsrs). Agradeço ao meu namorado, Felipe, por todo o apoio e escuta ativa durante esse período e pela compreensão nos momentos que abdiquei de ficarmos juntos para me dedicar a este estudo. Agradeço também ao anjo que Deus me enviou para me ajudar neste trabalho: muito obrigada, de verdade, professor Reinaldo Mirre, por todo o auxílio e discussões que tivemos, por estar sempre disponível para tirar minhas dúvidas e por toda atenção e criticidade nos meus pedidos de revisão. Agradeço também aos meus orientadores, professores Fernando Pellegrini e Ewerton Calixto, por todos os conselhos, disponibilidade e compreensão perante os obstáculos enfrentados durante esse período (como as mudanças de temas até chegar-se a este rsrs). Agradeço a Yuri, por todo o suporte para a realização deste trabalho, aos integrantes do GIPQB e aos colegas do DPI, que me ajudaram e esclareceram algumas dúvidas sobre os processos. Agradeço ao SENAI e à EMBRAPPII, pela concessão da bolsa para a realização do mestrado. Agradeço às meninas da secretaria, a Júlie e Ingrid, por todo o suporte acadêmico administrativo. Agradeço a Nalva, Gil e a tia do “Oh, Glória!”, pelos momentos de descontração e por possibilitarem um ambiente adequado para o meu estudo. Agradeço ao pessoal do Lab. Energia, por todo o apoio e acolhimento e a todos os meus colegas da pós-graduação, em especial, Sara, João, Tássio, as Claras (rsrs), Paulo, Paulinho e Carol, por toda a troca e parceria durante as disciplinas do mestrado, trabalhos, conversas na salinha de convivência e nos almoços.

Agradeço também à minha banca, professores Lílian Guarieiro, Renata Chinda e Salvador Ávila Filho, por todas as contribuições para o aprimoramento deste estudo.

Gratidão de verdade!!

E que venham os próximos desafios!

“What’s measured improves.”

Peter Drucker

“Sustainability means change.”

Anupama Chalise

*“As mudanças só ocorrem quando
as pessoas começam a pensar diferente.”*

Autoria própria

RESUMO

Atender às necessidades atuais, sem comprometer o atendimento das gerações futuras, prezando pela conservação e uso racional dos recursos naturais, constituem desafios importantes da sustentabilidade. Esta dicotomia estabelecida entre as necessidades de crescimento econômico e a minimização dos impactos ambientais é ainda maior no setor industrial, que, embora represente uma das principais fontes de desenvolvimento de um país, constitui também um fator limitante para o alcance da sustentabilidade, devido aos impactos adversos gerados. Um exemplo é o setor metalúrgico, que, pela própria natureza de suas atividades, apresenta riscos ambientais que devem ser gerenciados em relação às emissões de poluentes atmosféricos, à disposição de resíduos sólidos e ao esgotamento de reservas minerais. Assim, diante deste cenário, o objetivo deste trabalho é desenvolver um procedimento de análise do impacto ambiental de processos químicos e/ou bioquímicos com base nos Princípios da Química Verde (PQVs) e nos Indicadores de Sustentabilidade (ISs). A metodologia proposta foi implementada em um programa computacional (Microsoft Excel®) para ser utilizada em qualquer processo produtivo, sendo capaz de identificar, automaticamente, a rota de produção mais sustentável, bem como fornecer diretrizes para um produto ou processo mais verde. A metodologia permite avaliar os impactos ambientais dos processos produtivos por meio de métricas dos PQVs e ISs, tendo sido aplicada em dois estudos de caso de produção de ferro-gusa com reagentes diferentes: (i) coque verde de petróleo (CVP) e (ii) coque chinês. Os resultados mostram que a rota que tem o CVP como fonte carbonífera possui melhor desempenho técnico e ambiental em relação ao coque chinês. Entretanto, os casos estudados apresentam lacunas e oportunidades de melhorias a serem implementadas nos processos produtivos, tais como: uso de matérias-primas renováveis, síntese de produtos menos perigosos, reaproveitamento de resíduos sólidos gerados e redução da taxa total de gases emitidos, em especial o dióxido de carbono, responsável pela intensificação do efeito estufa e, conseqüentemente, aumento da temperatura global.

Palavras-chave: Princípios da Química Verde. Indicadores de Sustentabilidade. Ferro-gusa.

ABSTRACT

Meeting current needs without compromising the care of future generations, valuing the conservation and rational use of natural resources are important sustainability challenges. This dichotomy established between the needs for economic growth and the minimization of environmental impacts is even greater in the industrial sector, although it represents one of the main sources of development in a country, it also constitutes a limiting factor for achieving sustainability, due to adverse impacts generated. An example is the metallurgical sector, which due to the very nature of its activities, it presents environmental risks that must be managed in relation to emissions of atmospheric pollutants, the disposal of solid waste and the depletion of mineral reserves. Thus, in view of this scenario, the objective of this work is to develop a procedure for analyzing the environmental impact of chemical and / or biochemical processes based on the Green Chemistry Principles (GCPs) and Sustainability Indicators (SIs). The proposed methodology was implemented in a computer program (Microsoft Excel®) to be used in any production process, being able to automatically identify the most sustainable production route, as well as to provide guidelines for “greener” product or process. The methodology allows to evaluate the environmental impacts of the production processes using metrics from the PQVs and ISs and it was applied in two case studies of pig iron production with different reagents: (i) green petroleum coke (GPC) and (ii) Chinese coke. The results show that the route that uses GPC as a coal source has better technical and environmental performance compared to Chinese coke. However, the cases studied present gaps and opportunities for improvements to be implemented in the production processes, such as: use of renewable raw materials, less hazardous chemical syntheses, reuse of solid waste generated and reduction of the total rate of gases emitted, especially carbon dioxide that is responsible for the intensification of the greenhouse effect and, consequently, an increase in global temperature.

Keywords: Green Chemistry Principles. Sustainability Indicators. Pig Iron.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Produção de ferro-gusa no Brasil.....	22
Quadro 2: Descrição dos marcos da Sustentabilidade.....	39
Quadro 3: ODS 6.....	42
Quadro 4: ODS 7.....	42
Quadro 5: ODS 8.....	42
Quadro 6: ODS 9.....	43
Quadro 7: ODS 12.....	43
Quadro 8: ODS 13.....	44
Quadro 9: ODS 15.....	44
Quadro 10: Métricas para avaliação dos processos de produção de ferro-gusa	61
Quadro 11: Entradas e saídas para o Caso A	62
Quadro 12: Entradas e saídas para o Caso B.....	62
Quadro 13: Comparação entre os resíduos gerados nos processos analisados e seus respectivos Fatores E.....	64
Quadro 14: Valor de PQV 2 para os processos em estudo	65
Quadro 15: Quantidade em % de Fe no gusa	66
Quadro 16: Informações toxicológicas dos reagentes.....	68
Quadro 17: Informações ecológicas dos reagentes.....	68
Quadro 18: Valor de PQV 3 para os processos em estudo	69
Quadro 19: Informações ecológicas e toxicológicas do ferro-gusa	71
Quadro 20: Análise Química do “gusa de mercado”	72
Quadro 21: Temperaturas intermediárias dos processos em estudo	74
Quadro 22: Vazões utilizadas nos processos em estudo	74
Quadro 23: Comparação da quantidade de insumos carbonosos utilizadas em cada processo.....	83
Quadro 24: Comparação da quantidade de matérias-primas utilizadas em cada processo.....	84
Quadro 25: Comparação da quantidade de energia utilizada em cada processo	84
Quadro 26: Comparação da quantidade de gases emitidos em cada processo.....	85
Quadro 27: Comparação da quantidade de óxidos de carbono emitidos em cada processo, considerando 20% em volume para cada gás.....	86
Quadro 28: Comparação da quantidade de óxidos de carbono emitidos em cada processo, considerando 28,7% em volume para o CO e 9,1% para o CO ₂	87
Quadro 29: Comparação da quantidade de gases emitidos em cada processo.....	88
Quadro 30: Avaliação dos 12 Princípios da Química Verde	89
Quadro 31: Avaliação dos seis Indicadores de Sustentabilidade.....	90
Quadro 32: Diretrizes para um processo de ferro-gusa mais verde e sustentável	103

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Participação de emissões de gases por setor.....	19
Figura 2: Emissões em dióxido de carbono equivalente por setor.....	19
Figura 3: Usinas integradas a coque.....	27
Figura 4: Usinas semi-integradas	27
Figura 5: Usinas não integradas	28
Figura 6: Processo de redução em alto-forno.....	29
Figura 7: Principais regiões do forno Tecnored	33
Figura 8: 12 Princípios da Química Verde	34
Figura 9: Marcos da Sustentabilidade.....	38
Figura 10: 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)	41
Figura 11: ODS relacionados ao tema deste estudo	41
Figura 12: Principais dimensões de um indicador.....	46
Figura 13: Indicadores de Sustentabilidade com enfoque no aspecto ambiental.....	48
Figura 14: Esquema da metodologia proposta	55
Figura 15: Passo a passo da metodologia proposta.....	57
Figura 16: Exemplo da aba do programa aplicado aos Princípios da Química Verde....	59
Figura 17: Exemplo da aba do programa aplicado aos Indicadores de Sustentabilidade	60
Figura 18: Sobreposição gráfica dos estudos de caso por meio dos PQVs.....	90
Figura 19: Sobreposição gráfica dos estudos de caso por meio dos ISs	91
Figura 20: Comparação dos estudos de caso de acordo com os ISs e PQVs	92
Figura 21: Consumo de energia no setor siderúrgico	96

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ACS	<i>American Chemical Society</i> (Sociedade Americana de Química)
AHP	<i>Analytical Hierarchy Process</i> (Processo de Hierarquia Analítica)
ANM	Agência Nacional de Mineração
BF	<i>Blast Furnace</i> (Alto-forno)
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
BOF	<i>Basic Oxygen Furnace</i> (Forno Básico de Oxigênio)
CGEE	Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
CMMAD	Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COP	Conferência das Partes
CSPI	<i>Composite Sustainability Performance Index</i> (Indicadores Compostos de Desempenho da Sustentabilidade)
CVP	Coque Verde de Petróleo
DRI	<i>Direct Reduced Iron</i> (Ferro Diretamente Reduzido)
Eco-92 ou Rio-92	Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i> (Agência de Proteção Ambiental)
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FCM	Fases com Monitoramento
FISPQ	Ficha de Informação de Segurança de Produtos Químicos
FSM	Fase sem Monitoramento
FSP	Fator de Severidade para Pressão
FST	Fator de Severidade para a Temperatura
GEE	Gases do Efeito Estufa
HBI	<i>Hot Briquetted Iron</i> (Ferro Briquetado a Quente)
IEA	<i>International Energy Agency</i> (Agência Internacional de Energia)
INDCs	<i>Intended Nationally Determined Contributions</i> (Contribuições Pretendidas, Determinadas em Nível Nacional)

IPIA	<i>Internacional Pig Iron Association</i> (Associação Internacional do Ferro-gusa)
IS	Indicador de Sustentabilidade
ISE	Indicador de Sustentabilidade de Entrada
ISS	Indicadores de Sustentabilidade de Saída
IUPAC	<i>International Union of Pure and Applied Chemistry</i> (União Internacional da Química Pura e Aplicada)
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MCDIC	Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MME	Ministério de Minas e Energia
MRE	Ministério das Relações Exteriores.
MS	Ministério da Saúde
NDCs	<i>Nationally Determined Contributions</i> (Contribuições Nacionalmente Determinadas)
NIOSH	<i>National Institute for Occupational Safety and Health</i> (Instituto Nacional de Segurança e Saúde Ocupacional)
NTP	<i>National Toxicology Program</i> (Programa Nacional de Toxicologia)
ODM	Objetivos de Desenvolvimento do Milênio
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OECD	Associação O Eco
ONU	Organização das Nações Unidas
PAEBM	Plano de Ações de Emergência para Barragens de Mineração
PCI	<i>Pulverized Coal Injection</i> (injeção de carvão pulverizado ou finos de carvão)
PIMS	<i>Plant Information Management Systems</i> (Sistemas de Gerenciamento de Informações da Planta)
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
PQV	Princípio da Química Verde
QV	Química Verde

RHF	<i>Rotary Hearth Furnace</i> (Forno de Soleira Rotativa)
RM	Rigor do Monitoramento
SDGs	<i>Sustainable Development Goals</i> (Objetivos de Desenvolvimento Sustentável)
SEEG	Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa
SINDIFER	Sindicato da Indústrias do Ferro
SIRENE	Sistema de Registro Nacional de Emissões
SNISB	Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens
UFCCC	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i> (Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas)
UNEP	<i>United Nations Environment Programme</i> (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente)
UNGASS	<i>United Nations General Assembly Special Session</i> (Sessão Especial da Assembléia Geral das Nações Unidas)
US	Usina Siderúrgica
WSSD	<i>World Summit on Sustainable Development</i> (Cúpula Mundial sobre Desenvolvimento Sustentável)
WWW	<i>Word Wide Web</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
2. SUSTENTABILIDADE, QUÍMICA VERDE E SIDERURGIA: CONCEITOS E DESAFIOS PARA O SÉCULO XXI.....	26
2.1 A METALURGIA DO FERRO	26
2.2 TECNOLOGIAS DE PRODUÇÃO DE FERRO	28
2.2.1 Redução Indireta – Alto-forno.....	29
2.2.2 Redução Direta – MIDREX	31
2.2.3 Autorredução – Tecnored	32
2.3 A QUÍMICA VERDE E OS SEUS PRINCÍPIOS.....	33
2.4 SUSTENTABILIDADE.....	35
2.4.1 O Bem-estar Humano e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)	35
2.5 QV E ISS: APLICAÇÕES EM PROCESSOS PRODUTIVOS	49
3. METODOLOGIA.....	54
4. AVALIAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DO FERRO-GUSA	63
4.1 PRINCÍPIOS DA QUÍMICA VERDE – PQVs	63
4.1.1 Princípio 1: Prevenção	63
4.1.2 Princípio 2: Economia de Átomos.....	64
4.1.3 Princípio 3: Síntese de Produtos Menos Perigosos	66
4.1.4 Princípio 4: Desenvolvimento de Produtos Químicos mais Seguros.....	69
4.1.5 Princípio 5: Diminuição do Uso de Solventes e Auxiliares	73
4.1.6 Princípio 6: Eficiência Energética.....	73
4.1.7 Princípio 7: Uso de Matéria-prima Renovável.....	75
4.1.8 Princípio 8: Redução do Uso de Derivados.....	76
4.1.9 Princípio 9: Catálise	77
4.1.10 Princípio 10: Desenvolvimento de Compostos Degradáveis.....	77
4.1.11 Princípio 11: Análise em Tempo Real para Prevenção da Poluição	79
4.1.12 Princípio 12: Química Inerentemente mais Segura para a Prevenção de Acidentes	80
4.2 INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE – ISS.....	82
4.2.1 Indicadores de Sustentabilidade de Entrada – ISEs.....	82
4.2.1.1 Taxa de Fonte de Carbono Utilizada	82
4.2.1.2 Consumo Específico de Matéria-Prima	83

4.2.1.3 Consumo de Energia	84
4.2.2 Indicadores de Sustentabilidade de Saída – ISSs.....	85
4.2.2.1 Taxa Total de Gases Emitidos	85
4.2.2.2 Taxa de Emissão de Óxidos de Carbono (CO e CO ₂).....	86
4.2.2.3 Quantidade de Resíduos Sólidos Produzidos	87
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	89
5. CONCLUSÃO	105
6. REFERÊNCIAS	108
PRODUÇÃO TÉCNICA E CIENTÍFICA.....	117
ANEXO	118

1. INTRODUÇÃO

A sustentabilidade é tema cada vez mais recorrente de discussões nacionais e internacionais. Contudo, na busca por elevados índices de crescimento econômico, os impactos ambientais e sociais são colocados em segundo plano por muitas empresas e organizações. O desenvolvimento sustentável, no entanto, preza justamente pelo equilíbrio entre esses três aspectos – social, ambiental e econômico.

A busca pela sustentabilidade vai muito além de preocupações relativas apenas com o meio ambiente. Segundo Ferreira *et al.* (2014), ela deveria ser considerada como um grande guarda-chuva de proteção à sociedade, sendo uma cadeia de ações que eleva os padrões ambientais, econômicos e sociopolíticos da população.

De acordo com Kuhlman e Farrington (2010), a sustentabilidade como um conceito político tem a sua origem no Relatório *Brundtland*, documento este que se preocupava, por um lado, com a tensão entre as aspirações da humanidade para uma vida melhor e, por outro, as limitações impostas pela natureza. No decorrer do tempo, esse conceito foi reinterpretado e passou a abranger as três dimensões: social, ambiental e econômica.

O Relatório *Brundtland*, também conhecido como “Nosso Futuro Comum”, traz a seguinte a definição de desenvolvimento sustentável:

“aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade de gerações futuras atenderem as suas próprias necessidades. Em essência, o desenvolvimento sustentável é um processo de transformação no qual a exploração dos recursos, a direção dos investimentos, a orientação do desenvolvimento tecnológico e a mudança institucional se harmonizam e reforçam o potencial presente e futuro, a fim de atender às necessidades e aspirações humanas.” (CMMAD, 1991).

O desafio da humanidade, portanto, é aliar esses três princípios da sustentabilidade, sem favorecer um em detrimento do outro, de forma a buscar o desenvolvimento sustentável em qualquer produto ou processo que se deseja estabelecer.

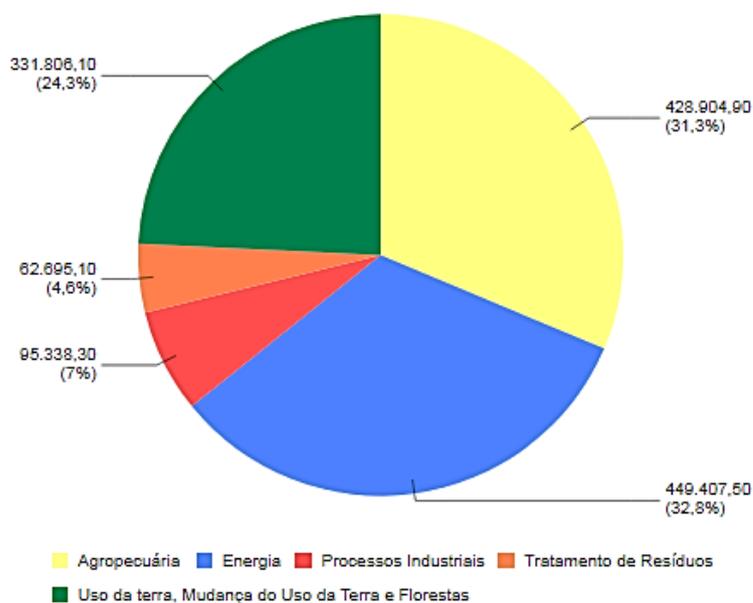
Com o propósito de minimizar ou evitar os riscos adversos à sustentabilidade, no início de 1990 foi criado o conceito de Química Verde (QV) pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América (EPA, do inglês *Environmental Protection Agency*), para propiciar processos químicos industriais baseados em transformações limpas e seguras (MESTRES, 2013).

A diligência por processos mais verdes e sustentáveis coloca empresas que têm responsabilidade socioambiental em constante *trade off* (conflito) entre a minimização dos impactos socioambientais e a lucratividade da organização. A ocorrência de catástrofes, como o rompimento de barragens no estado de Minas Gerais (Mariana, da mineradora Samarco, em 2015, e Brumadinho, da mineradora Vale, em 2019), alertam ainda mais sobre o comprometimento que as empresas devem ter frente às suas atividades produtivas e a necessidade de se buscar um desenvolvimento mais verde e sustentável, alicerçado não apenas no aspecto econômico, mas também no ambiental e social.

Devido à constatação do elevado nível de problemas de natureza organizacional, responsável pelo estado geral de abandono de milhares de barragens do país, com vulnerabilidades iminentes em projetos, construção e operação de estruturas já existentes, foi aprovado, em 20 de setembro de 2010, a Lei nº 12.334/2010, que criou o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) e estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) (NEVES, 2018). A PNSB é destinada à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais (BRASIL, 2010a). Além disso, para complementação à lei para sua efetiva aplicabilidade, foi publicado em 19 de maio de 2017, pela Agência Nacional de Mineração (ANM), a Portaria ANM nº 70.389, que criou o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração e dispôs sobre o Plano de Segurança, Revisão Periódica de Segurança e Inspeções Regulares e Especiais de Segurança das Barragens de Mineração e o Plano de Ações de Emergência para Barragens de Mineração – PAEBM (NEVES, 2018).

Outro fator ambiental, igualmente preocupante, está relacionado à emissão de gases do efeito estufa (GEEs). A Figura 1 apresenta a participação de emissões de gases por setor brasileiro.

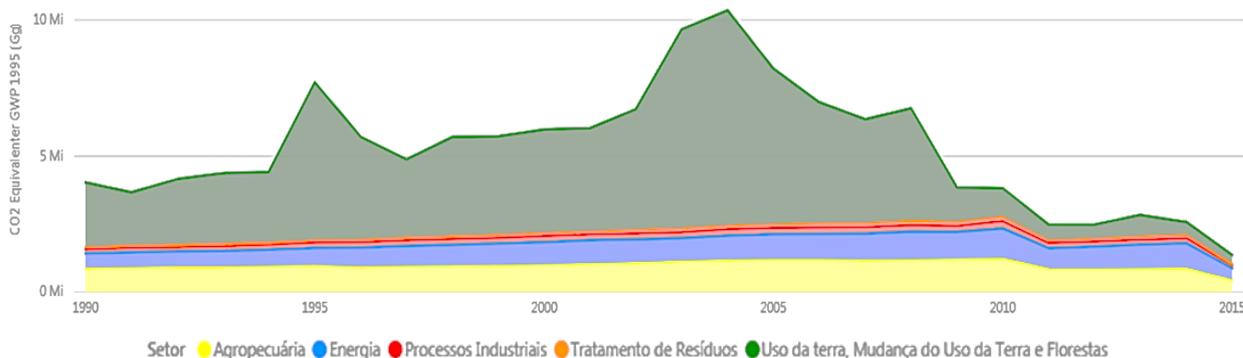
Figura 1: Participação de emissões de gases por setor



Fonte: SIRENE (2020)

De acordo com a Figura 1, em 2015 os setores que mais emitiram GEEs eram o de energia (32,8%), o agropecuário (31,2%) e o uso da terra, mudança do uso da terra e florestas (24,3%). O setor de processos industriais ocupava a quarta posição, representando 7% do total (SIRENE, 2020). No entanto, segundo dados apresentados pelo Sistema de Registro Nacional de Emissões (SIRENE, 2020), as emissões por setor variam ao longo dos anos, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2: Emissões em dióxido de carbono equivalente por setor



Fonte: SIRENE (2020)

Embora o SIRENE tenha fornecido os dados até 2015, sua última atualização foi realizada no presente ano. Em 2018, segundo o relatório-síntese (SEEG, 2019), o Brasil emitiu 1,939 bilhão de toneladas brutas de gases do efeito estufa (medidas em gás carbônico equivalente), representando um valor 0,3% maior que o verificado pelo SEEG em 2017, sendo a mudança de uso da terra o principal setor emissor, com 44% do total (845 Mt CO₂e), devido ao desmatamento na Amazônia e no Cerrado; seguido dos setores de agropecuária e energia, com 25% (845 Mt CO₂e) e 23% (408 Mt CO₂e), respectivamente.

O Brasil é, atualmente, o sétimo maior emissor de GEEs do mundo, respondendo por 2,9% das emissões globais. A trajetória de emissões brasileiras é peculiar porque há períodos de queda e subida proporcionados, em especial, pelas variações nas taxas de desmatamento; enquanto no restante do planeta o setor de energia é o que provoca uma tendência geral de aumento nas emissões (SEEG, 2019).

A fim de firmar o compromisso com a redução das emissões de GEEs e, assim, limitar o aumento da temperatura global a um máximo de 2°C até o final do século, em dezembro de 2015 ocorreu em Paris a 21ª Conferência das Partes (COP 21), encontro promovido pela ONU (Organização das Nações Unidas) e aprovado por 195 Partes (Estados) da UFCCC (Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas; em inglês, *United Nations Framework Convention on Climate Change*) (MMA, 2020a; OECO, 2015).

Antes de acontecer a COP 21, os países concordaram em delinear antecipadamente e publicamente suas medidas de contribuição por meio das INDCs, Contribuições Pretendidas, Determinadas em Nível Nacional (em inglês, *Intended Nationally Determined Contributions*). As INDCs refletem as ambições de cada país em relação às suas pretensões de redução de emissões domésticas, com metas quantificáveis e parâmetros que permitam posterior comparação das diferentes contribuições (OECO, 2015). Após a realização do evento, os países oficializaram os compromissos e as INDCs passaram a se tornar NDCs (Contribuições Nacionalmente Determinadas), deixando, portanto, de ser pretendida (perdendo a letra “i” – do inglês *intended* – da sigla). Nas NDCs brasileiras, aprovada pelo Congresso Nacional em setembro de 2016, o país se comprometeu a promover, até 2025, uma redução nas emissões de GEEs em 37% abaixo dos níveis emitidos em 2005, com uma contribuição

indicativa subsequente de reduzir esses lançamentos em 43%, também em relação ao ano de 2005, até 2030 (MMA, 2020).

De acordo com o documento de análise (SEEG, 2018), 27% das emissões do setor industrial brasileiro, em 2016, eram representadas pela produção de ferro-gusa e aço. Consoante Anuário Estatístico do Setor Metalúrgico (MME, 2019a), a produção mundial de aço bruto, em 2018, foi de 1,809 bilhão de toneladas, sendo a China responsável por 928,3 milhões de toneladas (mantendo sua hegemonia na produção) e o Brasil respondendo por 35,4 Mt, colocando-se na nona posição do *ranking* mundial.

Segundo a associação World Steel (2020), o aço é o material de engenharia e construção mais importante do mundo; utilizado desde produtos de construção e automóveis, a geladeiras, máquinas de lavar, navios cargueiros e bisturis cirúrgicos. Formado por uma liga de ferro e carbono, o aço contém menos de 2% de carbono, 1% de manganês e pequenas quantidades de silício, fósforo, enxofre e oxigênio. Conforme ainda esta organização, cerca de 75% do aço produzido é por meio da rota do alto-forno – forno básico de oxigênio (BF-BOF, em inglês *blast furnace-basic oxygen furnace*), onde, primeiramente, os minérios de ferro são reduzidos a ferro, também denominados de metais quentes ou ferro-gusa.

O ferro-gusa é uma liga de minério de ferro e carvão (vegetal ou mineral), composta de pelo menos 92% de ferro e 3,5% a 4,5% de carbono (IIMA, 2019). De acordo com o Anuário Estatístico de 2019 (SINDIFER, 2019), o Brasil produziu 32.522.480 toneladas deste insumo siderúrgico em 2018, sendo 87,4% provenientes de usinas integradas e 12,6% de usinas independentes, conforme representado no Quadro 1. Os principais destinos de exportação brasileira do gusa são Estados Unidos (38,5%), Países Baixos (16,2%) e Itália (9,9%) (AÇO BRASIL, 2019). O Brasil é o sexto produtor mundial de gusa, ficando atrás da China, Japão, Índia, Rússia e Coreia do Sul (WORLDSTEEL, 2019).

Quadro 1: Produção de ferro-gusa no Brasil

ANO	USINAS INTEGRADAS								US INDEPENDENTES		TOTAL
	Coque	% a	% b	Carvão Vegetal	% c	% d	Total Integradas	% e	Carvão Vegetal	% f	
2007	23.962.642	92,4%	67,4%	1.980.150	7,6%	5,6%	25.942.792	73,0%	9.628.059	27,0%	35.570.851
2008	24.380.975	91,9%	69,9%	2.148.466	8,1%	6,2%	26.529.441	76,1%	8.341.967	23,9%	34.871.408
2009	18.995.360	91,0%	75,2%	1.867.000	9,0%	7,4%	20.862.360	82,6%	4.404.100	17,4%	25.266.460
2010	23.702.000	91,7%	76,8%	2.135.360	8,3%	6,9%	25.837.360	83,7%	5.027.388	16,3%	30.864.748
2011	25.334.200	91,8%	75,8%	2.256.500	8,2%	6,8%	27.590.700	82,6%	5.824.004	17,4%	33.414.704
2012	24.482.000	91,3%	75,7%	2.318.790	8,6%	7,2%	26.800.790	82,8%	5.548.051	17,2%	32.348.841
2013	23.923.456	91,3%	75,8%	2.283.244	8,7%	7,2%	26.206.700	83,0%	5.352.074	16,9%	31.558.774
2014	24.599.200	91,4%	77,0%	2.313.692	8,6%	7,2%	26.912.892	84,2%	5.035.952	15,8%	31.948.844
2015	25.592.800	92,0%	79,7%	2.210.600	8,0%	6,9%	27.803.400	86,6%	4.306.998	13,4%	32.110.398
2016	23.880.308	91,7%	80,7%	2.155.592	8,3%	7,3%	26.035.900	88,0%	3.551.290	12,0%	29.587.190
2017	25.891.186	91,4%	80,5%	2.440.214	8,6%	7,6%	28.331.400	88,1%	3.819.653	11,9%	32.151.053
2018	25.959.740	91,4%	79,8%	2.453.260	8,6%	7,5%	28.413.000	87,4%	4.109.480	12,6%	32.522.480

Nota: % a – Percentagem das integradas a coque sobre o total de produção das usinas integradas; % b – Percentagem da produção das integradas a coque sobre o total da produção de ferro-gusa; % c – Percentagem da produção das usinas integradas a carvão vegetal sobre a produção total das integradas; % d – Percentagem da produção das usinas integradas a carvão vegetal sobre a produção total ferro-gusa; % e – Percentagem da produção das usinas integradas sobre a produção total de ferro-gusa; % f – Percentagem da produção das usinas independentes sobre a produção total ferro-gusa; US – Usinas Siderúrgicas.

Fonte: SINDIFER (2019)

De acordo com o Quadro 1, dos 87,4% de produção de ferro-gusa advindos das usinas integradas, 91,4% delas utilizam o coque como fonte carbonífera. O coque é derivado de carvão mineral que possui propriedades coqueificantes, ou seja, quando aquecido em ausência de ar, ele deve amolecer, inchar, aglomerar e, por fim, solidificar formando um sólido poroso e rico em carbono com alta resistência mecânica (BRASIL, 2010b).

Segundo o Boletim do setor Mineral (MME, 2019b), o carvão mineral existente no território brasileiro é considerado de qualidade média a baixa porque possui um grande percentual de cinzas misturado à matéria carbonosa e baixo grau de carbonificação. Ainda de acordo com este boletim, a participação mundial do Brasil nas reservas de carvão é de 0,4%, sendo basicamente destinado ao uso energético, que admite todas as possibilidades de qualidade de carvão. Assim, como forma de atender

a demanda nacional da indústria siderúrgica, este insumo precisa ser importado de outros países.

Já em relação ao minério de ferro, que é a matéria-prima essencial da siderurgia, o Brasil encontra-se na segunda posição em termos de participação global de reservas minerais, detendo 16,8%, e também é o segundo maior produtor de ferro, responsável por 18,9% da oferta mundial (ANM, 2017). A produção bruta brasileira deste insumo possui um teor médio de ferro de 54,43%, sendo Minas Gerais, Pará, Mato Grosso do Sul, São Paulo, Maranhão, Bahia, Amazonas, Ceará e Rio Grande do Norte os principais produtores nesta ordem. Com relação à produção beneficiada, o teor médio de ferro é de 63,72% e os principais estados produtores, em ordem decrescente, são Minas Gerais, Pará, Mato Grosso do Sul, São Paulo e Ceará (BRASIL, 2018).

No entanto, embora a mineração e siderurgia representem um crescimento econômico para o município, estado e país onde são praticadas, quando estas atividades não são realizadas de maneira adequada, podem acarretar sérios danos ambientais no solo, rios e lençóis freáticos, bem como poluição atmosférica e proporcionar interferências negativas à comunidade local (BOMFIM, 2017).

A Resolução CONAMA de 1986, em seu Art. 1º, estabelece a definição de impacto ambiental como:

“qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam:

I - a saúde, a segurança e o bem-estar da população;

II - as atividades sociais e econômicas;

III - a biota;

IV - as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente;

V - a qualidade dos recursos ambientais.”

Portanto, as atividades mineradoras e siderúrgicas são consideradas de relevante impacto ambiental, visto que afetam, direta e indiretamente, as cinco esferas supracitadas na resolução referida.

Assim, a busca por processos e produtos mais sustentáveis traz à tona a necessidade de metodologias e métricas eficientes, de fácil aplicabilidade e compreensão. Diante deste contexto, este trabalho tem como objetivo desenvolver um procedimento para análise do impacto ambiental de processos químicos e/ou bioquímicos com base nos Princípios da Química Verde (PQVs) e nos Indicadores de Sustentabilidade (ISs). Para tanto, a metodologia proposta foi implementada em um programa computacional (Microsoft Excel®) capaz de identificar e comparar, automaticamente, impactos em processos de produção diferentes, orientando para um *design* de produto ou processo mais verde e sustentável. Embora possa ser utilizada em qualquer processo produtivo, a metodologia foi diretamente aplicada na avaliação do impacto ambiental de duas rotas de produção de ferro-gusa, de modo a apontar aquela considerada mais verde e sustentável. Desta forma, como objetivos específicos deste trabalho, têm-se:

- Estabelecer métricas com base nos 12 Princípios da Química Verde e Indicadores de Sustentabilidade;
- Desenvolver um programa computacional para avaliação de impacto ambiental por meio do procedimento proposto;
- Avaliar a viabilidade técnica e ambiental dos processos de produção do ferro-gusa;
- Propor diretrizes para um processo de produção de ferro-gusa mais verde e sustentável.

Para atender a estes objetivos, além do Capítulo 1 supradescrito, este estudo está estruturado com base nos Capítulos 2, 3, 4, 5 e 6.

O Capítulo 2 refere-se à revisão bibliográfica sobre Química Verde e Sustentabilidade, onde é apresentado um breve histórico sobre estes tópicos e a relação dos ODS (Objetivos de Desenvolvimento Sustentável) com o tema deste estudo. Neste item são abordados também a distinção entre metalurgia e siderurgia, bem como os

tipos de redução de ferro existentes (redução direta, indireta e autorredução) e a aplicação da QV e ISs em processos produtivos.

No Capítulo 3 é descrita a metodologia desenvolvida por este trabalho, baseada nos ISs e PQVs; são apresentados os procedimentos de cálculos envolvidos e os estudos de caso em que a metodologia foi aplicada.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos após a aplicação da metodologia proposta para cada estudo de caso analisado e discutidas as lacunas e oportunidades de melhorias que podem ser realizadas em seus processos produtivos.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões deste estudo, bem como as recomendações de pesquisas para trabalhos futuros.

O Capítulo 6 encerra este trabalho apresentando as referências bibliográficas consultadas neste estudo.

2. SUSTENTABILIDADE, QUÍMICA VERDE E SIDERURGIA: CONCEITOS E DESAFIOS PARA O SÉCULO XXI

Este capítulo apresenta uma breve revisão bibliográfica sobre QV, IS, os principais marcos da sustentabilidade ocorridos nos séculos XX e XXI, os ODS referentes ao tema deste trabalho, as tecnologias de ferro existentes e estudos relacionados à aplicação da QV e IS em processos produtivos.

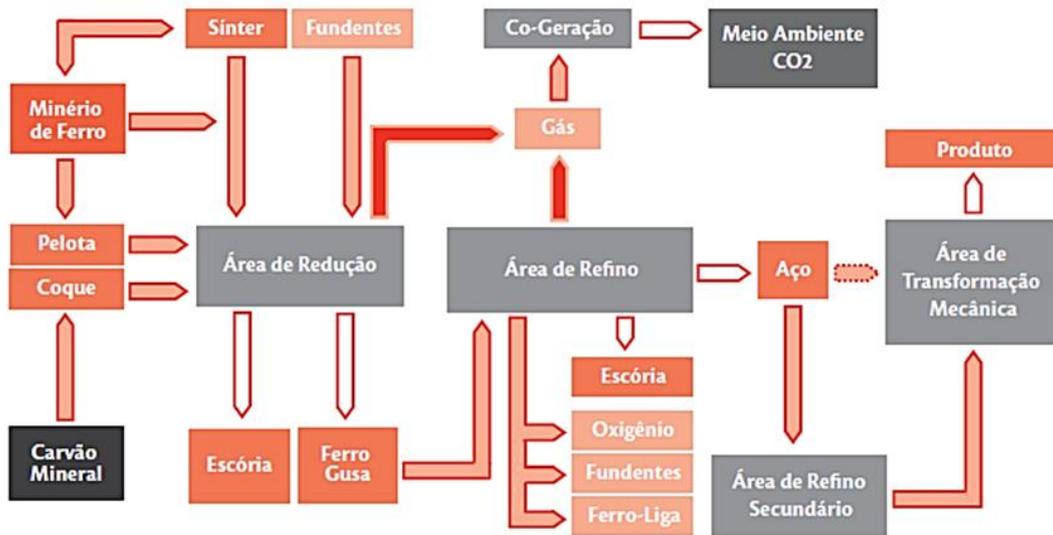
2.1 A METALURGIA DO FERRO

A ciência e a tecnologia de extração de metais, a partir de seus respectivos minérios, transformando-os e usando-os industrialmente é denominada de metalurgia. Quando esta se trata, em particular, do ferro, é nomeada de siderurgia. A metalurgia do ferro caracteriza-se, basicamente, pela redução dos seus óxidos através de um agente redutor que, em geral, é um combustível carbonoso (SILVA, 2011).

As duas rotas predominantes na indústria siderúrgica mundial são as usinas integradas a coque e as usinas semi-integradas. Na primeira, conforme apresentado na Figura 3, há uma única unidade industrial, onde encontram-se as áreas de transformações do minério de ferro e do aço. Desta forma, a partir do minério de ferro (ou de seus produtos: sinteres, pelotas e briquetes), coque e fundentes, chega-se ao ferro-gusa, que é convertido em aço posteriormente. Após a transformação mecânica (laminação), este aço é comercializado no mercado sob a forma de produtos planos (chapas e bobinas) e longos (vergalhões, barras e perfis) (BRASIL, 2010b). Uma usina integrada a coque, portanto, é composta tipicamente de três etapas (BRASIL, 2010b):

- Redução (cujo objetivo é a fabricação do ferro-gusa);
- Refino (produção e resfriamento do aço);
- Transformação mecânica (produtos siderúrgicos destinados à comercialização).

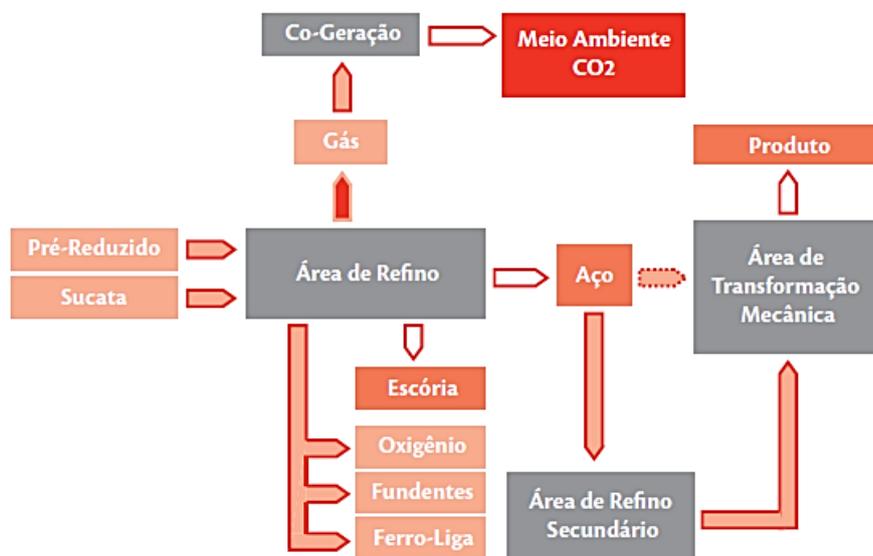
Figura 3: Usinas integradas a coque



Fonte: BRASIL (2010b)

Nas usinas semi-integradas, no entanto, não há a etapa de redução. Conforme a Figura 4, elas compreendem apenas as áreas de refino e transformação mecânica. Chamadas usualmente de *minimills*, por se tratarem de um processo mais compacto, essas usinas são alimentadas, principalmente, com sucata ferrosa e, em menor intensidade, com ferro-gusa e pré-reduzidos (ferro diretamente reduzido, do inglês *direct reduced iron*, DRI; e ferro briquetado a quente, do inglês *hot briquetted iron*, HBI) (BRASIL, 2010b).

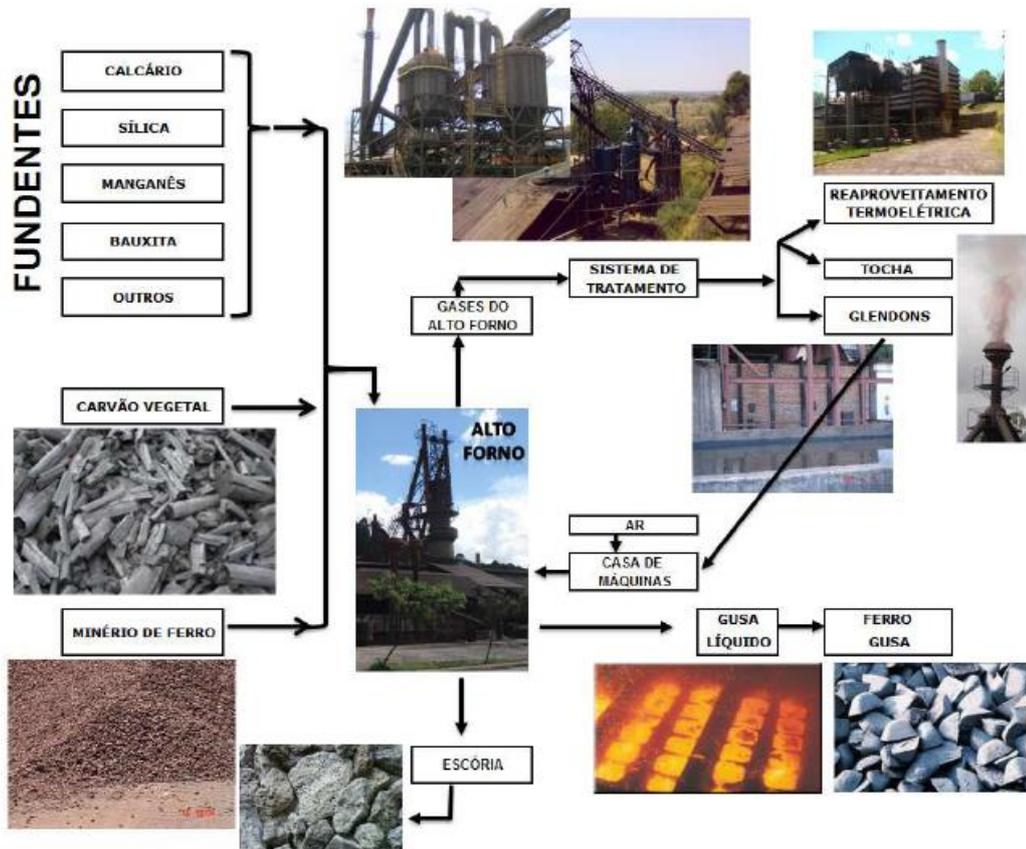
Figura 4: Usinas semi-integradas



Fonte: BRASIL (2010b)

Existem ainda as unidades produtoras denominadas de não-integradas, representadas na Figura 5, que realizam apenas uma fase do processo: processamento (laminação ou trefilas, para o caso da fabricação de aço) ou redução (MCDIC, 2020).

Figura 5: Usinas não integradas



Fonte: Chaves (2013)

Nestas usinas não integradas, a produção do ferro-gusa é a partir da redução do minério de ferro em alto-forno e o produto pode ser conduzido às fundições ou às aciarias, que são unidades destinadas à produção de aço em forma de produtos semiacabados (tarugos, lingotes, placas, etc) (MALARD, 2009; SILVA, 2011).

2.2 TECNOLOGIAS DE PRODUÇÃO DE FERRO

As tecnologias de produção de ferro podem ser divididas de acordo com o tipo de estado do produto (CALDERON, 2016):

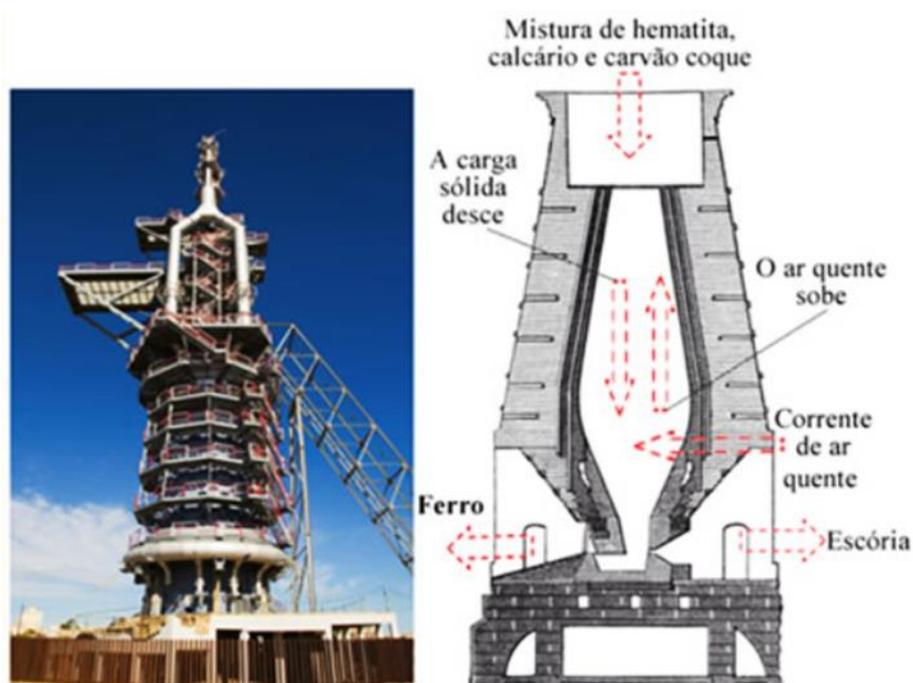
- Ferro-gusa: quando o produto é líquido, a exemplo de processos como Alto-forno, COREX, RHF (forno de soleira rotativa, em inglês, *Rotary Hearth Furnace*), TecnoRed e HISmelt;
- Ferro esponja: quando o produto é sólido, a exemplo de processos como MIDREX, HyL e Rotary Kiln.

Os processos de redução de óxidos de ferro a ferro metálico podem ser divididos ainda conforme o tipo de redução empregada: reduções indiretas (Alto-forno), reduções diretas (MIDREX) e autorredução (TecnoRed).

2.2.1 Redução Indireta – Alto-forno

O alto-forno é um reator em contracorrente, que produz ferro-gusa por meio das reações de redução e fusão dos minérios de ferro (SILVA, 2011; CALDEIRON 2016). Conforme representado na Figura 6, as matérias-primas (minério de ferro, pelotas, briquetes, sinter, coque ou carvão de madeira e fundentes – calcário) são alimentadas de forma alternada no topo do reator e, à medida que descem em contracorrente em relação aos gases provenientes da queima do carbono com o oxigênio do ar aquecido soprado pelas ventaneiras, a transformação em gusa é processada (SILVA, 2011).

Figura 6: Processo de redução em alto-forno



Fonte: Fogaça (2020)

Em geral, os altos-fornos têm um formato cônico de vários diâmetros com cerca de 30 metros de altura; são construídos de tijolos refratários, sobre fundações e reforçados por uma carcaça metálica externa de aço (SILVA, 2011).

De acordo com Silva (2016), são diversas as reações que ocorrem dentro do alto-forno; no entanto, as fundamentais para compreensão de seu funcionamento e que são responsáveis pela redução da carga metálica são processadas nas seguintes regiões:

- **Zona de redução indireta:** onde ocorre as primeiras reações químicas, sob temperaturas inferiores a 900°C. Conforme representado nas Equações 1 e 2, respectivamente, o gás ascendente (CO) transforma a hematita (Fe₂O₃) em magnetita (Fe₃O₄) e, em seguida, transforma esta em wustita ("FeO").



- **Zona de redução direta:** nesta região as reações ocorrem a temperaturas superiores a 1000°C. Conforme representado nas Equações 3 e 4, respectivamente, a wustita é transformada em ferro metálico (Fe) pelo gás redutor CO e o gás CO₂, produto da reação da zona de combustão, reage com o carbono do coque produzindo mais CO.



A Equação 3 é nomeada de reação indireta pelo carbono e a Equação 5, de redução direta pelo carbono. A Equação 4 representa a reação de gaseificação do carbono, também conhecida como reação de *Boudouard* (NOLDIN JR, 2002).

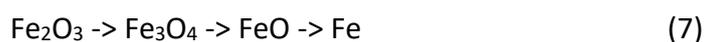
- **Zona de combustão:** onde a temperatura dominante é da ordem de 2200°C. Nesta região ocorrem também a reação de *Boudouard* (Equação 4) e as reações químicas entre o oxigênio do ar soprado e o carbono presente no carvão e no coque que se encontram próximos às ventaneiras do forno, de acordo com a Equação 6.



Existe também a zona de preaquecimento, que se localiza na parte superior do forno (acima da zona de redução indireta), mas nela não ocorrem reações químicas, há apenas a evaporação da umidade da carga (SILVA, 2016).

2.2.2 Redução Direta – MIDREX

As reduções de óxidos de ferro a ferro metálico, representadas na Equação 7, também podem ocorrer pelo processo de redução direta, onde o produto é obtido por meio de um gás de redução (produzido a partir de carvão, gás natural e outros gases) e os óxidos são reduzidos em temperaturas abaixo do ponto de fusão (BITTENCOURT, 2016). Ou seja, diferentemente do processo em alto-forno, não há a fusão da carga metálica e o produto desta redução é chamado de ferro esponja, cujo objetivo é substituir o gusa sólido ou a sucata usados como matérias-primas na produção de aços (SILVA, 2011).



O produto da redução direta é conhecido também como DRI, do inglês *direct reduced iron*, que significa Ferro de Redução Direta (BITTENCOURT, 2016). O MIDREX é um exemplo de processo de redução direta, que converte o minério de ferro em ferro esponja, utilizando gás natural, por meio de um forno de cuba, cujo reator é dividido em zona de redução, zona de transição e zona de resfriamento (PACO, 2005).

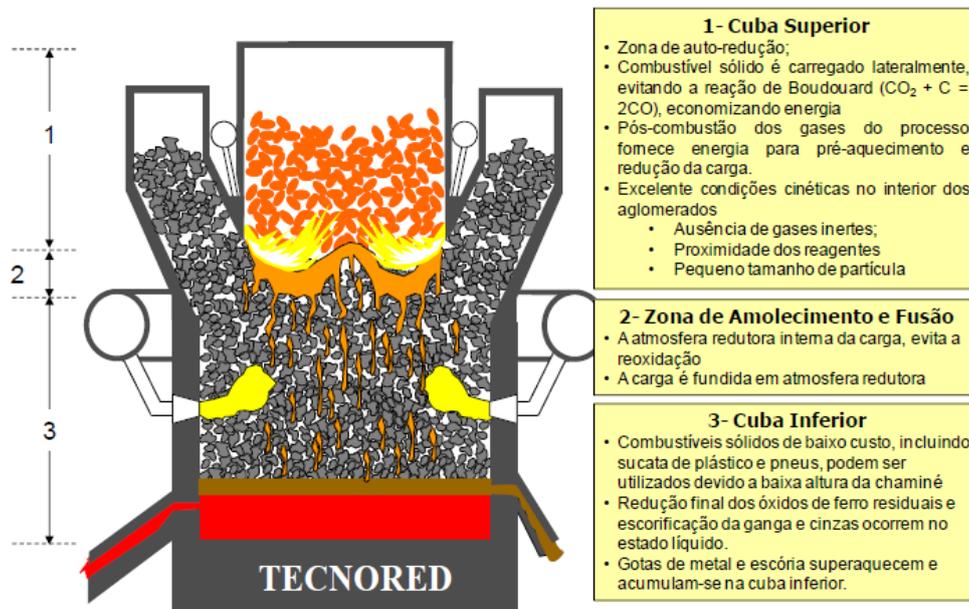
A alimentação deste processo é no topo do forno, onde os óxidos de ferro (na forma de pelota ou bitolado) descem por gravidade e são aquecidos em contracorrente pelos gases redutores, que adentram a uma temperatura de 760°C a 930°C. Após a reação dos óxidos com esta mistura redutora, há a formação do ferro metálico e liberação de H₂O e CO₂. Os gases de saída do topo (370°C a 480°C) são reciclados e misturados com gás natural rico, a fim de maximizar a eficiência do reformador (local onde os gases são aquecidos e reformados utilizando um catalisador). Posteriormente, estes gases reformados (contendo de 90% a 92% de H₂ e CO) são reaproveitados como gases redutores e alimentados diretamente na parte intermediária do forno (PACO, 2005).

2.2.3 Autorredução – TecnoRed

Outra forma de obtenção de ferro metálico é a partir do processo de autorredução, que se caracteriza por rápidas reações químicas que ocorrem por meio do contato íntimo dos reagentes (partículas finas de óxidos de ferro e carbono) em um ambiente livre da interferência de gases inertes (NOLDIN JR *et al.*, 2007). Estes reagentes constituem os denominados aglomerados autorredutores, assim nomeados por apresentarem em sua composição tanto a fonte de ferro, quanto a fonte de carbono, diferenciando-se, desta forma, dos processos tradicionais. Além disto, estes aglomerados apresentam menores exigências de resistência mecânica que os utilizados em processos clássicos e, por possuírem elevadas quantidades de carbono em sua estrutura, são produzidos a temperaturas ambiente ou moderadas (<500°C), sob o risco de queimar o carbono presente caso alcancem elevadas temperaturas (NOLDIN JR, 2007).

Um dos processos que utilizam aglomerados autorredutores (na forma de pelotas ou briquetes) é a TecnoRed, tecnologia brasileira, que se destaca por sua geometria inovadora (projeto de conceito modular, cuja finalidade é ser facilmente implementado em etapas, de acordo com as demandas de mercado e estratégias individuais de cada empresa), por usar matérias-primas de baixo custo e pela capacidade de processar uma carga constituída de materiais classificados como resíduos de usinas siderúrgicas (NOLDIN JR, 2007). A Figura 7 representa a geometria do forno TecnoRed e suas principais regiões.

Figura 7: Principais regiões do forno TecnoRed



Fonte: Noldin Jr (2007)

De acordo com Noldin Jr (2007), o forno TecnoRed destaca-se dos demais processos por apresentar duas inovações principais:

- Ao invés da alimentação de combustível ser pela cuba central, o seu carregamento é feito via alimentadores laterais, diretamente na cuba inferior do reator. Desta forma, a reação de gaseificação do carbono (*solution loss* ou reação de *Boudouard*) na cuba superior é evitada e, assim, economiza-se energia;
- A fim de promover a pós combustão interna dos gases gerados na cuba inferior do reator, há injeção de sopro secundário, fornecendo, desta forma, a energia necessária para o preaquecimento e redução dos aglomerados autorredutores na cuba superior do forno.

2.3 A QUÍMICA VERDE E OS SEUS PRINCÍPIOS

O conceito de Química Verde foi criado no início de 1990, pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América, como uma abordagem e uma ferramenta conceitual para proteger o ambiente da poluição da indústria química. Expressa de forma sucinta e atraente por meio de 12 princípios, estabelecidos por Paul

Anastas e John Warner em 1998, a QV é considerada também uma filosofia resumida nesses princípios, representados na Figura 8, cujo objetivo é proporcionar processos químicos industriais baseados em transformações limpas e seguras (MESTRES, 2013).

Figura 8: 12 Princípios da Química Verde



Fonte: Autoria própria

Segundo a IUPAC (2019), 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 Eghbali (2009), 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 da engenharia molecular com o propósito de reduzir as consequências adversas à sustentabilidade. Por meio de um projeto adequado, é possível obter sinergias, e não apenas compensações. Os 12 Princípios da Química Verde são, portanto, “regras de *design*”, a fim de ajudar os

químicos e engenheiros 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 a engenharia de produtos e transformações químicas mais seguras (ANASTAS e EGHBALI, 2009).

Os maiores sucessos de aplicação dos princípios da QV foram nas indústrias de química fina e farmacêutica. Contudo, a demanda social por bens materiais é satisfeita por vários tipos de indústrias e setores, que podem ser identificados em quatro grupos: produção de energia (incluindo transporte), indústria química, cimento (e outros materiais de construção) e metalurgia. Há um quinto grupo, muito importante também, que inclui o amplo espectro de setores e atividades que utilizam produtos e materiais derivados da indústria química; dentre eles, estão a farmácia, agricultura, fibras e corantes têxteis, plásticos, pigmentos, solventes e papel (MESTRES, 2013).

O grande desafio, portanto, da Química Verde no século XXI é eliminar qualquer tipo de contaminação e risco devido a substâncias e transformações químicas, sobretudo nas indústrias e setores desses cinco grandes grupos que ainda não enxergam os 12 Princípios como uma ferramenta útil, que viabiliza o desenvolvimento de produtos e conversões químicas mais seguras, preza pela qualidade do meio ambiente e das condições de trabalho, bem como proporciona mudanças economicamente mais rentáveis aos processos industriais envolvidos.

2.4 SUSTENTABILIDADE

2.4.1 O Bem-estar Humano e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)

A sustentabilidade é a promoção do bem-estar social em equidade com seus três pilares: econômico, social e ambiental. Ser sustentável é atender às necessidades e permanecer em equilíbrio com estes três aspectos.

Prescott-Allen (1996) relata que pessoas e ecossistemas são igualmente importantes e a sustentabilidade é a combinação do bem-estar entre estas duas partes. Segundo o autor, uma sociedade só é sustentável quando as condições humanas e do ecossistema são satisfatórias ou melhoram. Se uma delas é insatisfatória ou piora, a sociedade é insustentável. Prescott-Allen (1996) ainda afirma que a condição de bem-estar do ecossistema é representada quando é mantida sua qualidade e diversidade e,

consequentemente, seu potencial para se adaptar às mudanças e fornecer uma gama de opções e oportunidades para o futuro. Já a condição de bem-estar humano, segundo ele, é alcançada quando todos os membros da sociedade são capazes de definir e atender às suas necessidades e têm uma grande variedade de opções e oportunidades para realizar seu potencial.

De acordo com Krajnc e Glavič (2003), alcançar o desenvolvimento sustentável exigirá mudanças nos processos industriais, na quantidade e tipo de recursos utilizados, no tratamento de resíduos gerados, no controle de emissões e nos produtos produzidos. Segundo ainda estes autores, as principais causas de danos ambientais são a produção e o consumo insustentáveis (especialmente em países industrializados) e determinar quais mudanças de direções levam ao desenvolvimento sustentável de uma empresa é uma das dificuldades em medir seu nível de sustentabilidade.

Krajnc e Glavič (2003) afirmam também que, no futuro, a sociedade precisará confiar no crescimento sustentável em vez do consumo destrutivo e, para atingir tal conquista, é necessário um repensar radical de muitas das práticas industriais, bem como mudança no desempenho relacionado ao meio ambiente, pois a melhoria contínua não é suficiente.

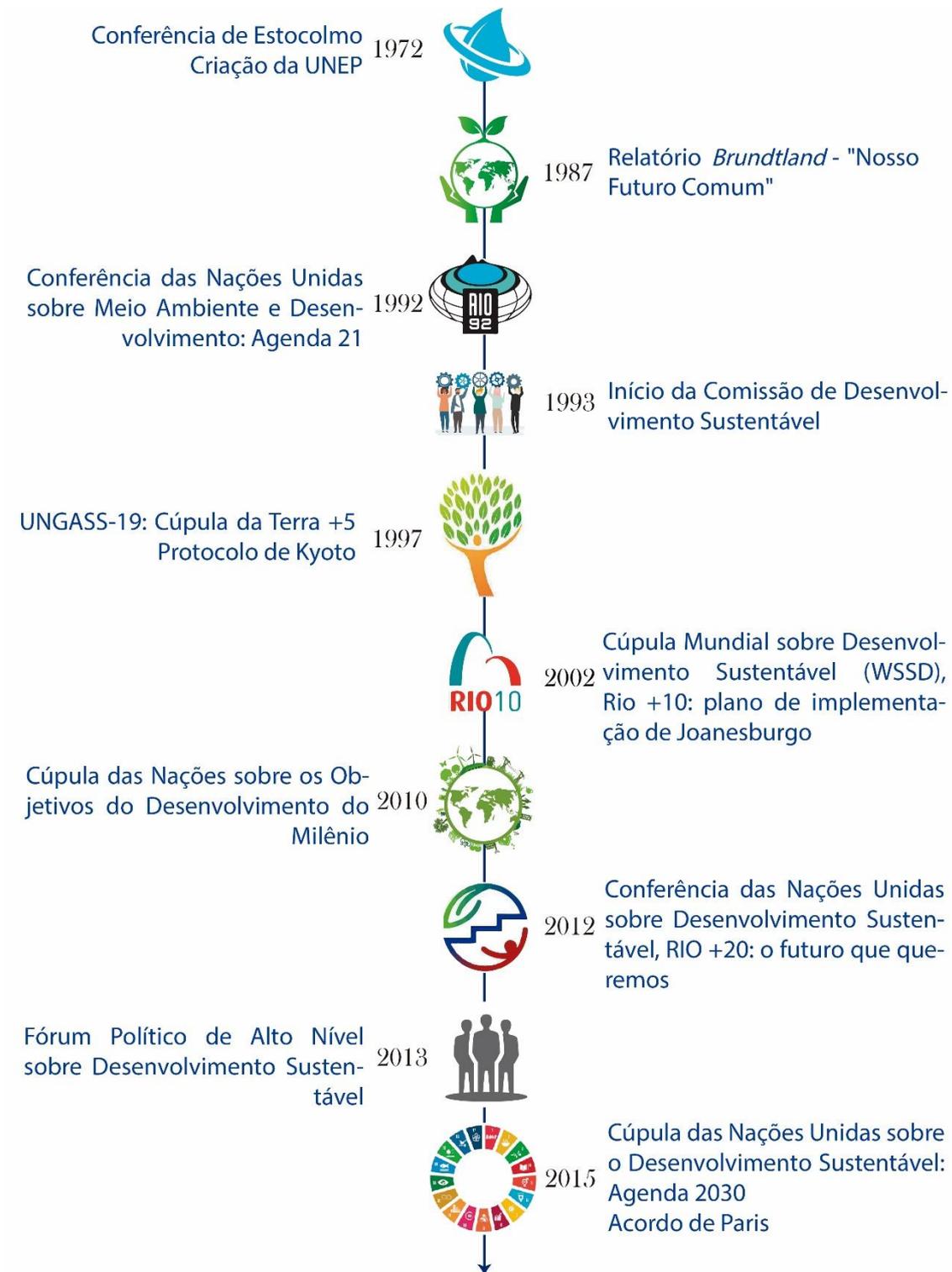
No entanto, a velocidade e o modo como são empregados essa melhoria contínua fazem a diferença nos processos. Caso esta velocidade seja demasiadamente lenta e a conscientização de mudança não atinja todos os níveis da empresa, por exemplo, essa alternância de paradigma não será alcançada. O repensar de melhores práticas relacionadas aos três pilares da sustentabilidade, aliados à melhoria contínua devem ser, portanto, objetivos de qualquer país, organização ou empresa que deseja tornar-se sustentável. Caso o mundo não consiga pôr em prática tais propostas, as consequências ambientais virão e acontecerão de forma ainda mais acelerada.

No início do século XXI, Krajnc e Glavič (2003) anunciaram em seus estudos que serão necessárias, em escala planetária, reduções na produção de material, bem como no uso de energia e na degradação ambiental de mais de 90% até 2040, a fim de atender equitativamente às necessidades de uma crescente população mundial dentro dos meios ecológicos do planeta. As preocupações com os impactos ambientais provenientes da ação do homem, no entanto, iniciaram muito antes do século XXI, apesar de terem ganhado mais relevância neste período.

De acordo com SDGs (2020), a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente, também conhecida como Conferência de Estocolmo, realizada em junho de 1972, é considerada a primeira grande conferência da ONU sobre questões internacionais relacionadas ao meio ambiente e marca uma virada no desenvolvimento de políticas ambientais internacionais.

Em seguida, com a adoção da Resolução 38/161, em 19 de dezembro de 1983, foi estabelecida uma comissão especial, mais tarde denominada de Comissão Mundial de Meio Ambiente e Desenvolvimento, cujo objetivo era trabalhar em um relatório sobre o meio ambiente e propostas de estratégias para o desenvolvimento sustentável. Neste documento, nomeado de Relatório *Brundtland*, foram discutidas as necessidades de integração do desenvolvimento econômico, gestão e proteção dos recursos naturais, equidade e inclusão social (SDGs, 2020). Assim como este relatório e a Conferência de Estocolmo, outros marcos relacionados à sustentabilidade ocorreram ao longo do final do século XX e início do XXI e estão representados na linha do tempo da Figura 9 e no Quadro 2 de informações.

Figura 9: Marcos da Sustentabilidade



Fonte: Autoria própria

Quadro 2: Descrição dos marcos da Sustentabilidade

Marco	Ano	Breve Descrição	Local
Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente - Conferência de Estocolmo; Criação do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP)	1972	Conferência de Estocolmo: considerada a primeira grande conferência da ONU sobre questões ambientais internacionais, ela marcou uma virada no desenvolvimento de políticas ambientais internacionais; UNEP: agência responsável pela coordenação das atividades ambientais da ONU, auxiliando os países em desenvolvimento na implementação de políticas e práticas ambientalmente saudáveis.	Estocolmo - SWE; Assembleia Geral da ONU
Relatório de <i>Brundtland</i> - "Nosso Futuro Comum"	1987	Relatório sobre meio ambiente e propostas de estratégias para o desenvolvimento sustentável, onde foram introduzidos questões como: necessidade de integração do desenvolvimento econômico, gestão e proteção dos recursos naturais e equidade e inclusão social.	Assembleia Geral da ONU
Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento: Agenda 21	1992	173 Chefes de Estado adotaram o programa de ação "Agenda 21", que contém: - Declaração do Rio sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento; - Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC); - Convenção sobre Diversidade Biológica (CDB); - A declaração de manejo florestal; - Criação da Comissão das Nações Unidas para o Desenvolvimento Sustentável (UNCSD).	Rio de Janeiro - BR
Início da Comissão de Desenvolvimento Sustentável (CSD)	1993	Considerada como o fórum de alto nível para o desenvolvimento sustentável dentro do Sistema das Nações Unidas, a Comissão foi projetada para acompanhar o progresso na implementação da Cúpula da Terra das Nações Unidas e o Plano de Implementação de Joanesburgo a nível internacional, regional e local.	Assembleia Geral da ONU
UNGASS -19: Cúpula da Terra +5, Protocolo de Kyoto	1997	"UNGASS -19: Cúpula da Terra +5": Sessão Especial da Assembleia Geral das Nações Unidas (UNGASS-19) para analisar e avaliar o progresso realizado na Agenda 21; Protocolo de Kyoto: tratado complementar à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, que define metas de redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE) para os países considerados responsáveis pela mudança atual do clima (os países desenvolvidos e os que, à época, apresentavam economia em transição para o capitalismo).	Assembleia Geral da ONU; Kyoto - JP
Cúpula Mundial sobre Desenvolvimento Sustentável (WSSD) Rio + 10: plano de implementação de Joanesburgo	2002	Encontro entre chefes de Estado e de Governo, delegados nacionais e líderes de organizações não-governamentais (ONGs), empresas e outros grandes grupos para focar a atenção no mundo e em ações diretas para enfrentar situações difíceis, incluindo melhorar a vida das pessoas e conservar recursos naturais com demandas cada vez mais crescentes.	Joanesburgo - RSA
Cúpula das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento do Milênio	2010	A Cúpula dos ODM de 2010 foi concluída com a adoção de um plano de ação global (Mantendo a Promessa: Unidos para Alcançar os Objetivos de Desenvolvimento do Milênio) e o anúncio de várias iniciativas contra a pobreza, a fome e as doenças.	Assembleia Geral da ONU
Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável, RIO +20: o futuro que queremos	2012	Deu origem a um documento de resultados políticos focado, que contém medidas claras e práticas para implementar o desenvolvimento sustentável.	Rio de Janeiro - BR
Fórum Político de Alto Nível sobre Desenvolvimento Sustentável	2013	Principal plataforma das Nações Unidas sobre desenvolvimento sustentável e tem um papel central no acompanhamento e na revisão da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável.	Assembleia Geral da ONU
Cúpula das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento Sustentável: Agenda 2030; Acordo de Paris	2015	"Cúpula das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento Sustentável: Agenda 2030": a agenda mundial estabelece 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), com suas respectivas metas, que são de natureza global e universalmente aplicáveis, levando em consideração diferentes realidades nacionais, capacidades e níveis de desenvolvimento e respeitando as políticas e prioridades nacionais. Acordo de Paris: acordo universal cujo objetivo é manter um aumento da temperatura global neste século bem abaixo de 2 graus Celsius e direcionar esforços para limitar o aumento da temperatura ainda mais a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais.	Nova York - EUA; Paris - FR

Fonte: Adaptado de SDGs (2020)

O Quadro 2 traz uma ideia geral sobre cada marco apresentado na Figura 9, bem como o ano e o local onde eles aconteceram. Com a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (também conhecida como Cúpula da Terra, Eco-92 ou Rio-92), realizada em 1992 no Rio de Janeiro, intensificou-se a busca de um novo caminho para o bem-estar humano, por meio do desenvolvimento sustentável. Adotada durante a conferência, a Agenda 21 (primeira carta de intenções cujo objetivo era promover, em escala global, um novo padrão de desenvolvimento para o século XXI), reconhece que o desenvolvimento econômico deve ser equilibrado com um crescimento que responda às necessidades das pessoas e proteja o meio ambiente (NAÇÕES UNIDAS, 2019; AGENDA 2030, 2020).

Baseado nos resultados da Cúpula Mundial sobre Desenvolvimento Sustentável em 2002 (Rio+10); da Cúpula de 2010 sobre os Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM) e da Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável em 2012 (Rio+20); foi proposto um grupo de trabalho aberto para elaborar uma nova agenda mundial para o desenvolvimento sustentável, a Agenda 2030, cujo objetivo era estabelecer um conjunto de metas de desenvolvimento sustentável para consideração e ação apropriada (NAÇÕES UNIDAS, 2019).

Diferentemente do processo de elaboração das ODM, os novos objetivos foram concebidos a muitas mãos, pois foi empreendido um amplo e inclusivo sistema de consulta sobre questões de interesse mundial. Desta forma, foram recebidas contribuições especializadas desde a sociedade civil, até a comunidade científica e Nações Unidas, uma vez que a finalidade era propiciar uma diversidade de experiências e perspectivas (AGENDA 2030, 2020).

Assim, em setembro de 2015, durante a Cúpula das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento Sustentável, foram estabelecidos os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, que compõem uma agenda mundial para a construção e implementação de políticas públicas, com a finalidade de guiar a humanidade até o ano de 2030 (EMBRAPA, 2019). Os 17 ODS representados na Figura 10, desdobram-se em 169 metas e neles estão previstas ações mundiais em áreas como energia, padrões sustentáveis de produção e de consumo, mudança do clima, cidades sustentáveis, crescimento econômico inclusivo e industrialização (ESTRATÉGIA ODS, 2019).

Figura 10: 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)



Fonte: MRE (2020a)

Dentre estes 17 ODS, sete deles relacionam-se diretamente com o tema deste estudo e estão ilustrados na Figura 11.

Figura 11: ODS relacionados ao tema deste estudo



Fonte: Adaptado de MRE (2020a)

Para os ODS 6, 7, 8, 9, 12, 13 e 15 foram identificadas as metas que justificam a relação de cada um deles com este estudo, conforme apresentado nos Quadros 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9, respectivamente.

Quadro 3: ODS 6

ODS 6: Assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todas e todos
6.3 Até 2030, melhorar a qualidade da água, reduzindo a poluição, eliminando despejo e minimizando a liberação de produtos químicos e materiais perigosos, reduzindo à metade a proporção de águas residuais não tratadas e aumentando substancialmente a reciclagem e reutilização segura globalmente
6.6 Até 2020, proteger e restaurar ecossistemas relacionados com a água, incluindo montanhas, florestas, zonas úmidas, rios, aquíferos e lagos

Fonte: Adaptado de Nações Unidas (2019)

Quadro 4: ODS 7

ODS 7: Assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todas e todos
7.2 Até 2030, aumentar substancialmente a participação de energias renováveis na matriz energética global
7.3 Até 2030, dobrar a taxa global de melhoria da eficiência energética
7.a Até 2030, reforçar a cooperação internacional para facilitar o acesso a pesquisa e tecnologias de energia limpa, incluindo energias renováveis, eficiência energética e tecnologias de combustíveis fósseis avançadas e mais limpas, e promover o investimento em infraestrutura de energia e em tecnologias de energia limpa
7.b Até 2030, expandir a infraestrutura e modernizar a tecnologia para o fornecimento de serviços de energia modernos e sustentáveis para todos nos países em desenvolvimento, particularmente nos países menos desenvolvidos, nos pequenos Estados insulares em desenvolvimento e nos países em desenvolvimento sem litoral, de acordo com seus respectivos

Fonte: Adaptado de Nações Unidas (2019)

Quadro 5: ODS 8

ODS 8: Promover o crescimento econômico sustentado, inclusivo e sustentável, emprego pleno e produtivo e trabalho decente para todas e todos
8.4 Melhorar progressivamente, até 2030, a eficiência dos recursos globais no consumo e na produção, e empenhar-se para dissociar o crescimento econômico da degradação ambiental, de acordo com o Plano Decenal de Programas sobre Produção e Consumo Sustentáveis, com os países desenvolvidos assumindo a liderança

Fonte: Adaptado de Nações Unidas (2019)

Quadro 6: ODS 9

ODS 9: Construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar a inovação
9.4 Até 2030, modernizar a infraestrutura e reabilitar as indústrias para torná-las sustentáveis, com eficiência aumentada no uso de recursos e maior adoção de tecnologias e processos industriais limpos e ambientalmente corretos; com todos os países atuando de acordo com suas respectivas capacidades
9.5 Fortalecer a pesquisa científica, melhorar as capacidades tecnológicas de setores industriais em todos os países, particularmente os países em desenvolvimento, inclusive, até 2030, incentivando a inovação e aumentando substancialmente o número de trabalhadores de pesquisa e desenvolvimento por milhão de pessoas e os gastos público e privado em pesquisa e desenvolvimento
9.b Apoiar o desenvolvimento tecnológico, a pesquisa e a inovação nacionais nos países em desenvolvimento, inclusive garantindo um ambiente político propício para, entre outras coisas, a diversificação industrial e a agregação de valor às <i>commodities</i>

Fonte: Adaptado de Nações Unidas (2019)

Quadro 7: ODS 12

ODS 9: Assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis
12.2 Até 2030, alcançar a gestão sustentável e o uso eficiente dos recursos naturais
12.4 Até 2020, alcançar o manejo ambientalmente saudável dos produtos químicos e todos os resíduos, ao longo de todo o ciclo de vida destes, de acordo com os marcos internacionais acordados, e reduzir significativamente a liberação destes para o ar, água e solo, para minimizar seus impactos negativos sobre a saúde humana e o meio ambiente
12.5 Até 2030, reduzir substancialmente a geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso
12.6 Incentivar as empresas, especialmente as empresas grandes e transnacionais, a adotar práticas sustentáveis e a integrar informações de sustentabilidade em seu ciclo de relatórios
12.8 Até 2030, garantir que as pessoas, em todos os lugares, tenham informação relevante e conscientização para o desenvolvimento sustentável e estilos de vida em harmonia com a natureza
12.a Apoiar países em desenvolvimento a fortalecer suas capacidades científicas e tecnológicas para mudar para padrões mais sustentáveis de produção e consumo
12.c Racionalizar subsídios ineficientes aos combustíveis fósseis, que encorajam o consumo exagerado, eliminando as distorções de mercado, de acordo com as circunstâncias nacionais, inclusive por meio da reestruturação fiscal e a eliminação gradual desses subsídios prejudiciais, caso existam, para refletir os seus impactos ambientais, tendo plenamente em conta as necessidades específicas e condições dos países em desenvolvimento e minimizando os possíveis impactos adversos sobre o seu desenvolvimento de uma forma que proteja os pobres e as comunidades afetadas

Fonte: Adaptado de Nações Unidas (2019)

Quadro 8: ODS 13

ODS 13: Tomar medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos (*)
13.3 Melhorar a educação, aumentar a conscientização e a capacidade humana e institucional sobre mitigação, adaptação, redução de impacto e alerta precoce da mudança do clima
<i>(*) Reconhecendo que a Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) é o fórum internacional intergovernamental primário para negociar a resposta global à mudança do clima</i>

Fonte: Adaptado de Nações Unidas (2019)

Quadro 9: ODS 15

ODS 15: Proteger, recuperar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres, gerir de forma sustentável as florestas, combater a desertificação, deter e reverter a degradação da terra e deter a perda de biodiversidade
15.1 Até 2020, assegurar a conservação, recuperação e uso sustentável de ecossistemas terrestres e de água doce interiores e seus serviços, em especial florestas, zonas úmidas, montanhas e terras áridas, em conformidade com as obrigações decorrentes dos acordos internacionais
15.2 Até 2020, promover a implementação da gestão sustentável de todos os tipos de florestas, deter o desmatamento, restaurar florestas degradadas e aumentar substancialmente o florestamento e o reflorestamento globalmente
15.3 Até 2030, combater a desertificação, restaurar a terra e o solo degradado, incluindo terrenos afetados pela desertificação, secas e inundações, e lutar para alcançar um mundo neutro em termos de degradação do solo
15.b Mobilizar recursos significativos de todas as fontes e em todos os níveis para financiar o manejo florestal sustentável e proporcionar incentivos adequados aos países em desenvolvimento para promover o manejo florestal sustentável, inclusive para a conservação e o reflorestamento

Fonte: Adaptado de Nações Unidas (2019)

Os ODS representam uma lista de tarefas a serem cumpridas pelos governos, sociedade civil, setor privado, academia, mídia e Nações Unidas, ou seja, por todas as partes envolvidas em busca de um 2030 sustentável. Estes objetivos têm o papel de estimular e apoiar ações relacionadas às áreas de crucial importância para a humanidade: pessoas, planeta, prosperidade, paz e parcerias – os denominados 5 P's da Agenda 2030 (PNUD, 2020; AGENDA 2030, 2020).

Atender a estas metas estabelecidas pela ONU é responsabilidade de cada país signatário ao documentado adotado (Transformando Nosso Mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável) em 2015. Os 7 ODS e suas respectivas metas

consideradas relevantes a este estudo foram descritos nos Quadros de 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9. Isto reflete a importância de pesquisas relacionadas a produção de metais, em especial, o ferro-gusa, e a necessidade de se buscar formas de metrificar os impactos ambientais associados a esses tipos de produção, bem como alternativas de processos projetados e/ou redesenhados de acordo com o tripé da sustentabilidade.

Para avaliar se os objetivos estão sendo atendidos, organizações, empresas e a academia fazem uso de indicadores, a fim de avaliar os cenários de estudos, realizar comparações entre o passado e o presente, bem como definir projeções futuras.

2.4.2. Indicadores de Sustentabilidade

Com a finalidade de que um produto e/ou um processo sejam sustentáveis, as empresas precisam minimizar todo tipo de desperdício, bem como o uso de recursos naturais, matérias-primas e energia associados ao seu desenvolvimento. Portanto, projetar, produzir, distribuir e descartar ou reciclar de maneira adequada, de forma que os níveis de recursos utilizados estejam, pelo menos, de acordo com sua capacidade estimada na Terra, viabiliza a redução dos impactos ambientais associados à produção (KRAJNC e GLAVIČ, 2003). A utilização dos PQVs contribuem, justamente, nesta perspectiva de engenharia de produtos e processos mais sustentáveis e os ISs auxiliam na verificação e acompanhamento dessas metas.

Conforme Krajnc e Glavič (2003), para saber se a meta de desenvolvimento sustentável está sendo cumprida, é preciso ser capaz de medir tal progresso. Por isso, segundo estes autores, a estratégia da sustentabilidade engloba indicadores, a fim de fornecer uma visão geral mensurável das tendências e envolver ações de todos os setores (em especial, os de sistemas industriais), visto que desempenham um papel significativo no cumprimento dos objetivos da sustentabilidade.

De acordo com Gallopín (1997), indicadores são elementos essenciais na avaliação geral do progresso em direção à sustentabilidade e sua função básica é auxiliar e melhorar políticas e tomada de decisões em diferentes níveis. Segundo o autor, o conceito de “ciclo de tomada de decisões” é, em especial, aplicável a nível nacional e internacional, e consiste no reconhecimento de diferentes fases do processo de tomada

de decisão, onde indicadores distintos podem ser necessários nas diferentes fases, bem como utilizados de formas distintas em cada uma delas.

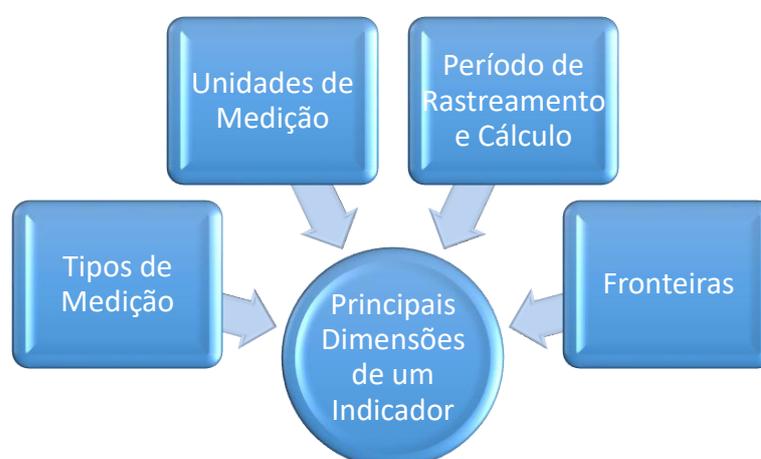
Gallopín (1997) ainda afirma que indicadores também são um meio de comunicação e um pré-requisito fundamental e, frequentemente, negligenciado para sua utilidade (e aceitação) é a maneira como são compreendidos, uma vez que, para que haja avanços em direção ao desenvolvimento sustentável, qualquer forma de comunicação requer discernimento por parte de todos os parceiros envolvidos.

Segundo Chalise (2014), um indicador ajuda a entender a posição em que a situação se encontra, para onde está indo e a que distância está de onde se deseja estar. Para esta autora, os indicadores de uma comunidade sustentável apontam para áreas em que as conexões entre economia, meio ambiente e sociedade são fracas, permitindo, desta forma, enxergar onde estão as situações problemáticas e auxiliar na orientação de caminhos para corrigi-las.

Portanto, indicadores facilitam a comparação e o acompanhamento das metas propostas. A partir deles, é possível entender melhor o cenário de determinado problema ou situação que se está analisando, bem como estimar quanto tempo é necessário para atingir a posição desejada. Para isto, é preciso que os indicadores sejam claros, transparentes e compreensíveis por todas as partes envolvidas.

Os indicadores também são representados por dimensões, conforme apresentado na Figura 12.

Figura 12: Principais dimensões de um indicador



Fonte: Adaptado de Krajnc e Glavič (2003)

Contudo, embora a maioria dos indicadores sejam quantitativos, existem também os indicadores qualitativos. De acordo com Gallopín (1997), sua utilização é preferida em pelo menos três casos:

- Quando a informação quantitativa não está disponível;
- Quando a propriedade de interesse é inerentemente não quantificável; e
- Quando as considerações de custo se tornam determinantes. Em alguns casos, as avaliações qualitativas podem ser traduzidas em notação quantitativa.

Com relação aos critérios de avaliação de sustentabilidade de uma empresa, consoante Krajnc e Glavič (2003), eles devem refletir seis aspectos: uso de recurso, produto, ambiental, social, qualidade e econômico. Segundo estes autores, determinar quais indicadores devem ser utilizados é muito difícil, pois além dos critérios de seleção estarem relacionados à escolha dos tomadores de decisão sobre o que medir, um mesmo indicador pode ser eficaz em uma empresa e ineficaz em outra. Desta forma, cada um deles deve ser considerado individualmente, a fim de refletir características específicas de empresas distintas.

Portanto, a escolha dos indicadores é subjetiva e deve refletir, de acordo com os tomadores de decisão, as medidas e objetivos que direcionam a empresa ao desenvolvimento sustentável.

Estudos relacionados a Indicadores de Sustentabilidade também não apontam a quantidade ideal de ISs que devem ser utilizados em uma avaliação. Estabelecer quais e quantos ISs devem ser usados depende de alguns fatores:

- Tipo de empresa analisada;
- Tipo de processo ou produto analisado;
- Experiência dos tomadores de decisões com esses tipos de análises;
- Grau de intimidade e conhecimento do produto ou processo que está sendo analisado.

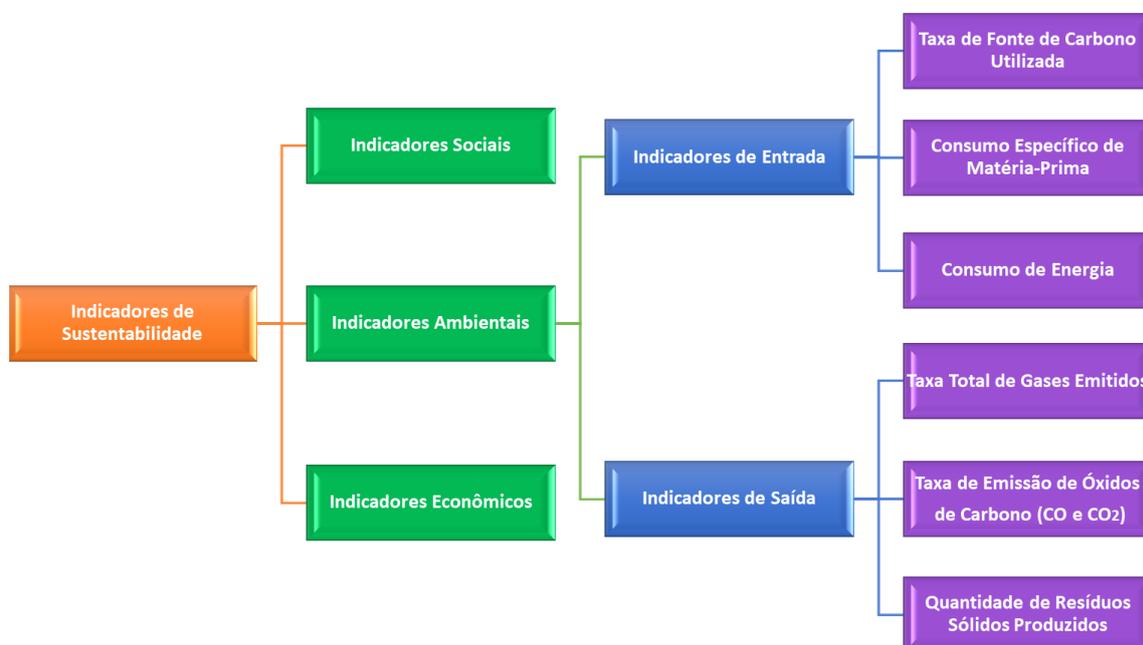
Long *et al.* (2016) afirmam que o conjunto de indicadores selecionados deve ser abrangente, porém parcimonioso, ou seja, deve focar e apoiar na avaliação de todos os principais aspectos sociais, econômicos e ambientais. Ainda assim, estes próprios autores relatam que não podem ter certeza da abrangência e parcimônia do conjunto

de indicadores estabelecidos e, para proporem o sistema de ISS adotado em seus estudos, utilizaram os seguintes critérios:

- Relevância (diretamente relacionado a um dos pilares da sustentabilidade e significativo para as empresas a serem analisadas);
- Acessibilidade (fácil coleta, disponíveis ao público);
- Mensurabilidade (simples medição de um indicador qualitativo ou, preferencialmente, quantitativo);
- Confiabilidade (confiáveis);
- Compreensibilidade (fácil interpretação pelas partes interessadas).

Para este trabalho, conforme apresentado na Figura 13, o aspecto ambiental foi definido como a fronteira do sistema, subdividido em indicadores de entrada (taxa de fonte de carbono utilizada, consumo específico de matéria-prima, consumo de energia) e saída (taxa total de gases emitidos, taxa de emissão de óxidos de carbono, quantidade de resíduos sólidos produzidos).

Figura 13: Indicadores de Sustentabilidade com enfoque no aspecto ambiental



Fonte: Autoria própria

Os indicadores utilizados foram escolhidos baseados nas pesquisas bibliográficas realizadas e na disponibilidade de dados existentes dos estudos de caso analisados. Embora os indicadores possuam a sua especificidade em cada processo ou produto analisado, buscou-se neste trabalho selecionar indicadores igualmente importantes para qualquer processo ou produto que venha a ser avaliado, a fim de que este trabalho sirva como suporte para estudos futuros em quaisquer que sejam as rotas analisadas.

Vale ressaltar também que, ainda que não se tenham englobados os aspectos sociais e econômicos, os indicadores utilizados neste trabalho (os indicadores ambientais) também são nomeados no decorrer deste estudo como indicadores de sustentabilidade, uma vez que fazem parte de um dos três pilares do desenvolvimento sustentável. Outro fator importante é que, conforme explicitado no trabalho de Krajnc e Glavič (2003), não se espera que somente com esses indicadores sejam alterados os padrões de produção atual; para isto, é necessário também o estímulo de várias partes, a saber, fornecedores, consumidores, funcionários, mídia, grupos de pressão, associações comerciais, reguladores nacionais e internacionais, entre outros.

Portanto, além de atuar nas três vertentes da sustentabilidade, estabelecer as metas, mensurá-las e acompanhar o seu desenvolvimento, é necessário também que haja uma mudança de *mindset* (mentalidade) em todas as partes envolvidas, seja na esfera organizacional, política, industrial, acadêmica e civil. Conforme afirma Chalise (2014), “Sustentabilidade significa mudança”, desafiando muitas das abordagens, práticas e atitudes que o ser humano (seja ele atuando como pessoa física ou jurídica) costuma exercer no dia-a-dia ao longo da vida.

2.5 QV E ISS: APLICAÇÕES EM PROCESSOS PRODUTIVOS

Por ser um conceito relativamente novo, a aplicação dos 12 PQVs ainda não se encontra completamente difundida. Além disso, embora apresente definições conceituais claras para cada princípio, não há, até o presente momento, uma forma universal de expressar quantitativamente tais princípios para todo e qualquer processo.

Losfeld *et al.* (2012) abordaram um método inovador para recuperação química de biomassa rica em metais produzida por meio de tecnologia de fitoextração. Os autores afirmam que o *design* de todos os processos encontra-se em conformidade com

os PQVs e representam uma nova alternativa aos materiais minerais não renováveis. Contudo, o estudo não abrange todos os 12 princípios e não utiliza uma metodologia a fim de mensurar e avaliar o processo por meio dos PQVs. A pesquisa 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. Dois anos depois, esses mesmos autores (LOSFELD *et al.*, 2014) divulgaram pesquisas sobre o mesmo processo de fitoextração, abordando mais etapas desta técnica. Assim como no trabalho anterior, eles evidenciaram os mesmos PQVs abordados no primeiro estudo, não contemplando uma análise completa dos 12 princípios.

Çelik e Yildiz (2017) apresentaram 15 métodos diferentes de produção de hidrogênio, reunidos em quatro grupos principais, de acordo com a entrada de energia: elétrica, térmica, híbrida e biológica. Segundo estes autores, apesar de o hidrogênio ser reconhecido como combustível verde por ser livre de carbono (a partir de então, livre de emissões de CO₂), ele pode ser produzido, no entanto, por meio de uma ampla variedade de combustíveis fósseis e fontes de energia sustentáveis, de modo que o tipo de processo de produção de hidrogênio determina as emissões que irão ocorrer. O estudo apresenta de forma sucinta cada método de produção selecionado e os avalia qualitativamente de acordo com 11 dos 12 PQVs – o princípio 11 não foi analisado especificamente. Além disso, por não possuir processo de síntese química, o princípio 4 também não é aplicável aos métodos de produção (ÇELIK e YILDIZ, 2017). Ou seja, não foi realizada uma análise quantitativa, por meio de dados dos processos. Conforme os autores, a preocupação com as análises é referente ao aspecto ambiental, o trabalho não fornece abordagem econômica ou viabilidade de aplicação em termos de eficiência e custo unitário de produção.

Na tentativa de metrificar os 12 princípios para a avaliação da síntese de uma molécula, Devierno Kreuder *et al.* (2017) categorizaram os princípios em três agrupamentos (uso aprimorado de recursos, aumento da eficiência energética e redução de riscos humanos e ambientais) e fizeram o uso de expressões matemáticas para quantificar cada um deles. Segundo os autores, o estudo apresenta uma abordagem robusta e flexível para abranger um portfólio diversificado de produtos e processos químicos. Devierno Kreuder *et al.* (2017) aplicaram o método em dois

processos alternativos (um original e outro reprojeto) para a sintetização do 1-Aminobenzotriazol. Esta substância é um inibidor do citocromo P450, uma superfamília de enzimas responsável por metabolizar 75% dos fármacos em uso (DE MONTELLANO, 2018; HABENSCHUS, 2016).

Desta forma, apesar de haver alguns trabalhos sendo desenvolvidos utilizando os 12 PQVs, não há, até o momento, pesquisas voltadas à aplicação destes princípios para a avaliação da produção de ferro-gusa. Evangelista *et al.* (2019) realizaram uma revisão integrativa da literatura justamente para contextualizar os trabalhos relacionados à aplicação dos PQVs à produção de gusa e identificar as lacunas e oportunidades de melhoria referentes ao tema. Segundo os autores, não há uma metodologia relacionada aos 12 PQVs que mensure e analise os processos produtivos de produção de ferro-gusa. O estudo traz ainda que, os trabalhos analisados na fase 4 da revisão integrativa (Análise Crítica dos Estudos Incluídos), embora não sejam relativos ao processo produtivo de ferro-gusa, mas sim aos processos de fitoextração, também não possuem metodologia que contemple todos os 12 princípios. Ainda de acordo com Evangelista *et al.* (2019), foi realizada uma busca exaustiva com as *strings* (descritores) estabelecidas na fase 2 da revisão integrativa (Busca ou Amostragem na Literatura) e, como forma de englobar o máximo possível de pesquisas referentes ao tema de estudo, os trabalhos selecionados foram incluídos na fase de análise crítica devido à estratégia de busca definida na escolha dos descritores (utilização de palavras similares a ‘ferro-gusa’ em inglês).

Com relação aos estudos relacionados a ISs (fundamentais para a metrificação do desenvolvimento de produtos e processos, sejam eles industriais ou não, e que auxiliam na tomada de decisões de órgãos ou empresas responsáveis pelo que está sendo avaliado), Singh *et al.* (2006) apresentaram um método para o desenvolvimento de indicadores compostos de desempenho da sustentabilidade (CSPI, do inglês, *composite sustainability performance index*) para o setor siderúrgico. Segundo os autores, este modelo de decisão conceitual é realizado utilizando o processo de hierarquia analítica (AHP, do inglês, *analytical hierarchy process*) e serve para auxiliar na avaliação do desempenho da sustentabilidade de uma organização, não apenas ao longo dos seus três pilares (econômico, ambiental e social), mas também na governança organizacional e nos aspectos técnicos, considerados quarta e quinta dimensões da

sustentabilidade, respectivamente. Os autores ainda afirmam que, embora os CSPIs sejam questionáveis em relação à sua subjetividade, o rigor metodológico utilizado torna o modelo admissível, tanto para especialistas quanto para a população em geral.

Chalise (2014) também traz o aspecto técnico em sua pesquisa e propõe um conjunto de indicadores qualitativos e quantitativos para a avaliação do desempenho sustentável do sistema de tratamento de águas residuais. De acordo com a autora, os indicadores compreendem quatro dimensões da sustentabilidade (meio ambiente, sociedade, economia e técnica) e são voltados, especificamente, para o tratamento de águas residuais industriais, mas podem ser adequados também ao tratamento de água residuais municipais. A avaliação do sistema foi realizada por meio do GoldSET, um *software* desenvolvido pela associação Golder, que, segundo a autora, trata-se de uma ferramenta de engenharia personalizável e confiável, apropriada para avaliar esses tipos de projetos.

No que diz respeito a estudos voltados à siderurgia, Strezov *et al.* (2013) avaliaram indicadores e parâmetros importantes para definir o papel das operações dessas empresas no desenvolvimento sustentável e analisaram os principais desafios ambientais que precisam ser enfrentados pela ciência e pela indústria. O estudo realizou a comparação entre três tecnologias de produção de ferro (alto-forno, forno a arco elétrico e forno de redução direta – MIDREX), de acordo com os indicadores de emissões de gases de efeito estufa, consumo de água doce, requisitos de uso da terra e poluição do ar. Esses parâmetros foram também comparados aos indicadores de desempenho de duas outras indústrias fundamentais: as de geração de energia (usina de carvão) e as de produção de alimentos (trigo). Os autores verificaram que o desempenho de sustentabilidade de todas as tecnologias siderúrgicas analisadas ficou abaixo do alcançado pela produção de trigo, mas acima ao da produção de eletricidade. E dentre as indústrias de produção de ferro, o forno a arco elétrico apresentou a melhor performance, seguido, muito próximo, da MIDREX. O alto-forno foi a tecnologia de fabricação de ferro e aço com classificação mais baixa, embora seu desempenho tenha sido significativamente superior ao da usina a carvão.

Long *et al.* (2016) propuseram um sistema de indicadores para avaliação da sustentabilidade voltado, especificamente, para as siderúrgicas chinesas. O estudo utilizou dados de relatórios financeiros e de sustentabilidade de quatro empresas

chinesas de ferro e aço, com o intuito de ajudá-las a investigar objetivamente seu desempenho em sustentabilidade, fornecer informações claras e eficazes aos tomadores de decisão e apoiar o desenvolvimento sustentável dessas siderúrgicas. O estudo fez uso de 17 indicadores, sendo eles 7 econômicos, 4 sociais e 6 ambientais.

Diante do contexto supracitado, são necessários estudos relacionados à avaliação do impacto ambiental de processos de produção de ferro-gusa, bem como metodologias e ferramentas, de fácil aplicabilidade, que auxiliem na avaliação deste e de outros processos produtivos. Conforme discutido, as metodologias existentes normalmente não contemplam todos os PQVs, além de não serem integradas aos ISs. Portanto, o desenvolvimento de uma metodologia que considere os 12 PQVs e possibilite a avaliação, concomitantemente, dos processos produtivos em relação aos ISs, permite melhor avaliá-los em termos de sustentabilidade.

3. METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia desenvolvida neste trabalho, o fluxograma que a representa e os estudos de caso a serem avaliados. A fim de facilitar a compreensão da metodologia proposta, também é apresentado o passo a passo para a sua aplicação, bem como a interface do programa computacional desenvolvido e seus respectivos campos para preenchimento solicitados ao usuário.

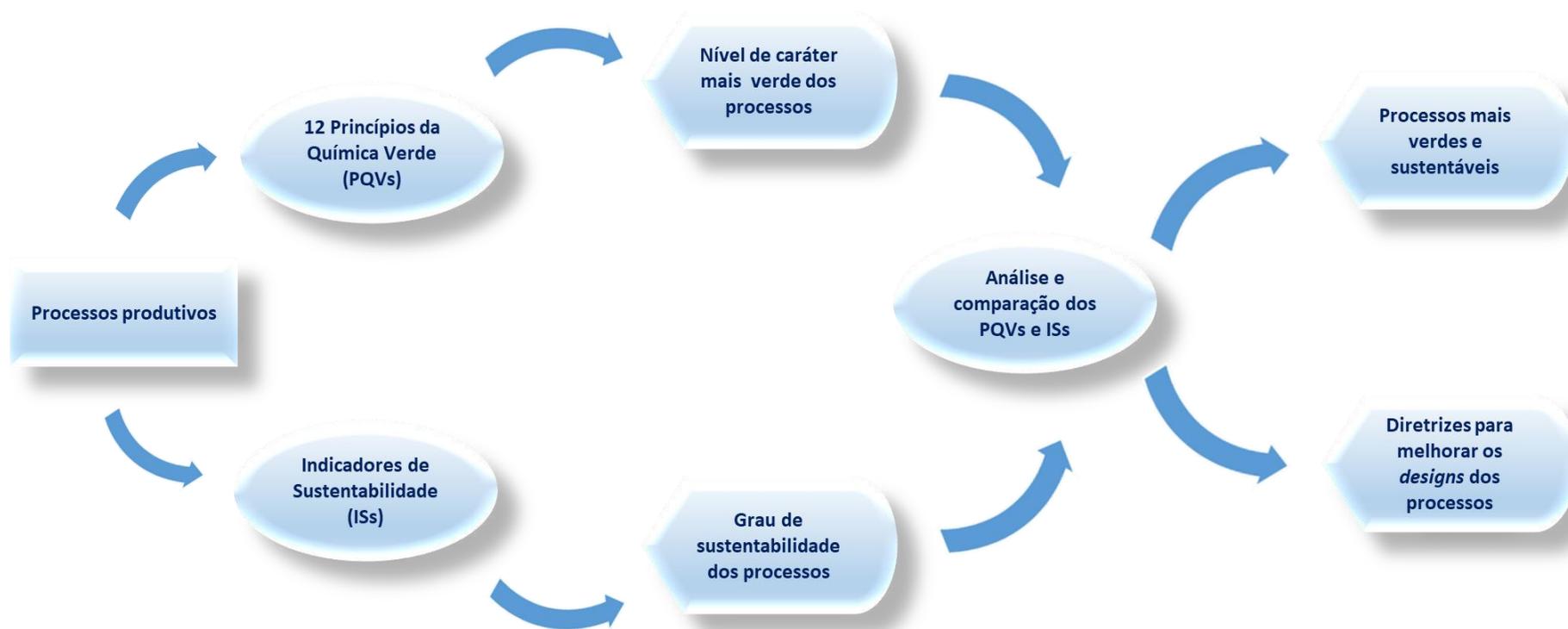
O presente trabalho caracteriza-se como uma pesquisa aplicada, pois tem o objetivo de gerar conhecimentos por meio de uma aplicação prática e direcionada à solução de problemas específicos (SILVA e MENEZES, 2005). Do ponto de vista dos procedimentos técnicos e forma de abordagem do problema, classifica-se, respectivamente, como um estudo de caso qualiquantitativo baseado em dados de uma empresa brasileira do setor metalúrgico.

Este estudo propõe um procedimento de análise do impacto ambiental de processos químicos e/ou bioquímicos com base nos Princípios da Química Verde e nos Indicadores de Sustentabilidade e aplica-o em dois estudos de caso de processos de produção de ferro-gusa, com reagentes carboníferos diferentes, apresentados por Noldin Jr (2007).

Primeiramente, são aplicados os 12 Princípios da Química Verde, com a utilização de métricas e ponderações para mensurar e identificar a rota de produção que possui melhor atendimento aos princípios. Em seguida, são aplicados, nestes mesmos casos, seis Indicadores de Sustentabilidade, divididos em ISs de entrada e ISs de saída do processo, a fim de analisá-los em função de seus graus de sustentabilidade.

Posteriormente, os resultados obtidos por meio das duas análises (12PQVs e 6 ISs) são comparados e identifica-se o processo com melhor desempenho técnico e ambiental. A Figura 14 esquematiza a sequência de aplicação da metodologia proposta.

Figura 14: Esquema da metodologia proposta



Fonte: Autoria própria

Assim, de acordo com a Figura 14, as diferentes alternativas de processos produtivos para um mesmo produto são avaliadas de duas formas: PQVs e ISs. Ou seja, a metodologia pode ser aplicada, de forma separada, para distintos produtos (aço, café, ferro-gusa, biodiesel, por exemplo), analisando-se as n alternativas de processo para cada um deles. Ao ser avaliado pelos PQVs (sequência superior da Figura 14), o programa fornece o nível de atendimento aos princípios e mostra a comparação dos resultados entre as rotas avaliadas. Este mesmo procedimento é realizado para os ISs (sequência inferior da Figura 14), onde o programa fornece o nível de atendimento aos indicadores, indicando o grau de sustentabilidade dos processos e mostra a sua comparação ao final. Após a análise por meio dos PQVs e ISs, é possível constatar qual dos processos comparados é o mais verde e sustentável, bem como verificar quais indicadores e princípios as rotas já atendem adequadamente e quais merecem mais atenção para que sejam aprimorados. A Figura 15 representa o passo a passo do procedimento proposto.

Figura 15: Passo a passo da metodologia proposta



Fonte: Autoria própria

A metodologia proposta foi implementada em um programa computacional (Microsoft Excel®) para ser utilizada em qualquer processo produtivo, auxiliar no direcionamento de modificações a serem feitas para o aprimoramento dos processos e, desta forma, contribuir na tomada de decisão sobre a melhor rota produtiva a ser escolhida. Por isso, recomenda-se que sejam avaliados, no mínimo, dois casos, a fim de que possa ser realizada uma comparação entre as rotas alternativas, embora o programa possibilite a avaliação de apenas um caso também (que pode ser feito avaliando especificamente o atendimento a cada princípio e indicador utilizado). Com relação ao número máximo, não há um limite para a quantidade de casos possíveis a serem analisados. Contudo, serão necessárias algumas adaptações no programa, como um intervalo de valores permitidos para atribuição de cada nota, por exemplo.

Para a análise dos processos, é interessante e pode ser fornecido ao programa um caso de referência, a fim de compará-lo as rotas avaliadas:

- A referência pode ser uma rota tradicional que, mesmo não sendo considerada sustentável, é utilizada universalmente, como a rota de alto-forno (utilizada na avaliação do processo de produção de ferro-gusa neste estudo). Dessa forma, quando comparados a essa rota tradicional, quanto menores os valores obtidos (*inputs* fornecidos ao programa) para os casos avaliados, melhor será o atendimento aos princípios e indicadores;
- A referência pode ser uma rota já considerada sustentável. Assim, da mesma forma que no item anterior, quando comparados a esta rota de referência, quanto menores forem os valores obtidos (*inputs* fornecidos ao programa) para os casos avaliados, melhor será os atendimentos aos princípios e indicadores.

Caso o processo não tenha uma rota de referência, pode-se comparar as rotas avaliadas entre elas e, desta forma, avaliar qual delas atende melhor aos PQVs e ISs. Por conseguinte, a rota considerada mais verde e sustentável após a avaliação, pode vir a se tornar a rota referência para esse processo, até que seja encontrada uma melhor que esta. Colocando, assim, o conceito de melhoria contínua em prática.

Conforme ilustrado nas Figuras 16 e 17, o programa desenvolvido possui uma aba para cada um dos princípios e indicadores a serem analisados, com suas respectivas definições, a fim de facilitarem a compreensão e a utilização por parte do usuário. Na interface são apresentados também os campos para preenchimento dos dados requisitados pelo programa, bem como as notas que serão atribuídas a cada um dos processos avaliados.

Figura 16: Exemplo da aba do programa aplicado aos Princípios da Química Verde.

Princípio 1: Prevenção

Definição: É melhor prevenir a formação de resíduos do que tratá-los ou remediá-los após já terem sido formados (ANASTAS e WAGNER, 1998; MEIRELLES, 2009).

Com base no primeiro princípio da química verde, quanto maior a quantidade de resíduo gerado e quanto mais poluente for este resíduo, maiores os volumes a serem tratados, mais complexos serão os tratamentos e, conseqüentemente, pior será o atendimento.

1.1.: Comparação entre os resíduos gerados nos processos analisados e seus respectivos Fatores E

Total de Resíduos		
Processos	kg/t de gusa	Fator E
Caso A	173	0,17
Caso B	86	0,09

Avaliação	Descrição	Valor Atribuído
Ruim	Pior Atendimento	0
Regular	Atendimento Intermediário	1
Bom	Melhor Atendimento	2

Processos	Avaliação	Valor Atribuído
Caso A	Regular	1
Caso B	Bom	2

Fonte: Autoria própria

Figura 17: Exemplo da aba do programa aplicado aos Indicadores de Sustentabilidade

ISE 1: Taxa de Fonte de Carbono Utilizada

Definição: Este indicador tem como finalidade mensurar a quantidade dos n tipos de fontes de carbono utilizadas para a geração do produto desejado, conforme representado na Equação 21.

$$ISE\ 1 = \frac{\sum_i^n \text{Massa do Insumo Carbonoso}(kg)}{\text{Massa do produto}(kg)} \quad (21)$$

1.1.: Comparação da quantidade de insumos carbonosos utilizadas em cada processo

Taxa de Carbono Utilizado	
Processos	kg/t de gusa
Caso A	701,91
Caso B	666,79

Avaliação	Descrição	Valor Atribuído
Ruim	Pior Atendimento	0
Regular	Atendimento Intermediário	1
Bom	Melhor Atendimento	2

Processos	Avaliação	Valor Atribuído
Caso A	Ruim	0
Caso B	Regular	1

Fonte: Autoria própria

Os PQVs e ISs são analisados, um a um, para cada rota estudada. Para a avaliação dos PQVs, o usuário entra com *inputs* (dados de entrada) solicitados pelo programa e, segundo a metodologia de Mello (2014), com o objetivo de fornecer um caráter quantitativo à avaliação, atribui notas de 0 a 2 em função da menor ou maior proximidade ao atendimento de cada princípio. Conforme apresentado no Quadro 10, os conceitos foram definidos como bom, regular e ruim.

Quadro 10: Métricas para avaliação dos processos de produção de ferro-gusa

Avaliação	Descrição	Valor Atribuído
Ruim	Pior Atendimento	0
Regular	Atendimento Intermediário	1
Bom	Melhor Atendimento	2

Fonte: Adaptado de Mello (2014)

Com relação aos ISs, o usuário também fornece os dados de entrada solicitados pelo programa e, com base na comparação dos resultados de cada indicador utilizado, determina o grau de sustentabilidade do processo. Para análise dos ISs, foram atribuídos também os mesmos critérios de avaliação, representados no Quadro 10, adotados para os PQVs.

Após a avaliação de cada indicador e cada princípio para as rotas em estudo, o programa fornece ao final índices, em porcentagens, dos graus de sustentabilidade dos processos e níveis de quanto os 12 PQVs estão sendo atendidos em cada caso. Estas porcentagens são geradas de acordo com o máximo de nota que o processo poderia obter ao ser avaliado pelos PQVs (nota máxima 24, por ser doze indicadores) e pelos ISs (nota máxima 12, por ser seis indicadores). Desta forma, é possível comparar os resultados obtidos para as rotas analisadas, bem como identificar em quais requisitos os processos precisam ser aprimorados.

Para a aplicação desta metodologia ao processo de produção de ferro-gusa, a primeira rota, denominada de Caso A, utiliza o coque chinês como fonte carbonífera. Já a segunda, nomeada de Caso B, faz uso do CVP (Coque Verde de Petróleo) como fonte de carbono. Os dois casos utilizam a mesma fonte de ferro e demais reagentes do processo (ligante orgânico e calcário – tipo de agente fluxante). As quantidades de entradas e saídas, para as duas rotas, são representadas nos Quadros 11 e 12.

Quadro 11: Entradas e saídas para o Caso A

Entrada						Saída			
Aglomerado (kg/tgusa)	Booster (kg/tgusa)	Agente extra (kg/tgusa)	V2 (Nm ³ /tgusa)	V1 (Nm ³ /tgusa)	Combustível (kg/tgusa)	Gás de topo (Nm ³ /tgusa)	Poeira de topo (kg/tgusa)	Escória (Kg/tgusa)	Gusa (Kg/tgusa)
1915	93	0	812	999	278	2618	13	160	1000

Fonte: Adaptado de Noldin Jr (2007)

Quadro 12: Entradas e saídas para o Caso B

Entrada						Saída			
Aglomerado (kg/tgusa)	Booster (kg/tgusa)	Agente extra (kg/tgusa)	V2 (Nm ³ /tgusa)	V1 (Nm ³ /tgusa)	Combustível (kg/tgusa)	Gás de topo (Nm ³ /tgusa)	Poeira de topo (kg/tgusa)	Escória (Kg/tgusa)	Gusa (Kg/tgusa)
1868	86	0	1106	903	258	3190	16	70	1000

Fonte: Adaptado de Noldin Jr (2007)

De acordo com os Quadros 11 e 12, à exceção da fonte de carbono, as duas rotas utilizam as mesmas matérias primas, no entanto, em proporções distintas para cada reagente.

4. AVALIAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DO FERRO-GUSA

Neste capítulo é realizada a aplicação da metodologia proposta no processo de produção do ferro-gusa, avaliando-se duas rotas produtivas com fontes carboníferas distintas. A fim de facilitar a compreensão da metodologia desenvolvida, os PQVs e ISs são aplicados, um a um, nos processos estudados.

4.1 PRINCÍPIOS DA QUÍMICA VERDE – PQVs

4.1.1 Princípio 1: Prevenção

Definição: É melhor prevenir o desperdício do que tratar ou limpar os resíduos depois de já terem sido formados (ANASTAS e EGHBALI, 2009).

De acordo com o primeiro princípio da Química Verde, é muito menos dispendioso evitar a produção de resíduos do que tratá-lo ou recuperá-lo após formado.

Assim, é importante considerar, já na fase de projeto, as reduções na geração de resíduos, de modo que investimentos sejam direcionados desde o início à aplicação de tecnologias mais limpas e eficientes de produção, evitando, desta forma, a necessidade de elevados custos no tratamento de resíduos, que muitas vezes não resolvem o problema de maneira satisfatória (MELLO, 2014; MEIRELLES, 2009).

Uma medida frequentemente utilizada para mensurar esse desperdício é o Fator E, descrita por Roger Sheldon, em 1992, que relaciona o peso do lixo coproduzido ao peso do produto desejado, conforme representado na Equação 8. Conhecido também como *Environmental Impact Factor* (Fator de Impacto Ambiental), essa métrica ajuda a mensurar a quantidade de resíduos gerados por quilograma de produto, e tem sido adotado por muitos na indústria química a fim de ressaltar a ineficiência de certos processos industriais e, assim, abrir as portas para soluções criativas. É, deste modo, um meio para avaliar a “aceitabilidade ambiental” de um processo de fabricação (ACS, 2019; ANASTAS E EGHBALI, 2009). Portanto, quanto maior for o Fator E, mais resíduo está sendo gerado no processo em análise e, conseqüentemente, pior será a sua avaliação.

$$E = \frac{\text{Massa de resíduo gerado (kg)}}{\text{Massa do produto obtido (kg)}} \quad (8)$$

No Quadro 13 são comparados os resíduos gerados (poeiras de topo e escória) em cada processo em relação à quantidade de gusa produzido e seus respectivos Fatores E.

Quadro 13: Comparação entre os resíduos gerados nos processos analisados e seus respectivos Fatores E

Processos	kg/t de gusa	Fator E
Caso A	173	0,17
Caso B	86	0,09

Fonte: Autoria própria

O CVP possui baixos teores de cinzas, material volátil, enxofre e alto teor de carbono fixo, garantindo, assim, um elevado poder calorífico e o colocando em posição vantajosa em relação a outras fontes de carbono, como o carvão (PETROBRAS, 2015). De acordo com Yallico (2011), o poder calorífico do carvão metalúrgico é em torno de 6800 kcal/kg a 7300 kcal/kg e o do CVP é de 8700 kcal/kg. Por conseguinte, a reação do Caso B, que utiliza esta fonte carbonífera como matéria-prima, gera mais energia e uma menor quantidade de escória.

Em altos-fornos, a escória é o coproduto com maior volume de geração, em torno de 210kg a 310 kg por tonelada de ferro-gusa produzido (BRASIL, 2010b). Portanto, conforme apresentado no Quadro 13, ambos os estudos de caso geram menor quantidade de resíduos que os processos convencionais. No entanto, por produzir menos resíduos e apresentar um menor fator E, o Caso B foi avaliado com nota 2 e o Caso A, nota 1.

4.1.2 Princípio 2: Economia de Átomos

Definição: Os métodos sintéticos devem ser projetados para maximizar a incorporação de todos os materiais usados na produção do produto (ANASTAS e EGHBALI, 2009).

De acordo com ACS (2019), o projeto de síntese com máxima incorporação dos átomos dos reagentes no produto desejado é tão importante quanto os esforços para se atingir seu rendimento percentual máximo.

Assim, para quantificar este princípio, foi utilizada uma métrica retirada do trabalho de Devierno Kreuder *et al.* (2017), representada na Equação 9 e denominada neste estudo de PQV 2.

$$PQV\ 2 = \frac{MR\ (kg) + MA\ (kg) - MRR(kg) - MAR\ (kg)}{MP\ (kg) + MC\ (kg)} \quad (9)$$

onde MR significa a massa de reagentes utilizados; MA, massa de auxiliares (catalisadores) no processo; MRR, massa de reagente recuperado; MAR, massa de auxiliares reutilizados; MP, massa do produto obtido e MC, massa do coproduto (produto secundário) gerado. Caso haja mais de um coproduto produzido, este também deve ser mensurado no fator do denominador da Equação 9 ($\sum_1^n MC = MC_1 + MC_n$, sendo n o número de coprodutos gerados).

Nos processos analisados neste trabalho, não há utilização de catalisadores e geração de coproduto. O Quadro 14 apresenta os valores do PQV 2 obtidos para as rotas em estudo.

Quadro 14: Valor de PQV 2 para os processos em estudo

PQV 2	
Caso A	Caso B
2,29	2,21

Fonte: Autoria própria

Sabe-se que, quanto menor o valor de PQV 2, melhor está sendo a incorporação de reagentes à síntese do processo. Desta forma, embora as duas rotas apresentem resultados na mesma ordem de grandeza, o Caso B demonstra uma economia de átomos ligeiramente melhor. Contudo, outro fator importante que deve ser levado em consideração no estudo da produção de ferro-gusa é a incorporação do Fe (ferro) ao produto, por ser o componente de maior valor agregado a esta síntese.

Assim, conforme representado no Quadro 15, apesar de o Caso B necessitar de uma carga de alimentação um pouco menor que o Caso A para a mesma quantidade de gusa produzido (1 tonelada), o Caso B (93%) apresentou uma menor incorporação de Fe ao produto que o Caso A (96%).

Quadro 15: Quantidade em % de Fe no gusa

Componente	Caso A	Caso B
Fe	96%	93%

Fonte: Autoria própria

De acordo com as especificações do mercado de ferro-gusa, ele precisa conter pelo menos 92% de Fe para agregar mais valor ao produto produzido (IMMA, 2019).

Portanto, como os dois processos apresentaram incorporação de reagentes ao produto na mesma ordem de grandeza e o Caso A obteve maior porcentagem de Fe no gusa, foi atribuída nota 2 a este caso e nota 1 ao Caso B.

4.1.3 Princípio 3: Síntese de Produtos Menos Perigosos

Definição: Sempre que praticável, as metodologias sintéticas devem ser projetadas para usar e gerar substâncias que ofereçam pouca ou nenhuma toxicidade à saúde humana e ao meio ambiente (ANASTAS e EGHBALI, 2009).

De acordo com a definição deste princípio, os processos que são formados por reações que utilizam ou geram substâncias com baixo ou nenhum grau de toxicidade são considerados mais verdes.

Os processos em estudo utilizam a mesma fonte de ferro, os mesmos agentes ligantes e fluxantes como reagentes. No entanto, apresentam fontes carboníferas diferentes: coque chinês para o Caso A e CVP para o Caso B.

Conforme a análise das Fichas de Informações de Segurança de Produtos Químicos (FISPQs), ilustradas no Quadro 16, essas substâncias não apresentam alto grau de toxicidade; entretanto, a exposição a pós ou poeiras dos agentes carboníferos, em especial, é prejudicial à saúde humana. A poeira de CVP pode causar irritação ao trato respiratório (com tosse e falta de ar), danos aos pulmões e dermatite (PETROBRAS, 2018). E o coque chinês, proveniente do carvão mineral, em caso de exposição

prolongada à inalação de seu pó, pode provocar pneumoconiose (VICTORIA, 2010). De acordo com o Ministério da Saúde (2006), esta doença não costuma causar sintomas nas fases iniciais e intermediárias e, ocasionalmente, os trabalhadores acometidos desenvolvem fibrose maciça progressiva. Nesta condição, há a formação de cicatrizes em amplas áreas do pulmão e, devido a isso, pode causar destruição dos vasos sanguíneos e do tecido pulmonar. Além disso, a doença agrava-se mesmo que a pessoa não esteja mais exposta ao pó de carvão (MELDAU, 2019).

Com relação aos demais reagentes, o calcário não possui nenhuma evidência toxicológica e o ligante orgânico não foi apresentado porque, de acordo com o trabalho de Noldin Jr (2007), não foi especificado qual o tipo utilizado nos processos envolvidos. É importante salientar que as FISPQs analisadas não são dos próprios componentes empregados nos processos, uma vez que elas não foram fornecidas, mas se tratam das mesmas substâncias retiradas da literatura, conforme referências apresentadas nos Quadros 16 e 17.

Quadro 16: Informações toxicológicas dos reagentes

Substâncias	Toxicidade para órgãos-alvo específicos - exposição única	Toxicidade para órgãos-alvo específicos - exposição repetida	Fonte
Calcário	Nenhuma evidência de efeitos mutagênicos ou reprodutivos		Huber (2015)
CVP	A exposição a poeira pode causar irritação ao trato respiratório com tosse e falta de ar, por ação mecânica	A exposição repetida a altas concentrações de poeira pode provocar danos aos pulmões. O contato repetido do produto com a pele pode causar dermatite	Petrobras (2018)
Coque Chinês	Considerado uma substância não tóxica. Não é perigoso para a saúde humana	No caso de exposição prolongada ao pó de coque, há a possibilidade de ocorrer pneumoconiose	Victoria (2010)

Quadro 17: Informações ecológicas dos reagentes

Substâncias	Ecotoxicidade	Persistência e Degradabilidade	Potencial de Bioacumulação	Fonte
Calcário	Não considerado nocivo à vida aquática	Não degradável	Nenhum	Huber (2015)
CVP	Não classificado como perigoso para os ambientes aquáticos e terrestres	É esperada lenta degradação e alta persistência	Não é esperado potencial bioacumulativo em organismos	Petrobras (2018)
Coque Chinês	Não é perigoso para o ecossistema.	Produto não forma produtos nocivos de decomposição ou oxidação.	Não determinado	Victoria (2010)

No que diz respeito às informações ecológicas, as substâncias analisadas não são consideradas nocivas ao ecossistema, conforme apresentado no Quadro 17. Contudo, as emissões relacionadas à queima desses reagentes devem ser evitadas e, quando ocorrerem, devem ser controladas de acordo com a legislação vigente.

Assim, uma forma de quantificar os impactos ambientais e sociais, provenientes do uso de reagentes, é a utilização da métrica de Devierno Kreuder *et al.* (2017), denominada nesta pesquisa de PQV 3.

$$PQV\ 3 = \frac{\sum_i^n (R\ score\ x\ massa\ de\ matéria\ prima\ (kg))}{Massa\ do\ produto\ (kg)} \quad (10)$$

De acordo com Devierno Kreuder *et al.* (2017), o *R score* é o grau de risco atribuído a partir das tabelas de informações de suporte, conforme apresentado no Anexo A, para as todas as *n* matérias-primas utilizadas. O Quadro 18 apresenta os valores do PQV 3 obtidos para as rotas em estudo.

Quadro 18: Valor de PQV 3 para os processos em estudo

PQV 3	
Caso A	Caso B
11,43	11,06

Fonte: Autoria própria

Assim, a partir do cálculo da Equação 10 para as duas rotas analisadas, pode-se observar que ambas possuem PQV 3 na mesma ordem de grandeza, com valores muito próximos. Ademais, como as duas rotas obtiveram *R score* máximo, foi atribuída nota 0 aos dois processos, uma vez que ambos os casos geram substâncias prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente.

4.1.4 Princípio 4: Desenvolvimento de Produtos Químicos mais Seguros

Definição: Os produtos químicos devem ser projetados para preservar a eficácia da função e, ao mesmo tempo, reduzir a toxicidade (ANASTAS e EGHBALI, 2009).

Considerado complementar ao princípio anterior, pois estão relacionados tanto com a toxicidade dos reagentes quanto com a dos produtos envolvidos em uma reação,

o Princípio 4, no entanto, está mais focado na natureza do produto gerado no processo (LENARDÃO, 2003; MELLO, 2014).

Nos dois casos em estudo, o produto desenvolvido é o ferro-gusa, que possui baixa toxicidade e baixo potencial de bioacumulação, conforme apresentado no Quadro 19. Além de possuir uma baixa biomagnificação, ele tende a apresentar uma biodiluição ao longo da cadeia trófica – tanto na aquática, quanto na terrestre. Em relação à toxicidade, o principal risco para a saúde humana, apresentado pelo pó de ferro, está associado à concentração de poeira no ar, podendo causar irritação nos olhos e no sistema respiratório (METINVEST INTERNATIONAL ITALIA S.R.L., 2011).

Quadro 19: Informações ecológicas e toxicológicas do ferro-gusa

Substâncias	Ecotoxicidade	Persistência e Degradabilidade	Potencial de Bioacumulação	Efeitos na Saúde Humana	Fonte
Ferro-gusa	Não relevante para o produto em si	Para uma substância inorgânica, a degradação biótica no meio ambiente é irrelevante para os propósitos de persistência e degradabilidade	As evidências disponíveis mostram a ausência de biomagnificação do ferro ao longo da cadeia trófica, tanto nas cadeias alimentares aquáticas quanto nas terrestres. As informações existentes sugerem não apenas que o ferro não biomagnifica, mas que ele tende a apresentar biodiluição	O principal risco para a saúde humana, apresentado pelo pó de ferro, está relacionado à concentração de poeira no ar, agindo como uma poeira incômoda. Quanto maior a concentração de poeira, maior o risco de irritação no sistema respiratório e irritação mecânica nos olhos	Metinvest International Italia s.r.l. (2011)

De acordo com Devierno Kreuder *et al.* (2017), uma forma de quantificar este princípio é por meio da Equação 11 (similar a Equação 10, alterando apenas o numerador: em vez de matéria-prima, avalia-se agora os n produtos formados).

$$PQV_4 = \frac{\sum_i^n (R\ score \times Massa\ do\ Produto(kg))}{Massa\ do\ produto\ (kg)} \quad (11)$$

Contudo, como as duas rotas em estudo possuem a mesma massa de produto e as mesmas substâncias contaminantes, os valores de PQV 4 para os processos seriam iguais. Assim, outro ponto que deve ser levado em consideração é a concentração de contaminantes no produto. O “gusa de mercado”, denominado como *merchant pig iron is cold iron* pela Associação Internacional do Ferro-gusa (IPIA, sigla em inglês da *Internacional Pig Iron Association*), é definido como gusa de aciaria e gusa de fundição, em estado sólido adequado para manuseio e transporte a longas distâncias. O gusa de aciaria, especificamente, é a matéria-prima para a fabricação do aço, e o gusa de fundição, por ter suas especificações mais rígidas, é usado nas fundições para a fabricação de peças fundidas de ferro, podendo, em função da menor ou maior resistência, ser classificado como cinzento ou nodular (MENDO, 2009). No Quadro 20 são apresentadas as especificações para o “gusa de mercado”.

Quadro 20: Análise Química do “gusa de mercado”

Elementos	Análise Química	
	Aciaria	Fundição
Si	1,50 máx.	1,50 - 3,00
C	3,50 - 4,50	
P	0,08 máx.	
Mn	0,50 máx.	0,30 - 1,00
S	0,05 máx.	

Fonte: Adaptado de Mendo (2009)

O gusa analisado nos dois casos em estudo são comercializados como matéria-prima para a produção de aço, ou seja, é caracterizado como gusa de aciaria. De acordo com Noldin Jr (2007), os teores de Si e Mn no metal foram, respectivamente, 0,5% e 0,3% no Caso A e 0,3% e 0,2% no Caso B. Portanto, conforme apresentado no Quadro 20, ambos os casos estão de acordo com as especificações para a comercialização do

produto. Contudo, como o Caso B apresentou teores menores de contaminantes, ele foi avaliado com nota 2 e o Caso A com nota 1.

4.1.5 Princípio 5: Diminuição do Uso de Solventes e Auxiliares

Definição: O uso de substâncias auxiliares (como solventes, agentes de separação, agentes secantes etc.) deve ser desnecessário sempre que possível. No entanto, quando forem necessários devem ser inócuos ao processo (ANASTAS e EGHBALI, 2009).

Existem processos que demandam uma grande quantidade de solventes, muitas vezes tóxicos, envolvidos em suas reações, que acabam sendo dispostos e descartados como resíduos, causando poluição. Ademais, de acordo com este princípio, o uso de solventes deve ser evitado até mesmo quando atóxicos, uma vez que o grande volume de resíduos dificulta e encarece as etapas de tratamento e descarte (MELLO, 2014).

O impacto ambiental e social associado ao uso de solventes e auxiliares pode ser mensurado conforme a Equação 12, apresentada no trabalho de Devierno Kreuder *et al.* (2017), onde o *R score* é o fator atribuído ao grau de risco representado no Anexo A, para todos os *n* solventes utilizados.

$$PQV\ 5 = \frac{\sum_i^n (R\ score\ x\ massa\ de\ solvente\ (kg))}{Massa\ do\ produto\ (kg)} \quad (12)$$

Como os processos analisados não fazem uso de solvente, foi atribuída, portanto, nota máxima (2) para os dois casos.

4.1.6 Princípio 6: Eficiência Energética

Definição: A energia utilizada nos processos químicos deve ser reconhecida por seus impactos ambientais e econômicos e deve ser minimizada. Sempre que possível, os métodos sintéticos devem ser conduzidos à temperatura e pressão ambiente (ANASTAS e EGHBALI, 2009).

Com base neste princípio, as transformações devem ser realizadas, sempre que praticável, à temperatura e pressão ambiente em detrimento às condições mais severas. Esse conceito é baseado no fato de que em condições mais brandas o processo oferece maior segurança, bem como menor consumo de energia em equipamentos como bombas, compressores, torres de refrigeração, caldeiras (MELLO, 2014).

Os processos analisados operam a elevadas temperaturas e a baixas pressões. Embora, nos dois casos, a escória e o gusa saiam com as mesmas temperaturas (1450°C e 1400°C, respectivamente), as temperaturas intermediárias de operação do Caso A superam as do Caso B, chegando a atingir 1709°C, conforme apresentado no Quadro 21.

Quadro 21: Temperaturas intermediárias dos processos em estudo

Condições de Operação dos Processos		
Temperaturas Intermediárias (°C)	Caso A	Caso B
T1	1150	1150
T2	1432	1212
T3	1402	1406
T4	1709	1460

Fonte: Adaptado de Noldin Jr (2007)

Quanto à energia demandada nos processos, os dois casos necessitam de altas vazões nas ventaneiras do forno. Entretanto, para produzir a mesma quantidade de gusa, o Caso B carece de 198 Nm³/tgusa a mais que o Caso A, conforme apresentado no Quadro 22.

Quadro 22: Vazões utilizadas nos processos em estudo

Entrada de Vazão (Nm ³ /t gusa)	Caso A	Caso B
V1	999	903
V2	812	1106
V Total	1811	2009

Fonte: Adaptado de Noldin Jr (2007)

De acordo com Devierno Kreuder *et al.* (2017), uma forma de mensurar a eficiência energética de um processo é por meio da Equação 13, onde FST é o fator de severidade para a temperatura e FSP, o fator de severidade para pressão, para todas as *n* matérias-primas utilizadas.

$$PQV_6 = \frac{\sum_i^n [(FST + FSP) \times tempo(h) \times massa \text{ de matériaprima } (kg)]}{Massa \text{ do produto } (kg)} \quad (13)$$

Nesse contexto, diante das condições de temperatura e energia apresentadas, foi atribuída nota mínima (0) aos dois processos.

4.1.7 Princípio 7: Uso de Matéria-prima Renovável

Definição: Sempre que técnica e economicamente possível, deve-se utilizar matéria-prima renovável em detrimento da não-renovável (ANASTAS e EGHBALI, 2009).

De acordo com a definição supracitada, a escolha do reagente é um fator importante na mensuração do impacto ambiental de um processo produtivo. Portanto, este princípio alerta para a necessidade do uso de fontes renováveis de matéria-prima (biomassa). Materiais derivados de plantas e outras fontes biológicas renováveis ou reciclados devem ser utilizados como reagentes, sempre que possível, tornando, desta forma, o processo mais verde (LENARDÃO, 2003; MELLO, 2014).

Segundo a ACS (2019), a natureza produz cerca de 170 bilhões de toneladas de biomassa vegetal por ano, das quais, atualmente, são usadas cerca de 3,5% para as necessidades humanas. Estima-se que cerca de 40 bilhões de toneladas de biomassa, ou aproximadamente 25% da produção anual, seriam necessárias para gerar completamente uma economia de base biológica. O desafio técnico no uso de tais fontes renováveis é desenvolver vias não tóxicas de baixa energia, a fim de converter a biomassa em produtos químicos úteis de uma maneira que não gere mais carbono do que está sendo removido com a sua utilização como matéria-prima.

Os processos em análise não fazem uso de fontes renováveis como matéria-prima. O Caso B utiliza o CVP como combustível e agente redutor que, segundo a Petrobras (2019), é produzido a partir do craqueamento de óleos residuais pesados em unidades de conversão de resíduos denominadas Unidades de Coqueamento Retardado (RCR). Esse coproduto, proveniente da destruição de resíduos da destilação de petróleo, principalmente resíduos de vácuo, possui baixo teor de enxofre e elevado teor de carbono fixo (C). Já o Caso A utiliza o coque chinês como combustível e agente redutor e, assim como o CVP, possui elevado teor de C fixo e baixo teor enxofre. Embora tenha

uma menor concentração de voláteis (quase sete vezes menor), este reagente possui maiores teores de SiO₂ e Al₂O₃ em sua composição.

Assim, a fim de quantificar o princípio 7, foi empregada a Equação 14, apresentada no trabalho de Devierno Kreuder *et al.* (2017), onde % NR é a porcentagem das *n* matérias-primas não renováveis utilizadas para a produção do produto. Quanto menor o valor de NR, melhor será o atendimento a este PQV.

$$PQV\ 7 = \frac{\sum_i^n (\text{massa de matéria – prima (kg)} \times \% NR)}{\text{Massa do produto (kg)}} \quad (14)$$

Contudo, como nenhum dos processos em estudo faz uso de fontes renováveis, foi atribuída nota mínima (0) aos dois casos em atendimento a este princípio.

4.1.8 Princípio 8: Redução do Uso de Derivados

Definição: A derivação desnecessária (uso de grupos bloqueadores, proteção/desproteção, modificação temporária por processos físicos e químicos) deve ser minimizada ou, se possível, evitada, porque tais etapas requerem reagentes adicionais e podem gerar resíduos (ANASTAS e EGHBALI, 2009).

Baseado na definição deste princípio, a utilização destas substâncias derivativas, uma vez que precisem ser retiradas ao final do processo, tenderão a dar origem a correntes residuais ou aumentar o volume de fluxos que já seriam formados, podendo ocasionar a necessidade de etapas adicionais de purificação e tratamentos para quantidades maiores de resíduos (MELLO, 2014).

A Equação 15, adaptada de Devierno Kreuder *et al.* (2017), mensura o impacto do uso de derivados em um processo, onde o *R score* é o fator atribuído ao seu grau de risco a partir das tabelas de informações de suporte (Anexo A) para todos os *n* derivados utilizados.

$$PQV\ 8 = \frac{\sum_i^n (R\ score \times \text{massa de derivados (kg)})}{\text{Massa do produto (kg)}} \quad (15)$$

Contudo, como os casos em estudo não fazem uso de tais substâncias no processo, ambos foram avaliados com nota 2, por apresentarem um caráter mais verde neste quesito.

4.1.9 Princípio 9: Catálise

Definição: Reagentes catalíticos (tão seletivos quanto possível) são superiores aos reagentes estequiométricos (ANASTAS e EGHBALI, 2009).

A utilização de reagentes catalíticos favorece a melhoria ambiental de um processo, visto que permite reações mais rápidas com menor consumo de energia. Além disso, quanto mais desenvolvida for a tecnologia do catalisador empregado, mais seletivo ele será, proporcionando, desta forma, menores quantidades de correntes residuais geradas (MELLO, 2014).

A fim de mensurar o uso de catalisadores em um processo, pode-se aplicar a Equação 16, onde C_f representa o número de fases que necessitam de catalisadores e não fazem o seu devido uso, e C_t , o número total de fases que necessitam de catalisadores. Quanto menor for esta relação, melhor será o atendimento a este princípio.

$$PQV\ 9 = \frac{C_f}{C_t} \quad (16)$$

Como em nenhum dos casos analisados são utilizados reagentes catalíticos, atribuiu-se a avaliação mínima (0) para os dois, uma vez que a presença desses tipos de substâncias já proporcionaria a realização de processos mais verdes.

4.1.10 Princípio 10: Desenvolvimento de Compostos Degradáveis

Definição: Os produtos químicos devem ser projetados de tal forma que, ao final de sua função, sejam quebrados em produtos de degradação inócuos e não persistam no meio ambiente (ANASTAS e EGHBALI, 2009).

Os profissionais da química verde desejam otimizar a função comercial de um produto químico ao mesmo tempo em que minimizam seu perigo e risco. O perigo é a

capacidade de causar dano, característica inerente que surge como função da estereoquímica de um produto químico. Os princípios 3, 4, 5 e 12 orientam os projetistas a reduzirem esse perigo. O princípio 10, entretanto, orienta o projeto de produtos que degradam após sua função comercial, a fim de reduzir os riscos ou a probabilidade de ocorrência de danos. O risco é uma função tanto do perigo inerente de uma molécula, quanto da exposição – contato entre uma substância química e uma espécie. Assim, a degradação pode eliminar a exposição significativa, minimizando, desta forma, o risco, independentemente do perigo do produto químico envolvido (ACS, 2019).

De acordo com UNIFAL (2019), o risco é a associação de perigo (que é inerente à substância, mistura de substâncias, processo, equipamento, situação) à exposição (que é baseada na intensidade, duração e frequência de contato com o agente) e pode ser representada pela Equação 17.

$$Risco = Perigo + Exposição \quad (17)$$

Portanto, o risco só ocorre quando há exposição a um perigo (UNIFAL, 2019). Baseado nesta definição, os princípios 3, 4, 5, 8 e 12 não avaliam apenas o perigo das substâncias e condições de trabalho, eles avaliam o risco, uma vez que o fator exposição está sendo levado em consideração na metrificação destes princípios. O princípio 10, no entanto, por prezar pelo desenvolvimento de compostos degradáveis inócuos e que não persistam no meio ambiente, já minimiza o fator de risco justamente por eliminar a exposição significativa ao composto.

De acordo com Devierno Kreuder *et al.* (2017), uma forma de metrificar este princípio é por meio da Equação 18, onde *B max score* é o valor máximo do produto de degradação mais bem classificado (Anexo A) e MPD é a massa deste produto melhor classificado.

$$PQV_{10} = \frac{\sum_i^n (B \text{ max score} \times MPD \text{ (kg)})}{\text{Massa do produto (kg)}} \quad (18)$$

Contudo, nos dois processos em análise, o produto formado, por se tratar de uma substância inorgânica, apresenta degradação biótica no meio ambiente irrelevante para os propósitos de persistência e degradabilidade (METINVEST INTERNATIONAL

ITALIA S.R.L., 2011). Portanto, sob o aspecto da biodegradabilidade, todos os dois casos em estudo foram avaliados com nota mínima (0), por se tratarem de substâncias não degradáveis

4.1.11 Princípio 11: Análise em Tempo Real para Prevenção da Poluição

Definição: Metodologias analíticas precisam ser desenvolvidas para permitir o monitoramento e controle, em tempo real, de um processo, a fim de que não ocorra formação de substâncias perigosas (ANASTAS e EGHBALI, 2009).

De acordo com Mello (2014), para a existência dessas metodologias analíticas, tecnologias devem ser desenvolvidas, a fim de que seja possível realizar o monitoramento e controle da qualidade do processo em tempo real, evitando, desta forma, a formação de substâncias tóxicas. Esse *feedback* simultâneo é essencial para o bom funcionamento da operação, podendo identificar, por exemplo, mudanças na temperatura ou no pH do processo, antes mesmo que a reação saia do controle; detectar previamente a intoxicação de catalisadores e outros eventos deletérios, prevenindo, assim, que um incidente maior seja provocado (ACS, 2019).

Nos dois casos em estudo há o monitoramento simultâneo das variáveis de processo (temperatura, pressão, vazão de ar, por exemplo) por meio dos sistemas de gerenciamento de informações da planta (PIMS, do inglês, *Plant Information Management Systems*), que armazenam os dados em um histórico e permitem, ao pessoal da área de controle de processos, a visualização dos *inputs* e *outputs* por meio de gráficos e tabelas.

Vale ressaltar que, nos dois casos em análise, deve-se ter um bom controle da temperatura, uma vez que se tratam de processos que operam a elevadas temperaturas e o seu não monitoramento e descontrole reacional podem causar graves acidentes - explosões, vazamentos e queimadura, por exemplo. Outra variável que deve ser levada em consideração é a vazão de ar das ventaneiras. A vazão de ar utilizada impacta diretamente na quantidade do ferro-gusa produzido.

Portanto, assim como em todo processo industrial, torna-se necessário que nos dois casos em estudo haja um monitoramento adequado das variáveis de controle, a fim

de garantir o bom funcionamento das unidades operacionais no que tange às questões de segurança ambiental e ocupacional, bem como de viabilidade econômica.

Uma forma de mensurar o impacto deste princípio é por meio da Equação 19 apresentada no trabalho de Devierno Kreuder *et al.* (2017); onde FCM e FSM representam, respectivamente, o número de fases com e sem monitoramento e RM indica o valor do rigor do monitoramento (Anexo A).

$$PQV\ 11 = \frac{FSM}{(FCM * RM + FSM)} \quad (19)$$

Assim, embora haja um adequado monitoramento, em tempo real, das variáveis de controle dos processos, como ambos apresentam riscos elevados por atuarem a altas temperaturas e vazões de ar, foi atribuída nota 1 aos dois casos.

4.1.12 Princípio 12: Química Inerentemente mais Segura para a Prevenção de Acidentes

Definição: As substâncias, bem como a forma que elas são usadas em um processo químico, devem ser escolhidas a fim de minimizar o potencial de acidentes químicos, como lançamentos, explosões e incêndios (ANASTAS e EGHBALI, 2009).

Conhecido como o princípio da segurança, o PQV 12 pode ser o mais negligenciado dentre todos os PQVs. Contudo, é praticamente impossível atingir os objetivos do Princípio 12 sem a implementação de pelo menos um dos demais princípios (ACS, 2019). Portanto, o foco principal da QV é nitidamente tornar o ambiente mais seguro; materiais e processos que são mais seguros para o meio ambiente são também mais seguros para o público em geral (ACS, 2019).

Como o foco do Princípio 12 é o conceito de segurança operacional, deve-se observar as variáveis como periculosidade e toxicidade das substâncias envolvidas no processo. Ou seja, devem ser priorizados processos que envolvam reações e transformações mais seguras, com menor grau de toxidez, baixa pressão de vapor e alto ponto de fulgor, a fim de que se garanta a redução da possibilidade de ocorrência de acidentes (MELLO,2014).

Segundo Devierno Kreuder *et al.* (2017), uma forma de metrificar o PQV 12 é por meio da Equação 20, onde F é o *score* das propriedades físicas, atribuído a partir das tabelas de informações de suporte, (Anexo A), para as todas as n matérias-primas utilizadas.

$$PQV\ 12 = \frac{\sum_i^n (F\ score\ x\ massa\ de\ matéria\ -\ prima\ (kg))}{Massa\ do\ produto\ (kg)} \quad (20)$$

De acordo com as FISPQs dos componentes utilizados nos processos analisados, todos eles são considerados estáveis em condições normais de manuseio e armazenagem. Contudo, apesar de o CVP e o coque chinês serem compostos de estabilidade química, isto é, não explosivos, não reativos e com elevados pontos de ignição, partículas dessas substâncias altamente granuladas e secas, em condições especiais, podem formar misturas explosivas e ocasionar autoignição (VICTORIA, 2010; PETROBRAS, 2019; PETROBRAS, 2015). Portanto, é importante que haja um armazenamento adequado destes reagentes. O CVP, por exemplo, em caso de estoques a céu aberto, deve-se manter as suas pilhas umedecidas e protegidas da ação direta dos ventos, bem como deve haver um bom sistema de drenagem de águas pluviais, a fim de minimizar o impacto dessas poeiras e reduzir o risco de autoignição nos locais estocados (PETROBRAS, 2015). Essas mesmas precauções devem ser tomadas também para o armazenamento apropriado do coque chinês.

Outro ponto que deve ser levado em consideração é a decomposição oxidativa térmica do ferro, que, quando aquecido até sua decomposição (1535°C), pode produzir fumaças tóxicas contendo óxidos de ferro e manganês, por exemplo (METINVEST INTERNATIONAL ITALIA S.R.L., 2011). Embora nos dois casos em estudo a temperatura de saída do gusa seja de 1400°C, é importante que se tenha um controle adequado da temperatura final do produto.

Desta forma, em função da análise supracitada, há um risco alto associado, em especial, a armazenagem dos reagentes e do controle de temperatura dos processos em estudo. Assim, por operarem com condições similares e devido ao risco elevado relacionado a potenciais acidentes, foi atribuída nota mínima (0) aos dois casos.

4.2 INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE – ISs

Os indicadores utilizados nesta pesquisa para metrificação dos processos analisados foram divididos em Indicadores de Sustentabilidade de Entrada (ISEs) e Indicadores de Sustentabilidade de Saída (ISSs).

Os ISEs correspondem a taxas e/ou consumo utilizados no início do processo:

- Taxa de carvão utilizada;
- Consumo específico de matéria-prima;
- Consumo de energia.

Os ISSs correspondem a taxas e/ou produções emitidas no final do processo:

- Taxa total de gases emitidos;
- Taxa de emissão de óxidos de carbono (CO e CO₂);
- Quantidade de resíduos sólidos produzidos.

Vale ressaltar que, embora não estejam listados nos ISs avaliados neste trabalho, taxa total de água, emissão de particulados, percentual de resíduos perigosos produzidos, percentual de resíduos sólidos reaproveitados (reciclados ou utilizados para outros fins) e uso da terra são indicadores igualmente importantes e que devem ser metrificados para uma análise mais completa dos indicadores ambientais de sustentabilidade. Eles não foram quantificados neste estudo por falta de dados representativos para este fim.

4.2.1 Indicadores de Sustentabilidade de Entrada – ISEs

4.2.1.1 Taxa de Fonte de Carbono Utilizada

Este indicador tem como finalidade mensurar a quantidade dos n tipos de fontes de carbono utilizadas para a geração do produto desejado, conforme representado na Equação 21.

$$ISE\ 1 = \frac{\sum_i^n \text{Massa do Insumo Carbonoso}(kg)}{\text{Massa do produto}(kg)} \quad (21)$$

As fontes de carbono utilizadas para os processos em estudo são o coque chinês para o Caso A e o CVP para o Caso B. No Quadro 23 são comparadas as quantidades empregadas em cada caso para a produção de 1t de ferro-gusa.

Quadro 23: Comparação da quantidade de insumos carbonosos utilizadas em cada processo

Taxa de Carbono Utilizado	
Processos	kg/t de gusa
Caso A	701,91
Caso B	666,79

Fonte: Aatoria própria

De acordo com estudos de Silva (2011), são utilizados em torno de 650 kg de coque ou carvão vegetal para a produção de 1t de gusa em altos-fornos. Desta forma, conforme apresentado no Quadro 23, os dois casos analisados estão aquém dos processos convencionais de produção de ferro-gusa. Assim, foi atribuída ao Caso B nota 1, por necessitar de uma taxa de carbono maior, porém próxima às utilizadas em altos-fornos; e nota 0 ao Caso A, por necessitar de uma taxa maior que os processos tradicionais.

4.2.1.2 Consumo Específico de Matéria-Prima

O indicador de consumo específico de matéria-prima tem por finalidade mensurar todos os n tipos de insumos necessários para a geração do produto desejado, conforme apresentado na Equação 22.

$$ISE\ 2 = \frac{\sum_i^n \text{Massa de Matéria Prima Utilizada (kg)}}{\text{Massa do produto (kg)}} \quad (22)$$

O Quadro 24 apresenta a quantidade necessária de matérias-primas para produção de 1t de gusa em cada processo analisado.

Quadro 24: Comparação da quantidade de matérias-primas utilizadas em cada processo

Consumo Específico de Matéria-Prima	
Processos	kg/t de gusa
Caso A	2286
Caso B	2212

Fonte: Autoria própria

Conforme pode ser observado no Quadro 24, o Caso B necessita de menor consumo de matéria-prima para produzir a mesma quantidade de gusa que o Caso A. De acordo com Silva (2011), a produção de 1t de ferro-gusa em altos-fornos utilizam, em média, 2600kg de matéria-prima (1,7 t de minério, 0,65 t de coque ou carvão vegetal e 0,25 t de calcário). Portanto, como os dois casos em estudo necessitam de menores quantidades de matérias-primas que os processos tradicionais e Caso B ainda requer menos insumos que o Caso A, eles foram avaliados, respectivamente, com notas 2 e 1.

4.2.1.3 Consumo de Energia

Este indicador tem como objetivo mensurar a quantidade necessária dos n tipos de energia utilizadas para a geração do produto desejado, conforme apresentado na Equação 23.

$$ISE\ 3 = \frac{\sum_i^n \text{Quantidade de Energia Utilizada (Kcal ou Nm}^3\text{)}}{\text{Massa do produto (kg)}} \quad (23)$$

Para este estudo, a fronteira do sistema é o forno e as formas de energias mensuradas são os sopros de ar das ventaneiras, apresentados no Quadro 25.

Quadro 25: Comparação da quantidade de energia utilizada em cada processo

Consumo de Energia	
Processos	Nm ³ /t de gusa
Caso A	1811,00
Caso B	2009,00

Fonte: Autoria própria

De acordo com Sousa (2010), são necessários 1122,46 Nm³ de ar para a produção de 1t de gusa em alto-forno. Baseado neste dado, o consumo de energia do Caso A e do

Caso B são superiores ao dos processos tradicionais em 61% e 79%, respectivamente. A relação entre os dois processos em estudo é de 11%, ou seja, o Caso B consome 11% a mais de ar que o Caso A. Desta forma, apesar de o Caso B depender de mais energia, ambas as rotas excedem em mais de 60% o consumo energético. Portanto, foram atribuídas nota 0 aos dois casos.

4.2.2 Indicadores de Sustentabilidade de Saída – ISSs

4.2.2.1 Taxa Total de Gases Emitidos

Este indicador é responsável por mensurar a quantidade dos n tipos de gases emitidos a partir da geração do produto analisado, como apresentado na Equação 24.

$$ISS\ 1 = \frac{\sum_i^n \text{Massa de Gases Emitidos (kg)}}{\text{Massa do produto (kg)}} \quad (24)$$

A quantidade de emissões dos gases gerados nos processos em estudo encontra-se representada no Quadro 26.

Quadro 26: Comparação da quantidade de gases emitidos em cada processo

Taxa Total de Gases Emitidos	
Processos	Nm ³ /t de gusa
Caso A	2618,00
Caso B	3190,00

Fonte: Autoria própria

De acordo com o estudo de Sousa (2010), para a produção de 1 tonelada de ferro-gusa, são gerados 1780 Nm³ de gás em um alto-forno. Baseado neste dado, as emissões do Caso A e do Caso B são superiores as dos processos tradicionais em 47% e 79%, respectivamente. A relação entre os dois processos em estudo é de 22%, ou seja, o Caso B gera 22% a mais de gases que o Caso A. Assim, apesar de o Caso B gerar uma quantidade maior de gases, quando comparado ao Caso A, ambas as rotas excedem em mais de 40% as emissões dos processos convencionais. Desta forma, os dois casos foram avaliados com nota 0 para este indicador.

4.2.2.2 Taxa de Emissão de Óxidos de Carbono (CO e CO₂)

O indicador de taxa de emissão de óxidos de carbono, conforme apresentado na Equação 25, é responsável por mensurar a quantidade gerada destes gases devido à produção do produto desejado.

$$ISS\ 2 = \frac{\sum \text{Massa de Óxidos de Carbono Emitidos (kg)}}{\text{Massa do produto (kg)}} \quad (25)$$

O dióxido de carbono (CO₂) é um dos principais gases responsáveis pelo efeito estufa e, conseqüentemente, pela intensificação no aquecimento global, devido ao aumento de sua concentração na atmosfera proveniente das emissões antrópicas, tais como: queima de combustíveis fósseis (como carvão mineral e derivados do petróleo) e mudança no uso da terra (como queimadas e desflorestamentos) (MMA, 2020b).

O monóxido de carbono (CO) é um produto da combustão incompleta de combustíveis, devido à insuficiência de oxigênio na reação para permitir a oxidação a dióxido de carbono (CO₂). O CO é um gás inodoro e incolor, que em baixas concentrações de exposição pode causar fadiga no peito e em altas, pode causar asfixia e até levar à morte (MMA, 2020c).

De acordo com Malard (2009), são emitidos em um alto-forno, aproximadamente 20% em volume de cada óxido de carbono. Considerando esta estimativa, o Quadro 27 apresenta a quantidade destes gases gerados em cada processo.

Quadro 27: Comparação da quantidade de óxidos de carbono emitidos em cada processo, considerando 20% em volume para cada gás

Taxa de Emissão de Óxidos de Carbono (CO e CO ₂)		
Nm ³ /t de gusa	Caso A	Caso B
CO	523,60	638,00
CO ₂	523,60	638,00
Total	1047,20	1276,00

Fonte: Autoria própria

Entretanto, de acordo com dados operacionais fornecidos da planta piloto, são emitidos em torno de 28,7% em volume para o CO e 9,1% para o CO₂. Considerando estas porcentagens, os valores destes óxidos gerados são representados no Quadro 28.

Quadro 28: Comparação da quantidade de óxidos de carbono emitidos em cada processo, considerando 28,7% em volume para o CO e 9,1% para o CO₂

Taxa de Emissão de Óxidos de Carbono (CO e CO₂)		
Nm ³ /t de gusa	Caso A	Caso B
CO	751,37	915,53
CO ₂	238,24	290,29
Total	989,60	1205,82

Fonte: Autoria própria

Contudo, comparando esses dados operacionais com o estudo de Sousa (2010) (o mesmo que foi utilizado no indicador anterior – taxa total de gases emitidos), onde foram gerados 22,15% de CO e 14,76% de CO₂, a quantidade total de emissão de óxidos de carbono nos casos avaliados foram superiores as dos processos tradicionais em 51% para o Caso A e 84% para o Caso B. Assim, apesar de o Caso A gerar uma menor quantidade desses gases quando comparado ao Caso B, ambas as rotas excedem em mais de 50% as emissões dos processos convencionais, sendo avaliadas, desta forma, com nota 0 para este indicador.

4.2.2.3 Quantidade de Resíduos Sólidos Produzidos

O objetivo deste indicador é mensurar todos os n tipos de resíduos sólidos produzidos a partir da geração do produto formado, conforme representado na Equação 26.

$$ISS\ 3 = \frac{\sum_i^n \text{Massa de Resíduos Sólidos Produzidos (kg)}}{\text{Massa do produto (kg)}} \quad (26)$$

O Quadro 29 apresenta a quantidade gerada de resíduos sólidos na produção de 1t de ferro-gusa em cada caso analisado.

Quadro 29: Comparação da quantidade de gases emitidos em cada processo

Quantidade de Resíduos Sólidos Produzidos	
Processos	kg/t de gusa
Caso A	173,00
Caso B	76,00

Fonte: Autoria própria

Como este indicador é similar ao PQV 1 e representam as mesmas quantidades de resíduos gerados, ao Caso B foi atribuída a nota 2 e ao Caso A, nota 1, conforme avaliados no primeiro princípio.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados após a aplicação dos PQVs e ISS em cada rota analisada, realizada a comparação entre os processos produtivos e discutido oportunidades de melhorias que podem ser implementadas em cada um deles.

Após a avaliação de cada um dos princípios, o programa realizou a soma automática das notas e apresentou as porcentagens de atendimento aos 12 PQVs, conforme ilustradas no Quadro 30.

Quadro 30: Avaliação dos 12 Princípios da Química Verde

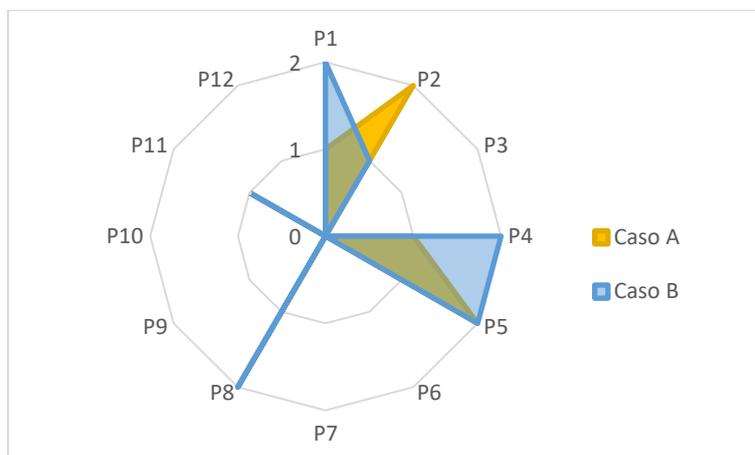
Princípios	Caso A	Caso B
P1	1	2
P2	2	1
P3	0	0
P4	1	2
P5	2	2
P6	0	0
P7	0	0
P8	2	2
P9	0	0
P10	0	0
P11	1	1
P12	0	0
Total	9	10
%	38%	42%

Fonte: Autoria própria

Conforme demonstrado no Quadro 30, a relação entre os dois processos é de 11%, ou seja, o Caso B atende 11% a mais aos PQVs que o Caso A. Contudo, nenhum dos dois casos conseguiu cumprir mais de 50% dos PQVs; além disso, obtiveram nota mínima (0) em seis dos 12 princípios: síntese de produtos menos perigosos (P3), eficiência energética (P6), uso de matéria-prima renovável (P7), catálise (P9), desenvolvimento de compostos degradáveis (P10) e química inerentemente mais segura para a prevenção de acidentes (P12). Os resultados desta avaliação estão representados no gráfico estilo “radar preenchido”, ilustrado na Figura 18, que apresenta a sobreposição das notas dos

dois casos, onde, quanto maior for a cobertura da área, melhor será o atendimento dos processos aos PQVs.

Figura 18: Sobreposição gráfica dos estudos de caso por meio dos PQVs



Fonte: Autoria própria

Como pode ser observado, o Caso B apresenta uma cobertura de área um pouco maior que o Caso A e os dois casos alcançaram nota máxima, em comum, apenas nos princípios de diminuição do uso de solventes e auxiliares (P5) e redução do uso de derivados (P8). Contudo, o Caso B obteve ainda nota máxima na prevenção (P1) e no desenvolvimento de compostos seguros (P4); e o Caso A, somente na economia dos átomos (P2).

Com relação à análise dos ISs, o programa também gerou a soma automática das notas atribuídas e apresentou as porcentagens de atendimento aos seis indicadores avaliados, conforme ilustradas no Quadro 31.

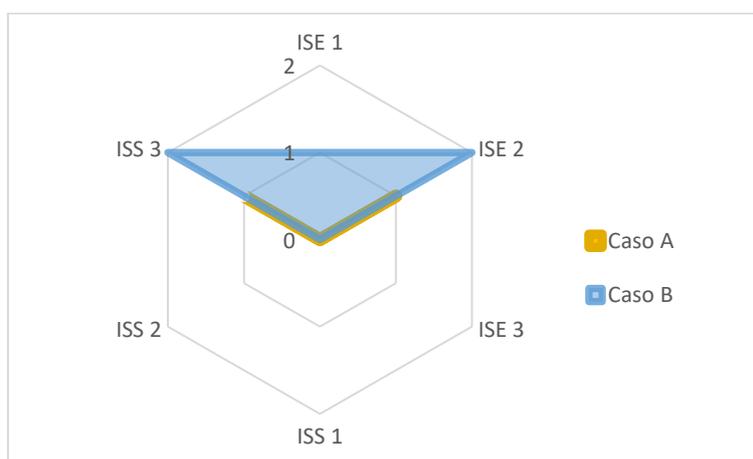
Quadro 31: Avaliação dos seis Indicadores de Sustentabilidade

Indicadores	Caso A	Caso B
ISE 1	0	1
ISE 2	1	2
ISE 3	0	0
ISS 1	0	0
ISS 2	0	0
ISS 3	1	2
Total	2	5
%	17%	42%

Fonte: Autoria própria

Assim como na avaliação dos PQVs, o Caso B (42%) também apresentou-se superior ao Caso A (17%), entretanto, a relação entre os dois processos para esta segunda forma de avaliação foi de 147%, ou seja, o Caso B atende 147% a mais aos ISs que o Caso A. Contudo, os dois casos obtiveram nota mínima (0), em comum, em três dos seis indicadores avaliados: consumo de energia (ISE 3), taxa total de gases emitidos (ISS 1) e taxa de emissão de óxidos de carbono (ISS 2). E o Caso A ainda obteve nota mínima para o indicador de taxa de fonte de carbono utilizada (ISE 1). A Figura 19 representa o gráfico “radar preenchido” para a sobreposição dos resultados dos dois estudos de caso avaliados.

Figura 19: Sobreposição gráfica dos estudos de caso por meio dos ISs



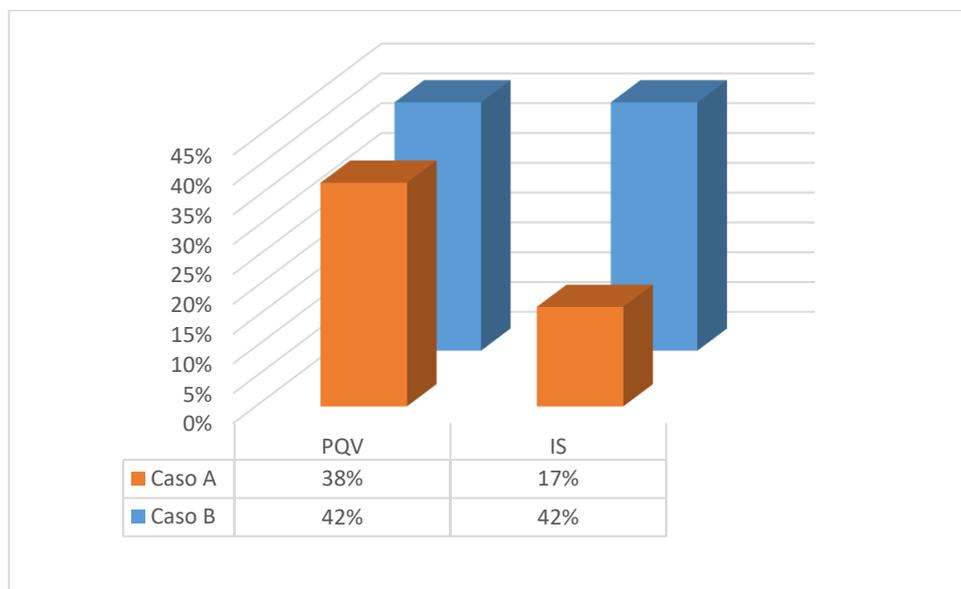
Fonte: Autoria própria

Conforme apresentado na Figura 19, o Caso A não chega a formar uma área poligonal, sendo representado apenas por dois segmentos de reta, sinalizando que obteve atendimento intermediário (nota 1) em dois indicadores – consumo específico de matéria-prima (ISE 2) e quantidade de resíduos sólidos produzidos (ISS 3) – e nota mínima (0) nos demais. Já o Caso B apresenta uma cobertura de área em formato triangular, indicando que obteve nota máxima (2) em dois dos seis indicadores: consumo específico de matéria-prima (ISE 2) e quantidade de resíduos sólidos produzidos (ISS 3).

Desta forma, mediante a análise dos estudos de caso por meio dos PQVs e ISs, o Caso B, comparado ao Caso A, apresentou-se como a melhor rota. Contudo, conforme

representado na Figura 20, os dois processos obtiveram atendimento inferior a 50% nas duas formas de avaliação (PQVs e ISs).

Figura 20: Comparação dos estudos de caso de acordo com os ISs e PQVs



Fonte: Autoria própria

Assim, de acordo com a Figura 20, o Caso A obteve 38% e 17% de atendimento aos PQVs e ISs, respectivamente; e o Caso B apresentou 42% de atendimento para as duas formas de avaliação.

Portanto, diante deste cenário, é possível perceber que existem muitas lacunas e oportunidades de melhorias nas rotas de produção de ferro-gusa analisadas, a fim de que se tornem mais verdes e mais sustentáveis. Estas modificações nos processos estão relacionadas a (ao):

- Uso de matérias-primas renováveis;
- Síntese de produtos menos perigosos;
- Mínimo consumo de energia e maior eficiência energética;
- Desenvolvimento de compostos degradáveis;
- Química inerentemente mais segura para a prevenção de acidentes;
- Redução no consumo específico de matéria-prima;
- Redução na emissão de gases atmosféricos poluentes, em especial os óxidos de carbono;
- Reaproveitamento dos resíduos sólidos gerados.

A siderurgia, em geral, tem uma grande contribuição no impacto ambiental no que diz respeito às emissões de poluentes atmosféricos e ao esgotamento das reservas minerais. Realizar as mudanças identificadas como lacunas e oportunidades de melhorias nos estudos de caso analisados, proporcionaria processos produtivos mais verdes e sustentáveis, que serviriam de modelos para rotas futuras. As modificações devem ser realizadas no decorrer de toda a cadeia produtiva; mas, em especial, no início de seu processo, tais como: a redução do consumo de reagentes (produzir mais com menos), a substituição dos insumos não renováveis por matérias-primas renováveis e a minimização do consumo de energia.

Os impactos ambientais associados à produção de ferro-gusa extrapolam as fronteiras de sua produção e geração de resíduos no processo e já inicia, muito antes, no seu fluxo produtivo, quando levado em conta as práticas de mineração – responsáveis, atualmente, pelo fornecimento dos principais insumos da produção de gusa.

As atividades mineradoras são impactantes à sociedade e ao meio ambiente desde à exploração das minas até formação das inúmeras barragens que oferecem perigo gratuito às comunidades do entorno.

É sabido que o carvão mineral, matéria-prima do coque chinês (que é utilizado como fonte de carbono do Caso A), é uma das formas de produção de energia mais agressiva ao meio ambiente. Embora sua extração e posterior utilização proporcionem benefícios econômicos (tanto diretos, quanto indiretos), seu processo de produção, da extração à combustão, provoca impactos socioambientais significativos. A ocupação do solo necessária à exploração das jazidas interfere, por exemplo, nos recursos hídricos, na vida da população, na fauna e flora locais, ao provocar barulho, poeira e erosão. Além disso, o transporte também acarreta poluição sonora e afeta o trânsito. Contudo, o impacto mais crucial gerado é o volume da emissão de gases poluentes, provenientes da combustão, como os óxidos de nitrogênio (NO_x) e o dióxido de carbono (CO_2), também conhecido como gás carbônico e principal agente da intensificação do aquecimento global (ANEEL, 2008).

O uso, a produção, o armazenamento e o transporte do CVP (fonte de carbono utilizada no Caso B) também têm efeitos similares ao do coque chinês. Provoca contaminação de mananciais, poluição do ar proveniente das poeiras fugitivas

(partículas extremamente finas que podem ser deslocadas a longas distâncias) e, durante a sua queima, gera gases tóxicos, em especial o SO_x. A quantidade dessas substâncias poluentes (enxofre, nitrogênio e metais) está intimamente associada à composição química do combustível, podendo sofrer alterações devido ao tipo de sistema de queima utilizado como, por exemplo, temperatura da câmara de combustão, tempo de residência e tipo de exaustão (PETROBRAS, 2015).

Os casos analisados fazem uso de recursos minerais e combustíveis fósseis que poderiam ser substituídos por biomassa, por exemplo. Os estudos de Yallico (2011) e BRASIL (2010b) abordam sobre a possibilidade de produção de fontes carbonosas a partir de carvão de gramíneas (capim de elefante), do babaçu e de rejeitos agrícolas aplicados à produção de ferro-gusa. De acordo com Uyttebroek *et al.* (2015), o uso da biomassa na produção de biocombustíveis e produtos químicos será o único recurso para as futuras gerações, pois o esgotamento das reservas de petróleo é apenas uma questão de tempo.

Contudo, como a produção de gusa é um processo complexo, a escolha da biomassa a ser utilizada deve atender aos requisitos técnicos do processo (FICK *et al.*, 2014). Além disso, o autor ainda afirma que a biomassa só é considerada neutra em CO₂ quando, de fato, a mesma quantidade queimada é plantada de volta.

O Brasil destaca-se mundialmente por ser o único país do mundo que tem significativa produção siderúrgica com o uso do carvão vegetal, que pode ser utilizado tanto como fonte carbonosa, quanto para gerar energia térmica (NAÇÕES UNIDAS, 2018). De acordo com estes autores, Minas Gerais é o estado brasileiro com a maior produção de ferro-gusa e aço fazendo uso deste insumo e também pioneiro no incentivo à sustentabilidade neste setor.

Com o objetivo de promover uma cadeia de produção siderúrgica sustentável e de baixa emissão de gases de efeito estufa, o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) no Brasil implementou o Projeto Siderurgia Sustentável, como uma iniciativa alinhada às prioridades nacionais e estaduais e com a finalidade de exercer um papel estratégico no cumprimento das NDCs brasileiras, no que tange as reduções das emissões de GEEs indicadas contexto do Acordo de Paris (NAÇÕES UNIDAS, 2018; MMA, 2016). Dentre as medidas estabelecidas nesse documento, destaca-se a

restauração e o reflorestamento de 12 milhões de hectares e a promoção ao uso de bioenergia sustentável (NAÇÕES UNIDAS, 2018).

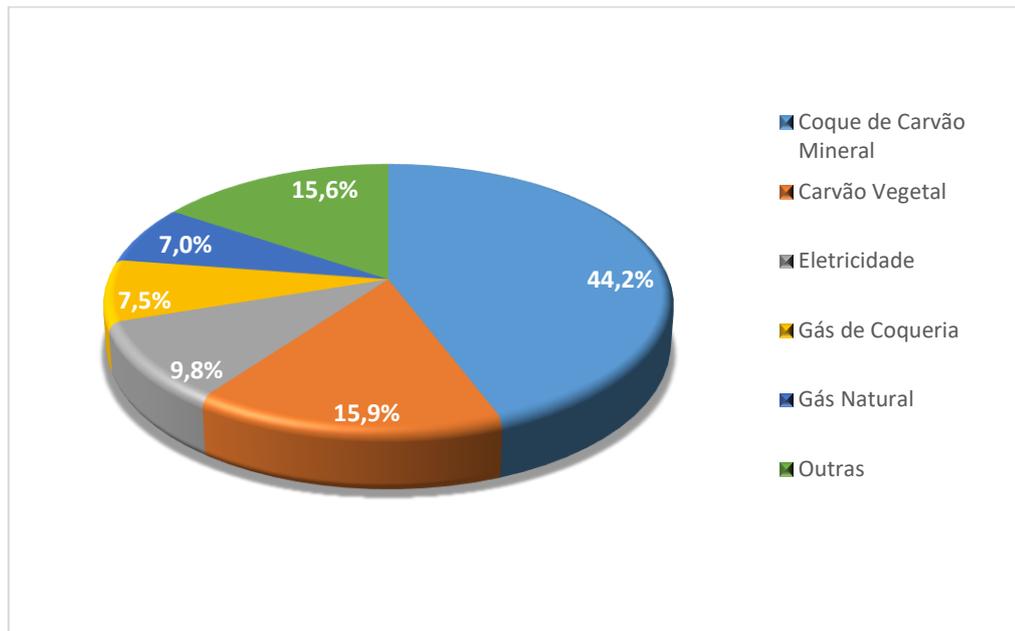
De acordo com as Nações Unidas (2018), as atividades e ações desenvolvidas pelo Projeto Siderurgia Sustentável alinham-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e seus resultados esperados contribuirão de maneira mais efetiva para o cumprimento do ODS 7 (Energia Limpa e Acessível), ODS 8 (Trabalho Decente e Crescimento Econômico), ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), ODS 12 (Consumo e Produção Sustentáveis) e ODS 13 (Ação contra a Mudança do Clima). Contudo, este projeto deveria ir além e contribuir também para o ODS 15 (Vida Terrestre), uma vez que, segundo a definição das Nações Unidas (2019), este objetivo tem por finalidade proteger, recuperar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres, bem como gerir de forma sustentável as florestas, combater a desertificação, deter e reverter a degradação da terra e deter a perda de biodiversidade.

O Ministério do Meio Ambiente (2016) afirma que, para melhorar a competitividade da produção desta matéria-prima para fins siderúrgicos, existem dois objetivos que se destacam como meta global:

- Aumentar o valor de estoques das florestas plantadas para abastecer o setor siderúrgico com biomassa renovável e sustentável;
- Melhorar o processo de produção do carvão vegetal, a fim de reduzir as emissões e aumentar a eficiência no uso da biomassa.

Estes objetivos ratificam ainda mais a necessidade de inclusão do ODS 15 nas propostas de alinhamento do Projeto Siderurgia Sustentável à Agenda 2030, uma vez que se relaciona diretamente com a forma de gerenciamento e uso sustentável das florestas para demanda industrial. Conforme ilustrado na Figura 21, o relatório da EPE (2019) do Balaço Energético Nacional, que tem como base o ano de 2018, apresenta o panorama energético do setor de ferro-gusa e aço.

Figura 21: Consumo de energia no setor siderúrgico



Fonte: Adaptado de EPE (2019)

O relatório não separa a demanda do setor siderúrgico por segmentos de ferro-gusa e aço e, como demonstrado na Figura 21, o consumo destes subsetores juntos é representado por 60% de coque de carvão mineral e carvão vegetal (44,2% e 15,9%, respectivamente).

Contudo, apesar do alto potencial brasileiro para utilização do carvão vegetal como fonte de energia ambientalmente viável à produção de ferro-gusa e aço, é imprescindível que este insumo seja proveniente de matas de reflorestamento destinadas à indústria, pois, caso contrário, o uso desta matéria-prima passa a ser um dos maiores emissores de CO₂ do setor (CAMIOTO e REBELATTO, 2014).

O processo siderúrgico, como um todo, é muito complexo e envolve várias etapas. De acordo com Rosenfeld e Feng (2011), as operações de coqueria e alto-forno são as principais responsáveis pela geração e liberação de partículas, cujas emissões são consideradas cancerígenas para os seres humanos por órgãos como a EPA, o Instituto Nacional de Segurança e Saúde Ocupacional dos Estados Unidos (NIOSH, do inglês *National Institute for Occupational Safety and Health*) e o Programa Nacional de Toxicologia deste mesmo país (NTP, do inglês *National Toxicology Program*).

No presente trabalho, a etapa de coqueificação é desconsiderada porque não há esta operação nas rotas estudadas – o coque utilizado é importado. Contudo, sabe-se

que esta fase, juntamente com a de redução são intensivas em energia, embora também apresentem maior potencial de economia e recuperação ao levar em consideração tanto a energia contida no coque, quanto a dos gases e calor dos processos (BNDES, 2015).

De acordo com o Atlas da Eficiência Energética do Brasil, elaborado pela Agência Internacional de Energia (2019) – em inglês, *International Energy Agency*, IEA –, as indústrias brasileiras representaram, em 2017, 33% do consumo final de energia do país, sendo o segmento de ferro-gusa e aço responsável por 19% da demanda energética do setor – ficando atrás apenas do segmento de alimento e tabaco.

De acordo com o BNDES (2015), a etapa de redução responde pelo maior consumo total de energia entre as operações siderúrgicas e dá origem a dois indicadores de eficiência energética: consumo específico de coque, em kg/t de ferro-gusa produzido, denominado em inglês de *coke rate*; e consumo específico de finos de carvão (ou de outra fonte de carbono), nomeado em inglês de *pulverized coal injection* (PCI).

A injeção de PCIs em alto-fornos tem por finalidade substituir, parcialmente, o coque utilizado no consumo de energia para a produção de ferro-gusa e proporcionar, desta forma, um maior retorno econômico, uma vez que, permite maior capacidade de taxa de injeção quando comparado ao emprego de óleos, gases e outros hidrocarbonetos (BNDES, 2015; MOTTA, 2011). A taxa de consumo desses dois insumos energéticos somados (coque + PCI) por tonelada produzida é conhecida pelo termo inglês *fuel rate* (taxa de combustível) (BNDES, 2015).

Os dois casos analisados não fazem o uso de PCIs em seus processos e conforme avaliados no ISE 1, necessitam de uma alta taxa de carbono para a produção de gusa. Desta forma, uma alternativa para diminuir este consumo seria a injeção de PCIs. Algumas siderúrgicas utilizam finos de carvão vegetam também, em substituição aos PCIs (BNDES, 2015).

É fundamental também que se preze pela síntese de produtos inofensivos ao ser humano e ao meio ambiente, buscando sempre o desenvolvimento de compostos degradáveis. O ferro-gusa, no entanto, não se caracteriza como um produto biodegradável e leva mais de 100 anos para se decompor na natureza. Por isto, é importante que se faça, ao final de sua vida útil (ou quando não aproveitados em nenhum processo posterior à sua produção), um destino adequado deste material.

Outro ponto que deve ser levado em consideração são as condições operacionais dos processos. As temperaturas durante a produção de ferro-gusa chegam a atingir valores superiores a 1700 °C (Caso A). É necessário, portanto, que exista um acompanhamento rigoroso do processo para evitar possíveis acidentes e um controle de combustão adequado (HERNANDEZ *et al.*, 2018). Ademais, o transporte das matérias-primas (em especial, as fontes carboníferas) para o forno e a sua posterior queima formam nuvens de poeiras, que são extremamente prejudiciais à saúde humana quando em exposição prolongada.

Com relação a etapa de armazenamento e beneficiamento das matérias-primas na indústria siderúrgica, os insumos são recebidos e dispostos em pilhas, em grandes pátios, à céu aberto. De acordo com França (2012), o padrão do empilhamento depende das características físico-químicas da matéria-prima estocada e para possibilitar um adequado manuseio e recuperação desses materiais, as pilhas possuem uma base e altura máxima projetadas. Contudo, segundo o autor, por se tratar de materiais pulverulentos, o consumo de água nesta etapa está relacionado à necessidade de aspersão para controle de emissão de particulados por arraste eólico. Os efluentes líquidos gerados também podem estar associados às precipitações pluviométricas nos pátios. Assim, França (2012) recomenda que haja um sistema de drenagem superficial e subsuperficial apropriado, que permita o reaproveitamento de águas de chuva, com o duplo benefício: redução no consumo de água e no descarte de efluentes líquidos contendo partículas finas que são arrastadas destes materiais.

No final da cadeia do processo produtivo, deve-se planejar uma melhor destinação dos resíduos gerados. Embora a escória proveniente da produção de gusa se estabilize rapidamente quando resfriada e diminua o potencial de lixiviados desagradáveis; enquanto fresca, ela é considerada hostil ao meio ambiente porque libera dióxido de enxofre e, na presença de água, são gerados sulfeto de hidrogênio (EL HAGGAR, 2007). É interessante, ambiental e economicamente, que a escória seja apresentada como um importante coproduto da siderurgia, uma vez que pode ser utilizada como insumo para a fabricação de cimento e/ou agregados na construção civil (FRANÇA, 2012; SILVA, 2016).

Outro ponto que deve ser tratado é o material fino e particulado que é arrastado ao passar pelo sistema de limpeza de gases do forno. Quando este sistema é realizado a

seco, o material é denominado de pó de balão, e quando há o emprego de água, é nomeado de lama (SILVA, 2007). De acordo com o autor, estes resíduos, quando provenientes de siderúrgicas à carvão vegetal, podem ser destinados à agricultura, constituindo uma fonte importante de nutrientes para as plantas e enquadrando-se como fertilizantes organominerais – quando atendido aos requisitos do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). Estudos também já foram realizados para investigar a adição destes resíduos junto ao carvão mineral para serem empregados como PCI, no entanto, Silva (2016) mostrou que a utilização do pó de balão, neste caso, prejudica a índice de combustibilidade da mistura de carvão injetado.

Por serem constituídos pelos finos insumos do próprio processo da produção de gusa, algumas empresas aproveitam o pó de balão (também conhecido como pó de coletor) para retorná-lo à cadeia produtiva, utilizando-o na sinterização de minérios (SILVA, 2016). Estes resíduos podem ainda ser misturados em argila, para produção de tijolos (RIBEIRO, 2011).

É importante também que a rota tenha um eficiente sistema de limpeza de gás, a fim de reduzir a emissão de poluentes, e que seja feito o reaproveitamento desses gases no próprio processo, fechando, desta forma, o ciclo produtivo. Um sistema de limpeza apropriado remove os particulados contidos nos gases de saída dos fornos e minimiza problemas como entupimentos de bicos e desgastes de equipamentos por abrasão, por exemplo (SILVA, 2016). De acordo com a IEA (2019), o carbono dos gases residuais do processo pode ser utilizado na fabricação de produtos químicos e combustíveis.

Embora o gás de alto-forno seja considerado um gás pobre, por possuir um conteúdo energético inferior quando comparado a outros combustíveis (como o gás de coqueria), ele pode ser empregado também com esta função em regeneradores no próprio alto-forno, nos fornos da coqueria ou da laminação e em termelétricas (HERNANDEZ *et al.*, 2018; FRANÇA, 2012). Para essa cogeração de energia elétrica, são utilizadas turbinas de recuperação de pressão de topo do forno, instaladas na saída do coletor de pó, que recebem o gás (após coletados os resíduos), são acionadas e, em seguida, transferem a sua força motriz para o gerador, que, por sua vez, a transforma em energia elétrica (BNDES, 2015).

O trabalho do BNDES (2015) destaca a aplicação de algumas tecnologias em unidades integradas a coque que podem proporcionar ganhos de eficiência energética em altos-fornos:

- O aumento da injeção de PCI para até 225kg/t proporciona uma redução alta das emissões, de até 35 kg CO₂/t de gusa; com uma alta economia de energia (outras fontes) de 0,57 GJ/t de gusa; com um custo de capital médio de US\$ 8,0/t de gusa e um *pay-back time* (tempo de retorno) curto, de 2,4 anos;
- O aumento da injeção de gás natural para até 140 kg/t proporciona uma redução alta das emissões, de até 55 kg CO₂/t de gusa; com uma alta economia de energia (outras fontes) de 0,90 GJ/t de gusa; com um custo de capital médio de US\$ 7,8/t de gusa e um *pay-back* curto, de 1,5 anos;
- A recuperação de gás de alto-forno proporciona uma redução baixa das emissões, de até 4 kg CO₂/t de gusa; com uma baixa economia de energia (outras fontes) de 0,07 GJ/t de gusa; com um custo de capital baixo de US\$ 0,47/t de gusa e um *pay-back* curto, de 0,8 anos;
- O uso de turbina de topo úmida proporciona uma redução média das emissões, de até 18 kg CO₂/t de gusa; com nenhuma economia de energia; com um custo de capital alto de US\$ 32/t de gusa e um *pay-back* muito longo, maior que 20 anos;
- A automação do processo de preaquecimento do ar de injeção proporciona uma redução média das emissões, de até 22 kg CO₂/t de gusa; com uma alta economia de energia (outras fontes) de 0,37 GJ/t de gusa; com um custo de capital baixo de US\$ 0,47/t de gusa e um *pay-back* curto, de 0,4 anos;
- A melhoria dos sistemas de automação e controle proporciona uma redução média das emissões, de até 25 kg CO₂/t de gusa; com uma alta economia de energia (outras fontes) de 0,40 GJ/t de gusa; com um custo de capital baixo de US\$ 0,56/t de gusa e um *pay-back* curto, de 0,4 anos.

A economia de energia de outras fontes refere-se a todos os outros tipos de energia do processo, exceto a elétrica, pois para esta, a economia em todos os tópicos

supracitados foi desprezível – com exceção ao uso da turbina que demonstrou uma economia elétrica baixa, de 0,11 GT/t de gusa (BNDES, 2015).

É importante ressaltar que as tecnologias que podem ser implementadas em uma planta para proporcionar uma melhoria da eficiência energética dependem das especificações de suas instalações, do seu gerenciamento e da integração de energia entre as etapas existentes (HE e WANG, 2017). Além disso, o autor ainda afirma que os períodos reais de retorno e economia de energia, de acordo com cada medida tomada, dependem de variáveis como configuração, tamanho e localização da planta, características operacionais e fornecimento local de matérias-primas e energia.

É fundamental também a transparência, clareza e acessibilidade aos dados, a fim de que possam ser analisados e discutidos para tomar qualquer que seja a decisão. Melhorar a coleta e o compartilhamento de dados, tanto nacional, quanto internacionalmente, pode auxiliar nos esforços de *benchmarking* (avaliação comparativa) despendidos, de forma a quantificar e qualificar melhor o que está sendo analisado.

Além das ações supradescritas para a melhoria da eficiência nas siderúrgicas, outras importantes medidas são os programas de treinamento para os colaboradores (em todos os níveis hierárquicos) e sensibilização dos *stakeholders* (partes interessadas) por meio de práticas mais sustentáveis.

Oportunidades de simbiose industrial (em que o uso de resíduos ou subprodutos de um processo agrega valor a outro setor industrial) devem ser aproveitadas e incentivadas, a fim de fechar o ciclo do material, reduzir o consumo de energia, água, demais matérias-primas e emissões de carbono. Essa interação entre os diferentes tipos de indústria proporciona não apenas uma maior lucratividade para elas, como também promove uma mudança de *mindset* em todas as esferas envolvidas e minimiza os impactos ambientais associados aos processos e/ou produtos.

É imprescindível também o envolvimento e incentivo do governo, bem como o estabelecimento de parcerias público-privadas, a fim de que mudanças possam ser concretizadas na estrutura do consumo de energia (CAMIOTO e REBELATTO, 2014), de fontes de matéria-prima renováveis, redução de emissões de carbono e aplicações de simbiose industrial.

Com relação ao controle ambiental (não só da produção de ferro-gusa, mas dos processos industriais em geral), ele deveria ser realizado pelas próprias empresas, por meio de todos os seus colaboradores, e pelos próprios *stakeholders* (em especial, os consumidores e fornecedores). Entretanto, como a sociedade ainda não atingiu esse patamar de *mindset*, é necessário que órgãos de controle ambiental (públicos e/ou privados) façam o seu papel de fiscalização e incentivo às práticas mais adequadas, até que a mudança de cultura seja, de fato, alcançada em todo o planeta.

Assim, diante das lacunas e oportunidades de melhorias identificadas, o Quadro 32 resume as principais diretrizes necessárias para que a produção de ferro-gusa se torne mais verde e sustentável.

Quadro 32: Diretrizes para um processo de ferro-gusa mais verde e sustentável

Diretrizes	Fonte
Recuperação/reciclagem do gás de alto-forno para o próprio processo siderúrgico	Hernandez <i>et al.</i> (2018); He e Wang (2017); BNDES (2015); França (2012)
Controle de combustão	Hernandez <i>et al.</i> (2018)
Otimização do processo por meio de automação	BNDES (2015)
Programa de treinamentos e sensibilização dos fornecedores	
Substituição de insumos/combustíveis: redução do uso de coque e aumento de PCI ou outros injetáveis (como alcatrão e gás natural)	Hernandez <i>et al.</i> (2018); He e Wang (2017); BNDES (2015); Motta (2011)
Utilização de biomassa como fonte carbonosa para a produção do gusa: como carvão de gramíneas, babaçu e rejeitos agrícolas	Yallico (2011); CGEE (2010)
Recuperação do calor da escória	BNDES (2015)
Cogeração de energia elétrica por meio do reaproveitamento de gases do processo com utilização de turbinas de topo	
Promoção de sistemas de gestão de energia e redes de aprendizados: garantir a aplicação, o compartilhamento e incentivo de boas práticas	IEA (2019); Camioto e Rebelatto (2014)
Transparência e acessibilidade aos dados referentes ao desempenho energético e emissões relacionadas ao uso da energia	IEA (2019)
Transparência, clareza e acessibilidade a todos os dados da planta: embasar as tomadas de decisões	Autoria própria
Melhoria na coleta e no compartilhamento de dados, tanto nacional, quanto internacionalmente: auxiliar nos esforços de <i>benchmarking</i> , de forma a quantificar e qualificar melhor o que está sendo analisado	Adaptado de IEA (2019)
Desenvolvimento, aplicação e incentivo de práticas de simbiose industrial	Autoria própria
Utilização do carbono dos gases residuais do processo produtivo para a fabricação de produtos químicos e combustíveis.	IEA (2019)
Sistemas de aspersão em pontos de transferência entre correias e estações de descarregamento de materiais	França (2012)
Sistema de drenagem superficial e subsuperficial adequado, que permita o reaproveitamento das precipitações pluviométricas	
Utilização da escória como coproduto siderúrgico: insumo na fabricação de cimento e agregados na construção civil	França (2012); Silva (2016); IEA (2019)
Mudança de <i>mindset</i> e atitudes que conduzam a ações sustentáveis	Autoria própria
Sistema eficiente de limpeza de gases	Silva (2016)
Restauração e reflorestamento de áreas devido ao extrativismo do carvão vegetal	Nações Unidas (2018)
Promoção ao uso de bioenergia sustentável	
Inclusão do ODS 15 nas propostas de alinhamento do Projeto Siderurgia Sustentável à Agenda 2030	Autoria própria
Síntese de produtos inofensivos ao ser humano e ao meio ambiente: buscar sempre o desenvolvimento de compostos degradáveis	
Destino adequado aos resíduos que não são mais possíveis de serem aproveitados em processos posteriores à sua produção	
Acompanhamento rigoroso do processo para evitar possíveis acidentes	
Utilização do pó de balão (quando proveniente de siderúrgicas à carvão vegetal) como fertilizantes organominerais	Silva (2016)
Reciclagem do pó de balão para o próprio processo siderúrgico	
Mistura do pó de balão em argilas para produção de tijolos	Ribeiro (2011)
Maior controle por parte dos órgãos de controle ambiental e dos consumidores	Camioto e Rebelatto (2014)
Realização de parcerias público-privadas e incentivos do governo para que mudanças na estrutura de consumos possam ser concretizadas	Adaptado de Camioto e Rebelatto (2014)

É importante ressaltar que as diretrizes apresentadas no Quadro 32, conforme discutidas neste trabalho, não são exclusivamente as formas que os processos produtivos de ferro-gusa devem ser realizados, uma vez que existem diversas variáveis que precisam ser consideradas em cada caso a ser avaliado. Contudo, essas diretrizes podem e devem ser utilizadas como guias, orientações norteadoras, que quando implementadas, adaptadas a cada situação específica, permitem uma melhoria nos processos e caminham em direção à sustentabilidade e mudança de mentalidade de todos os envolvidos.

Portanto, a busca por processos produtivos que atendam aos PQVs e ISs avaliados constitui um importante passo orientado à essa modificação comportamental da sociedade e vai ao encontro do cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável estabelecidos pela ONU – que, segundo a organização, devem ser atingidos até o ano de 2030. Assim, de acordo com Messerli (2019), a ciência é o coração do desenvolvimento sustentável e, as comunidades internacionais científicas, juntamente com as de engenharias, inspiradas e guiadas pela Agenda 2030, devem auxiliar na antecipação das consequências futuras e contribuir para encontrar caminhos para transformações sustentáveis.

5. CONCLUSÃO

A pressão de grupos sociais mais conscientes, da mídia e de organizações nacionais e internacionais direciona a busca por produtos e/ou processos que prezem pelo uso racional dos recursos e minimização dos impactos ambientais, devido às consequências que o contrário pode propiciar ao meio ambiente e à humanidade. Assim, o desenvolvimento de tecnologias, métodos e ferramentas que proporcionem produções que minimizem os impactos adversos gerados são as respostas para os desafios do século XXI e a chave do sucesso para a promoção do desenvolvimento sustentável. Por isto, a utilização de metodologias como a desenvolvida neste trabalho tem um papel fundamental de: (i) realizar análise do impacto ambiental de processos produtivos; (ii) comparar rotas produtivas distintas para um mesmo produto; e (iii) auxiliar no *design* de processos produtivos mais verde e sustentáveis.

A metodologia proposta estabeleceu métricas relacionadas aos 12 PQVs e ISs e as implementou em um programa computacional (Microsoft Excel®) para viabilizar o seu uso, de forma simples e prática, a fim de facilitar a avaliação ambiental de qualquer processo produtivo. Como este estudo mostrou que há uma lacuna relacionada a métodos que avaliem todos os PQVs em processos produtivos, em especial, para os de produção de ferro-gusa (pois não há evidências na literatura), a metodologia desenvolvida foi aplicada em dois estudos de caso de produção de gusa que utilizam fontes de carbonos diferentes (CVP e coque chinês).

De acordo com avaliação dos PQVs e ISs para cada rota produtiva estudada, os resultados mostraram que o processo que utiliza o CVP como fonte carbonífera apresenta melhor desempenho técnico e ambiental em relação ao que faz uso do coque chinês. As análises apresentaram 38% e 17% de atendimento aos PQVs e ISs, respectivamente, para o Caso A; e 42% de atendimento para as duas formas de avaliação para o Caso B. De tal modo, é importante ressaltar que nenhum dos processos estudados apresentou atendimento superior a 50% aos PQVs e ISs. Isto significa, portanto, que as rotas avaliadas possuem muitas lacunas e oportunidades de melhorias a serem implementadas em seus processos, tais como: uso de matérias-primas renováveis, síntese de produtos menos perigosos; mínimo consumo de energia e maior eficiência energética; desenvolvimento de compostos degradáveis; química

inerentemente mais segura para a prevenção de acidentes; redução no consumo específico de matéria-prima; redução na emissão de gases atmosféricos poluentes, em especial os óxidos de carbono; e reaproveitamento dos resíduos sólidos gerados. Assim, embora o setor metalúrgico tenha um papel fundamental no crescimento econômico de um país, é necessário que modificações nos processos produtivos sejam realizadas em prol da sustentabilidade.

Desta forma, com o propósito de nortear processos de produção de ferro-gusa mais verdes e sustentáveis, um conjunto de diretrizes foi estabelecido, baseado em contribuições da literatura e da própria análise dos estudos de caso deste trabalho. Esses direcionamentos, no entanto, não devem ser adotados como soluções exclusivas (uma vez que cada processo tem as suas especificidades), mas sim como orientações que, quando implementadas e adaptadas à realidade de cada empresa, proporcionem tanto melhorias técnicas nos processos, como impactos positivos nos âmbitos econômicos, sociais e ambientais envolvidos.

É importante ressaltar também que o uso de tecnologias, ferramentas e metodologias por si só não levará o mundo ao desenvolvimento sustentável. Para que isto aconteça e catástrofes naturais provocadas pela interferência humana sejam evitadas, é necessário que políticas de conscientização sejam promovidas em todos os níveis da sociedade e parcerias entre a academia, o governo e a indústria sejam estabelecidas, a fim de que trabalhem em conjunto por soluções criativas, inovadoras e sustentáveis.

Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se:

- Aplicação da metodologia proposta em outros tipos de processos produtivos, para que estes sejam analisados de acordo com os PQVs e ISs e diretrizes que minimizem os impactos ambientais possam ser fornecidas para o aprimoramento de seus processos;
- Pesquisas sobre a utilização de biomassa como fonte carbonífera em processos produtivos de ferro-gusa e sua posterior avaliação por meio da metodologia desenvolvida, a fim de que sejam comparados com as duas rotas analisadas neste estudo e comprovada ou não, sua superioridade em relação ao CVP e ao coque chinês;

- Estudo relacionado aos aspectos sociais e econômicos dos processos avaliados neste trabalho; e
- Análise dimensional das diretrizes propostas neste estudo para um processo de produção de ferro-gusa mais verde e sustentável de acordo com o investimento necessário e o tempo de retorno que cada uma dessas orientações proporciona às empresas do setor ao serem implementadas.

6. REFERÊNCIAS

- AÇO BRASIL. Instituto Aço Brasil. **Anuário estatístico**. Rio de Janeiro. 2019.
- ACS - Green Chemistry Institute. **12 Design Principles of Green Chemistry**. Disponível em: <<https://www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry/principles/12-principles-of-green-chemistry.html>>. Acesso em jan. de 2019.
- AGENDA 2030. Plataforma Agenda 2030. **A Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável**. Disponível em: <<http://www.agenda2030.org.br/sobre/>>. Acesso em: 18 fev. de 2020.
- ANASTAS, P., e EGHBALI, N. **Green Chemistry: principles and practice**. Disponível em: <<https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2010/cs/b918763b#cit17>>. Acesso em jan. de 2019.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Parte III Fontes Não-Renováveis. Capítulo 9 Carvão Mineral. Brasília. 2008.
- ANM. Agência Nacional de Mineração. **Sumário mineral 2017**. V. 37. Brasília – DF. 2017.
- BITTENCOURT, F. L. F. **Análise via CFD de um combustor industrial utilizado no processamento térmico de pelotas de minério de ferro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo - UFES. Vitória – ES, 2016.
- BNDES. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. **BNDES Setorial 41**, mar. De 2015.
- BOMFIM, M. R. Avaliação de impactos ambientais da atividade minerária. **Especialização de Mineração e Meio Ambiente**, 46p.; il. Universidade Federal do Recôncavo da Bahia – UFRB. Cruz das Almas – BA, 2017.
- BRASIL, **Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010**. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4o da Lei no 9.984, de 17 de julho de 2000. Brasília, DF. 2010a.

BRASIL, Siderurgia. Brasil 2010-2025. **Centro de Gestão e Estudos Estratégicos-CGEE. Brasília**, p. 116. 2010b.

BRASIL. Agência Nacional de Mineração. **Anuário mineral brasileiro: principais substâncias metálicas**. Brasília: ANM, 2018. 34 p.: il.

CALDERON, E.R. D. **Superfície de mínimo consumo de carbono do processo de redução em altos-fornos**. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos) - PUC-Rio. Rio de Janeiro – RJ, 2016.

CAMIOTO, F. C.; REBELATTO, D. A. N. Análise da contribuição ambiental por meio da alteração da matriz energética do setor brasileiro de ferro-gusa e aço. **Gestão & Produção**, v. 21, n. 4, p. 732-744, 2014.

ÇELIK, D.; YILDIZ, M. *Investigation of hydrogen production methods in accordance with green chemistry principles*. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, n. 36, p. 23395-23401, 2017.

CHALISE, A. **Selection of sustainability indicators for wastewater treatment technologies**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Concordia University. Montreal, Quebec, Canadá, 2014.

CHAVES, E. L. *et al.* **Gestão ambiental do gás do alto forno e avaliação dos sistemas de controle atmosféricos de siderúrgica, viabilizando um sistema de geração de energia elétrica**. Dissertação (Mestrado Profissionalizante em Engenharia Ambiental com Ênfase em Gestão Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. Florianópolis – SC, 2013.

CMMAD, Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento. **Nosso Futuro Comum**. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 1991.

CONAMA, **Resolução nº 1, de 23 de janeiro de 1986, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-IBAMA**; Publicada no Diário Oficial da União em 17/02/1986; Brasília, DF.

DE MONTELLANO, P. R. O. *1-Aminobenzotriazole: A mechanism-based cytochrome P450 inhibitor and probe of cytochrome P450 biology*. **Medicinal Chemistry**, v. 8, n. 3, 2018.

DEVIerno KREUDER, A. *et al.* *A method for assessing greener alternatives between chemical products following the 12 principles of green chemistry*. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 5, n. 4, p. 2927-2935, 2017.

EL HAGGAR, S. *Sustainability of Industrial Waste Management*. **Sustainable industrial design and waste management: cradle-to-cradle for sustainable development**, p. 307-369. Academic Press, 2007.

EMBRAPA. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel-ods/o-que-sao-os-ods>>. Acesso em: 12 nov. de 2019.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Balço Energético Nacional 2019: ano base 2018**. Relatório final, 15 anos; Rio de Janeiro – EPE, 2019.

ESTRATÉGIA ODS. **O que são os ODS?** Disponível em: <<http://www.estrategiaods.org.br/o-que-sao-os-ods/>>. Acesso em: 12 nov. de 2019.

EVANGELISTA, A. T. *et al.* **Princípios da química verde e a produção de ferro-gusa: uma revisão integrativa**. Centro Universitário SENAI CIMATEC. Salvador – BA, 2019.

FERREIRA, V. F. *et al.* Química Verde, Economia Sustentável e Qualidade de Vida. **Revista Virtual de Química**, v. 6, p. 85-111, 2014.

FICK, G. *et al.* *Using biomass for pig iron production: a technical, environmental and economical assessment*. **Waste and Biomass Valorization**, Springer. Van Godewijckstraat 30, 3311 Gz Dordrecht, Netherlands, p. 43-55, 2014.

FOGAÇA, J.R. V. **Produção de ferro**. Disponível em: <<https://alunosonline.uol.com.br/quimica/producao-ferro.html>>. Acesso em: 22 mar. de 2020.

FRANÇA, A. L. F. **Minimização do consumo de água e da geração de efluentes líquidos em siderurgia**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Rio de Janeiro – RJ, 2012.

GALLOPÍN, G.C. *Indicator and their use: information for decision-making. part one-introduction*, p. 13-27 in: Moldan, B and S. Bilharz (Eds). **Sustainability Indicators. A Report on the Project on Indicators of Sustainable Development**. Scope 58. Wiley, Chichester, 1997.

HE, K.; WANG, L. *A review of energy use and energy-efficient technologies for the iron and steel industry*. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 70, p. 1022-1039, 2017.

HERNANDEZ, A. G. et al. *How resource-efficient is the global steel industry?* **Resources, Conservation and Recycling**, v. 133, p. 132-145, 2018.

HUBER. **Limestone**. Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico - FISPQ. 2015.

IEA, *International Energy Agency*. **Atlas da eficiência energética**. Relatório de Indicadores - 15 anos. Brasil, 2019.

IIMA - *International Iron Metallics Association*, **Pig iron**. Disponível em: <<https://www.metallics.org/pig-iron.html>>. Acesso em abr. de 2019.

IUPAC - *International Union of Pure and Applied Chemistry*. **Green chemistry and sustainable development**. Disponível em: <<http://www.incaweb.org/transit/iupacgdir/overview.htm>>. Acesso em 20 de ago. de 2019.

KRAJNC, D.; GLAVIČ, P. *Indicators of sustainable production*. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 5, n. 3-4, p. 279-288, 2003.

KUHLMAN, T.; FARRINGTON, J. *What is Sustainability?* **Sustainability**, v.2, n. 11, p. 3436-3448, 2010.

LENARDÃO, E. J. "Green Chemistry" - Os 12 princípios da química verde e sua inserção nas atividades de ensino e pesquisa. **Química Nova**, v. 26, n. 1. São Paulo, jan./feb. de 2003.

LONG, Y. et al. *A sustainability assessment system for Chinese iron and steel firms*. **Journal of Cleaner Production**, v. 125, p. 133-144, 2016.

LOSFELD, 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.

LOSFELD, G. 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.

MA. Ministério da Saúde, Secretaria de Atenção à Saúde. **Pneumoconioses**, 76 p. Departamento de Ações Programáticas Estratégicas. Brasília: Editora do Ministério da Saúde, 2006.

MALARD, A. A. M. **Avaliação ambiental do setor de siderurgia não integrada a carvão vegetal do estado de Minas Gerais**. Dissertação (Mestrado em Sustentabilidade Socioeconômica e Ambiental) – Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP. Ouro Preto – MG, 2009.

MCDIC. Ministério da Economia, Indústria, Comércio Exterior e Serviços. **Legislação Aço**. Disponível em: < <http://www.mdic.gov.br/index.php/legislacao/9-assuntos/categ-comercio-exterior/478-metallurgia-e-siderurgia-2>>. Acesso em 02 de mar. de 2020.

MEIRELLES, S. L. **Química Verde: a indústria e seus impactos na indústria de construção**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Rio de Janeiro – RJ, 2009.

MELDAU, D.C. **Pulmão negro**. Disponível em: < <https://www.infoescola.com/doencas/pulmao-negro/>>. Acesso em: 04 dez. de 2019.

MELLO, M. C. **Análise do impacto ambiental na produção de biodiesel via rotas: metilica alcalina e etilica enzimática**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Rio de Janeiro – RJ, 2014.

MENDO, J. C. **Desenvolvimento de estudos para elaboração do plano duodecenal (2010 - 2030) de geologia, mineração e transformação mineral**. Projeto de Assistência Técnica ao Setor de Energia. Relatório Técnico 59 - Perfil do Ferro-Gusa, 2009.

MESSERLI, P. *et al.* **Global sustainable development report 2019: the future is now – science for achieving sustainable development**. Nova Iorque – EUA, 2019.

MESTRES, R. *Química Sostenible: Naturaleza, fines e ámbito Química Verde e Sustentável: Natureza, Objetivos e Escopo*. **Educación Química**, v. 24, p.103-112, 2013.

METINVEST INTERNATIONAL ITALIA S.R.L. **Iron furnace / pig iron - safety data sheet**. *Safety Data Sheet*, 2011.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Acordo de Paris**. Disponível em:<<https://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris>>. Acesso em 07 de jan. de 2020. 2020a.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Efeito estufa e aquecimento global**. Disponível em: < <https://www.mma.gov.br/informma/item/195-efeito-estufa-e-aquecimento-global>>. Acesso em 17 de mar. de 2020. 2020b.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Poluentes atmosféricos**. Disponível em: < <https://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/qualidade-do-ar/poluentes-atmosfericos.html>>. Acesso em 17 de mar. de 2020. 2020c.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Protocolo de Quioto**. Disponível em: < <https://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/protocolo-de-quioto.html>>. Acesso em 19 de mar. de 2020. 2020d.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Siderurgia sustentável**, jul. de 2016. Disponível em: < <https://www.mma.gov.br/informma/itemlist/category/220-clima-politica-nacional-sobre-mudanca-do-clima-siderurgia-sustentavel>>. Acesso em 20 de jan. de 2020

MME. Ministério de Minas e Energia. **Anuário estatístico do setor metalúrgico**. Ano base 2019. 2019a.

MME. Ministério de Minas e Energia. **Boletim do setor mineral**, outubro de 2019. 2019b.

MOTTA, R. S. N. **Automação e controle industrial de sistemas de injeção de carvão pulverizado em altos-fornos**, 242 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI. Itajubá – MG, 2011.

MRE. Ministério das Relações Exteriores. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)**. Disponível em: < <http://www.itamaraty.gov.br/pt-BR/politica-externa/desenvolvimento-sustentavel-e-meio-ambiente/134-objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel-ods>>. Acesso em 18 de mar. de 2020.

NAÇÕES UNIDAS, Brasil. **17 Objetivos para transformar nosso mundo**. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/pos2015>>. Acesso em: 12 de nov. de 2019.

NAÇÕES UNIDAS, Brasil. **Siderurgia sustentável desenvolve cadeia de produção com baixa emissão de poluentes**, out. de 2018. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/siderurgia-sustentavel-desenvolve-cadeia-de-producao-com-baixa-emissao-poluentes/>>. Acesso em: 20 de jan. de 2020.

NEVES, L.P. **Legislação federal brasileira em segurança de barragens comentada**. E-book. Brasília. 2018.

NOLDIN JR, J. H. **Contribuição ao estudo da cinética de redução de briquetes auto-redutores**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, PUC-Rio. Rio de Janeiro – RJ, 2002.

NOLDIN JR, J. H. *et al.* Flexibilidade de matérias-primas no processo Tecnored. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 3, n. 3, p. 22-27, 2007.

NOLDIN JR, J. H. **Modelo termoquímico da auto-redução em fornos de cuba**. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica) – Departamento de Ciências dos Materiais e Metalurgia, PUC-Rio. Rio de Janeiro – RJ, 2007.

OECO. **O que são INDCs**. Dicionário Ambiental. Rio de Janeiro, out. 2015. Disponível em: <<https://www.oeco.org.br/dicionario-ambiental/o-que-sao-as-indcs/>>. Acesso em: 07 de fev. de 2020.

PACO, L. J. M. **Cinética da redução de pelotas de minério de ferro em condições simuladas de um reator MIDREX**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – PUC-Rio. Rio de Janeiro – RJ, 2005.

PETROBRAS. **Coque - Informações técnicas**. Assistência Técnica, 2015.

PETROBRAS. **Coque verde de petróleo** - Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos - FISPQ. 2018.

PETROBRAS. **Coque verde de petróleo**. Disponível em: <<http://www.br.com.br/pc/produtos-e-servicos/para-industrias/coqueverdedepetroleo>>. Acesso em fev. de 2019.

PNUD, Brasil. **Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável - dos ODM aos ODS**. Disponível em: < <https://www.br.undp.org/content/brazil/pt/home/post-2015.html>>. Acesso em: 18 fev. de 2020.

PRESCOTT-ALLEN, R. *Barometer of sustainability. What it's for and how to use it*. **World Conservation Union (IUCN): Gland, Switzerland**, 1996.

RIBEIRO, E. D.L. **Estudo comparativo entre sistemas de limpeza de gases de alto-forno em siderúrgicas não-integradas a carvão vegetal e alternativa de reaproveitamento do pó do balão**. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de

Minas) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Belo Horizonte – MG, 2011.

Rosenfeld, P. E.; Feng, L. G. H. *Iron, Steel, and Coke. Risks of Hazardous Wastes*, p. 83–94, 2011.

SDGs. *Sustainable Development Goals. Main milestones*. Disponível em: <<https://sustainabledevelopment.un.org/resourcelibrary>>. Acesso em: 22 jan. de 2020.

SEEG. Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa. **Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para metas do Brasil 1970-2018**. Relatório-síntese. Observatório do Clima, novembro de 2019.

SEEG. Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa. **Emissões dos setores de energia, processos industriais e uso de produtos**. Período 1970 – 2016. Documento de Análise 2018. Observatório do Clima e Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA), 2018.

SILVA, C. S. W. **Avaliação ambiental decorrente do uso agrícola de resíduos do sistema de limpeza de gases de uma indústria siderúrgica a carvão vegetal**. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa – UFV. Viçosa – MG, 2007

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 4ªEd. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Florianópolis – SC, 2005.

SILVA, H. P. S. **Efeito da adição de pó de balão na combustibilidade do carvão pulverizado injetado no alto-forno**. Dissertação (Mestrado em Física de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP. Ouro Preto – MG, 2016.

SILVA, J.N. S. **Siderurgia**. Caderno elaborado em parceria entre o Instituto Federal de Educação e Tecnologia do Pará (IFPA- Belém) e a Universidade Federal de Santa Maria para o Sistema Escola Técnica Aberta do Brasil (e-Tec Brasil), 110p. Belém do Pará – PA, 2011.

SINDIFER - Sindicato da indústria de ferro gusa do estado de Minas Gerais. **Anuário estatístico 2019, ano base 2018**. Disponível em: <http://www.sindifer.com.br/institucional/anuario/anuario.php>. Acesso em 20 jan. de 2020.

SINGH, R. K. et al. *Development of composite sustainability performance index for steel industry. **Ecological Indicators***, v. 7, n. 3, p. 565-588, 2007.

SIRENE. Sistema de Registro Nacional de Emissões. **Emissões**. Disponível em: < <https://sirene.mctic.gov.br/portal/opencms/index.html>>. Acesso em: 07 fev. de 2020.

SOUSA, C.S. **Análise exergética do processo de produção de ferro-gusa em altos-fornos: identificação de oportunidades em redução de emissões de gases de efeito estufa**. Dissertação (Mestrado Profissional em Tecnologia Ambiental) - Faculdade de Aracruz. Aracruz – ES, 2010.

STREZOV, V. et al. *Defining sustainability indicators of iron and steel production. **Journal of Cleaner Production***, v. 51, p. 66-70, 2013.

UNIFAL. **Comissão permanente de prevenção e controle de riscos ambientais**. UNIFAL – MG. Disponível em: < <https://www.unifal-mg.edu.br/riscosambientais/perigoseriscos>>. Acesso em: 04 dez. de 2019.

UYTTEBROEK, M et al. *Sustainability metrics of 1-butanol. **Catalysis Today***, v. 239, p. 7-10, 2015.

VICTORIA. **Coal coke - safety data sheet**. *Safety Data Sheet*, 2010.

WORLDSTEEL. *World steel in figures. **World Steel Association***, p. 17, 2019.

YALLICO, Y.G.P. **Reatividade comparativa de coque, carvão mineral, carvão vegetal e coque verde de petróleo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos) – PUC-Rio. Rio de Janeiro – RJ, 2011.

PRODUÇÃO TÉCNICA E CIENTÍFICA

- Apresentação no **IX Encontro da Escola Brasileira de Química Verde (EEBQV) 2019** – Universidade Federal de Uberlândia (UFU):
 - EVANGELISTA, A. T.; PESSOA, F. L. P.; CALIXTO, E. E. S. **Análise do Impacto Ambiental do Processo de Produção do Ferro-gusa por meio dos Princípios da Química Verde**. Uberlândia – MG, 2019.
 - Trabalho qualificado entre os cinco melhores apresentados – menção honrosa.
- Artigo publicado no **V Simpósio Internacional de Inovação e Tecnologia 2019 – SIINTEC**– SENAI CIMATEC
 - EVANGELISTA, A. T.; PESSOA, F. L. P.; CALIXTO E. E. S.; MIRRE, R. C.; MOREIRA, Y. U. C. G. B. **Princípios da Química Verde e a Produção de Ferro-gusa: uma Revisão Integrativa**. Centro Universitário SENAI CIMATEC, Salvador – BA, 2019.
 - Revisão Integrativa da Literatura – Ferro-gusa e Princípios da Química Verde.
- *Abstract* aceito na **2019 AIChE Annual Meeting** – Orlando, Flórida
 - EVANGELISTA, A. T.; PESSOA, F. L. P.; CALIXTO, E. E. S. **Analysis of the Environmental Impact of the Pig Iron Production Process by the 12 Principles of Green Chemistry**. Orlando – FL, 2019.
 - Contudo, infelizmente, não houve representação no evento e o trabalho não pode ser submetido.
- Apresentação no **IV Seminário de Avaliação de Pesquisa Científica e Tecnológica (SAPCT) e III Workshop de Integração e Capacitação em Processamento de Alto Desempenho (ICPAD)** – SENAI CIMATEC:
 - EVANGELISTA, A. T.; PESSOA, F. L. P.; CALIXTO, E. E. S. **Análise do Impacto Ambiental do Processo de Produção do Ferro-gusa por meio de Métricas Relacionadas aos 12 Princípios da Química Verde**. Centro Universitário SENAI CIMATEC, Salvador – BA, 2019.
 - Seminário de apresentação de trabalhos dos bolsistas do SENAI CIMATEC.

ANEXO