



Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ  
Programa de Engenharia Ambiental - PEA

**BRYAN LUIZ SILVEIRA Sipião**

**ANÁLISE MULTICRITÉRIO PARA AVALIAÇÃO DE RISCOS  
AMBIENTAIS: ESTUDO DE CASO NA SIDERURGIA**

Rio de Janeiro  
2019

BRYAN LUIZ SILVEIRA SIPIÃO

**ANÁLISE MULTICRITÉRIO PARA AVALIAÇÃO DE RISCOS  
AMBIENTAIS: ESTUDO DE CASO NA SIDERURGIA**

Dissertação de Mestrado para a área de Segurança Ambiental apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Assed Naked Haddad

Rio de Janeiro  
2019

SIPIÃO, Bryan Luiz Silveira

Análise multicritério para avaliação de riscos ambientais:  
estudo de caso na siderurgia / Bryan Luiz Silveira Sipião – 2019.  
65 f.: il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica e Escola de Química, Programa de Engenharia Ambiental, Rio de Janeiro, 2019.

Orientador: Assed Naked Haddad

1-Indústria siderúrgica. 2-desenvolvimento sustentável. 3-Coqueria. Análise de riscos. I. Haddad, Assed Naked. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola Politécnica e Escola de Química. III. Mestrado.

BRYAN LUIZ SILVEIRA SIPIÃO

## **ANÁLISE MULTICRITÉRIO PARA AVALIAÇÃO DE RISCOS AMBIENTAIS: ESTUDO DE CASO NA SIDERURGIA**

Dissertação de Mestrado para a área de Segurança Ambiental apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Aprovada em:

---

Prf. Assed Naked Haddad, D.Sc., UFRJ

---

Isaac Luquetti, D.Sc., UFRJ

---

Christine Kowal Chinelli, D.Sc., UFF

---

Fabien Roualult, D.Sc., PUC Chile

Dedico cada minuto investido nessas páginas à minha família, alicerce de toda a minha educação, perseverança e fé.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus a gratidão por todas as bençãos, lições e anjos posicionados no caminho.

Aos meus pais, Hélvio e Sirlene, por tornarem-se meus grandes exemplos de como o trabalho traz nobreza ao homem, e como a perseverança e a paciência nos levam longe.

À minha querida irmã, Jéssica, por seu carinho e por fazer de mim seu herói, mesmo quando era o contrário que ocorria.

À minha lindíssima esposa Aline, por tornar meus sonhos ainda maiores e elaborados e por vibrar com cada conquista.

Ao orientador e amigo Assed, que além da grande paciência e conselhos sábios, sempre se esforçou para nos prover as melhores oportunidades.

À grande amiga Marília Caldeira, que me acompanhou em grande parte desta pesquisa e me inspirou com sua visão diferenciada do mundo.

Aos amigos da CSN, principalmente meus gestores Glauco Sant'Anna e Aldo Santana, que acreditaram no meu trabalho e ainda mais nos meus estudos.

À amiga e eterna orientadora Daniella Mulinari, que me tornou pesquisador e propiciou oportunidades inigualáveis na minha vida profissional e pessoal.

Por fim, aos amigos que tiveram a paciência de entender esta etapa da minha vida, onde os corriqueiros fins de semana foram substituídos por horas de leitura, reflexão e redação.

À CSN pelo apoio institucional e à UFRJ por toda a estrutura que possibilitou essa realização.

*“O saber a gente aprende com os mestres e  
os livros. A sabedoria se aprende é com a vida  
e com os humildes”.*

*Anna Lins dos Guimarães Peixoto Bretas  
(Cora Coralina)*

## RESUMO

A indústria siderúrgica é uma das mais importantes e fundamentais do mundo e seu crescimento está diretamente associado ao desenvolvimento e ao retorno da prosperidade à economia global. Entretanto, os impactos ambientais dessa indústria permanecem praticamente inalterados e o processo de coqueificação de carvão é um dos principais responsáveis por isso. Historicamente, os dados sobre esse processo e seus riscos, impactos e problemas ambientais têm sido pouco desenvolvidos, desta forma, este trabalho objetivou o estabelecimento de uma análise multicritério para avaliar a sustentabilidade de diferentes processos de coqueria, considerando os princípios de engenharia de resiliência e segurança de processo. Este trabalho foi realizado em três etapas principais. Primeiro, foram propostas métricas qualitativas, baseadas em princípios de engenharia de resiliência e métricas quantitativas ambientais, econômicas e sociais já consolidadas. Em seguida, foi realizada uma análise multicritério através de uma metodologia baseada no desempenho em sustentabilidade, cuja abordagem considera que os indicadores qualitativos e quantitativos podem influenciar na determinação das melhores alternativas tecnológicas. Esse método foi aplicado às três tecnologias mais comuns de produção de coque (forno de coque com subproduto completo, forno de coque com subproduto incompleto e tecnologia de recuperação de calor de forno de coque), com base em dados de uma grande indústria siderúrgica do sudeste brasileiro. Os resultados mostraram que o processo de coqueria com recuperação de calor é considerado a alternativa mais sustentável e segura em comparação com os outros dois processos analisados e o com piores indicadores é o coque com subproduto completo. O uso dessas métricas por meio da análise multicritério permitiu verificar entre as alternativas tecnológicas, que apresentam os melhores resultados do ponto de vista dos pilares da sustentabilidade, partindo de indicadores ambientais, sociais e econômicos, a fim de permitir uma abordagem mais assertiva da tomada de decisão estratégica.

**Palavras-chave:** Indústria siderúrgica; desenvolvimento sustentável; coqueria; análise de riscos.

## ABSTRACT

Steel industry is one of the most important and fundamental industries in the world and its growth is directly associated with economic development and the return of prosperity to the global economy. However, the environmental impacts of this industry remain practically the same as in the past and the coal coking process is one of the main responsible for this. Historically, data about this process and their risks, environmental impacts and problems have been poorly developed. Thus, this paper aims to propose a multicriteria analysis to evaluate the sustainability of different coking process, considering resilience engineering and process safety principles. This work was carried out in two main steps. First, it was proposed qualitative metrics, based on resilience engineering principles and defined environmental, economic and social quantitative metrics. Then, it was carried out a multicriteria analysis through a sustainability performance-based methodology whose approach considers that both the qualitative and the quantitative indicators can influence on the determination of the best alternatives. This method was applied to the three most common coke production technologies (coke oven with complete by-product, coke oven with incomplete by-product and coke oven heat-recovery technology), based on data from a large steel industry in the Brazilian southeastern. The results showed that the heat-recovery coke oven process is considered the most sustainable alternative compared to the other two processes analyzed and the less sustainable is the complete by-product coke oven. The use of these metrics using multicriteria analysis allowed us to verify among the technological alternatives, which presents the best results from the standpoint of sustainability pillars, starting from environmental, social and economic indicators, in order to allow a more assertive approach to decision making strategic and sustainable way.

**Keywords:** Steel industry; sustainable development; coking oven; risk analysis.

## **LISTA DE SIGLAS**

APP – Análise Preliminar de Perigos

HAZOP – Hazard and Operability Studies

LOPA – Layers of Protection Analysis

RMA – Risk Matrix Approach

FN – Fatalidade vs Número de Pessoas

MCDA – Multicriteria Decision Aid

PMI – Project Management Institute

CCPS – Chemical Process Safety Institute

IABr – Instituto Aço Brasil

GCO – Gás de Coqueria

SSEP – Seven Sustainable Engineering Principles

LCA – Life Cycle Assessment

EIA – Environmental Impact Assessment

PEI – Potential Environmental Impact

MAC – Multicriteria Analysis

## **LISTA DE FIGURAS**

<a href="#"><u>Figura 1 - Matriz de risco original (Fonte: Ni et al. 2010).</u></a>	3
<a href="#"><u>Figura 2 - Produção mundial de aço (Fonte: World Steel Association).</u></a>	19
<a href="#"><u>Figura 3 - Produção chinesa de aço (Fonte: World Steel Association).</u></a>	19
<a href="#"><u>Figura 4 - Produção de aço no Brasil (Fonte: World Steel Association).</u></a>	20
<a href="#"><u>Figura 5 - Fluxograma simplificado de produção do processo siderúrgico.</u></a>	21
<a href="#"><u>Figura 6 - Balanço de massa simplificado do Processo A (Coqueria com limpeza total do GCO) (Fonte: Autores, 2019).</u></a>	37
<a href="#"><u>Figura 7 - Balanço de massa simplificado do Processo B (Coqueria com limpeza parcial do GCO) (Fonte: Autores, 2019).</u></a>	38
<a href="#"><u>Figura 8 - Balanço de massa simplificado do Processo C (coqueria Heat-Recovery) (Fonte: Autores, 2019).</u></a>	39
<a href="#"><u>Figura 9 - Processo carboquímico de referência, com processamento de alcatrão de hulha e destilaria de amônia (Fonte: Autores, 2019).</u></a>	40
<a href="#"><u>Figura 10 - Mapa de Compliance dos processos ao SSEP.</u></a>	46
<a href="#"><u>Figura 11 - Contribuição de severidade e grau de sustentabilidade das tecnologias avaliadas.</u></a>	48

## **LISTA DE TABELAS**

<u>Tabela 1 – Comparativo entre diretrizes para um Sistema de Gestão de Riscos.</u>	17
<u>Tabela 2 - Análise comparativa entre o SSEP e os demais critérios de engenharia sustentável e química verde (Fonte: Autores, 2019).</u>	27
<u>Tabela 3 - Critérios quantitativos para sustentabilidade.</u>	33
<u>Tabela 4 - Dados dos processos de coqueração utilizados na modelagem do estudo.</u>	35
<u>Tabela 5 - Grau de <i>Compliance</i> dos processos ao SSEP.</u>	43

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b><u>INTRODUÇÃO</u></b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<u>Apresentação do problema</u>	1
<b>1.2</b>	<u>Justificativa</u>	4
<b>1.3</b>	<u>Objetivos</u>	6
<b>1.4</b>	<u>Metodologia</u>	7
<b>1.5</b>	<u>Estrutura da Dissertação</u>	8
<b>2</b>	<b><u>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</u></b>	<b>9</b>
<b>2.1</b>	<u>Segurança Ambiental e Sustentabilidade</u>	9
<b>2.2</b>	<u>Princípios da engenharia verde, da química verde e da sustentabilidade</u>	11
<b>2.3</b>	<u>Metodologias de Análise Multicritérios para a tomada de decisões</u>	14
<b>2.4</b>	<u>Gestão de Riscos e Diretrizes em Segurança de Processos</u>	15
<b>2.5</b>	<u>Panorama de Siderurgia no Brasil e no Mundo</u>	18
<b>2.6</b>	<u>Sustentabilidade na indústria Siderúrgica</u>	20
<b>2.7</b>	<u>Processo de Coqueificação: desafio para a sustentabilidade na siderurgia</u>	23
<b>2.8</b>	<u>Indicadores de sustentabilidade aplicados ao processo de coqueificação</u>	25
<b>3.2</b>	<u>Métricas Quantitativas de Sustentabilidade</u>	32
<b>4</b>	<b><u>PROCEDIMENTO DE ANÁLISE MULTICRITÉRIO</u></b>	<b>35</b>
<b>4.1</b>	<u>Etapa 1 - Pontuar as alternativas de processo de acordo com o SSEP</u>	41
<b>4.2</b>	<u>Etapa 2 - Pontuar métricas quantitativas.</u>	41
<b>4.3</b>	<u>Etapa 3 - Computar a Matriz de Severidade (ou Matriz Multicritério)</u>	41
<b>4.4</b>	<u>Etapa 4 - Computar o Fator de Criticalidade e o Grau de Sustentabilidade</u>	42
<b>5</b>	<b><u>RESULTADOS DAS ANÁLISES MULTICRITÉRIOS</u></b>	<b>43</b>
<b>6</b>	<b><u>CONCLUSÃO</u></b>	<b>49</b>
	<b><u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u></b>	<b>52</b>

# **1 INTRODUÇÃO**

## **1.1 Apresentação do problema**

A Segurança de Processos se desenvolveu nas últimas cinco décadas para uma ampla disciplina que abrange o conhecimento aprofundado das propriedades das substâncias perigosas, as características das instalações técnicas e os recursos de segurança dos componentes dessas instalações, abordando por meio do pensamento conceitual os fatores organizacionais como a gestão do processo e das pessoas (PASMAN *et al*, 2012).

A sofisticação dos atuais meios de produção, utilizando produtos químicos perigosos em pressões e temperaturas supercríticas, aumentou ainda mais a necessidade de desenvolvimento de métodos ágeis e eficientes para avaliar o custo-benefício dessas tecnologias no que diz respeito aos seus riscos, seja para as pessoas, para o meio ambiente ou para o próprio capital de uma organização. Diversas técnicas, qualitativas e quantitativas, foram desenvolvidas para avaliar o potencial de dano de determinados sistemas ou tecnologias, requerendo mão de obra com alta especialização, grupos de profissionais multidisciplinares e tempo.

Considerando a velocidade das transformações e inovações tecnológicas, as recentes técnicas e tecnologias para construção civil e os diversos meios para aporte de capital dos mais variados investidores, o tempo de construção ou implantação de uma tecnologia, fábrica ou outra unidade industrial foi acelerada, requerendo análises cada vez mais velozes que pudessem validar com alto grau de eficiência a segurança de um empreendimento, requerendo de analistas e especialistas em Segurança de Processos e Sustentabilidade uma certa celeridade nas discussões e veredito sobre o potencial ou não desses projetos causarem uma catástrofe ou serem rentáveis o suficiente para valer o investimento mesmo convivendo com um alto risco operacional, de forma que esse pudesse ser gerenciado. Menos tempo para as análises significa que muitas das mais famosas técnicas utilizadas ao longo das últimas décadas estão se tornando obsoletas ou complexas demais, não encontrando apoio do empreendedor.

ou mesmo carecem de uma visão holística com foco em todas as facetas da sustentabilidade.

Dessa forma, é natural o desenvolvimento de técnicas cada vez mais completas e ágeis que possibilitem a realização mais abrangente de análises de riscos sem, obviamente, perder o rigor técnico. Dessa forma, a busca por técnicas que possibilitem diagnósticos mais completos e detalhados das rotinas operacionais seguras é uma prioridade para diversos setores da indústria.

A opinião sobre os procedimentos, diretrizes e critérios para Gerenciamento dos Riscos divide opiniões, além de contar com um número considerável de técnicas para cada uma de suas fases, essas para os mais diversos usos e focos de estudos que tem por objetivo principal a redução das perdas e maximização dos ganhos dos processos. Quando a conclusão é extrapolada para o tema preservação ambiental e sustentabilidade, o gerenciamento dos riscos deve considerar os possíveis aspectos e impactos ambientais advindos das tecnologias empregadas utilizando todas as técnicas e tecnologias disponíveis para identificar, substituir ou controlar os riscos para o meio ambiente e para a população ainda na fase conceptiva do projeto, aumentando assim o desempenho das análises e gerenciamento dos riscos.

Apesar de tratar-se de um tema em ascensão em todos os ramos da ciência e da indústria, como riscos financeiros, riscos de segurança do trabalho, riscos hospitalares e os mais conhecidos riscos de projeto, todas tem um denominador comum, a utilização de metodologias com critérios que, muitas vezes, são subjetivos a ponto de depender da expertise dos profissionais, da disponibilidade e formato dos dados para análise e da técnica escolhida para o resultado desejado. Qualquer desvio durante a fase de identificação e avaliação do risco pode pôr a perder todo o processo de gerenciamento deles.

Como se trata de um processo demorado e com certo nível de experiência e conhecimento técnico sobre os métodos de análise, as análises dos riscos muitas vezes contam com técnicas qualitativas ou semiquantitativas que tem por objetivo a segregação dos riscos de maior possibilidade de danos daqueles com menor capacidade de impacto, a exemplo da Análise Preliminar de Perigos (APP), Estudo de

Perigos e Operabilidade (HAZOP em inglês) e a técnica LOPA, algumas das ferramentas mais comuns. Muitas dessas ferramentas utilizam modelos de Matrizes de Riscos que levam, em sua maioria, conceitos abstratos ou abrangentes que dão espaço para interpretações variadas e dependem demais da experiência dos profissionais para se obter resultados com alta confiabilidade. Por exemplo, a matriz de risco original tem um defeito significativo que, quando aplicado a um caso específico, às vezes riscos diferentes podem compartilhar o mesmo nível de risco. Esses riscos são chamados de vínculos de risco, resultantes de duas grandes limitações da RMA, a saber, a classificação não meticulosa do índice de risco (apenas três níveis qualitativos) e o mecanismo de avaliação prescritiva baseado no processo de cálculo subjetivo da implicação lógica. A existência de vínculos de risco torna o resultado da avaliação vago, porque eles não contribuem para toda a diferenciação dos riscos de entrada em termos de criticidade (Ni *et al.*, 2010).

Critical	M	H	H	H	H
Serious	M	M	M	H	H
Moderate	L	M	M	M	H
Minor	L	L	M	M	H
Negligible	L	L	L	M	M
Origin	0.00~0.10	0.10~0.40	0.40~0.60	0.60~0.90	0.90~1.00

Figura 1 - Matriz de risco original (Fonte: Ni *et al.* 2010).

Em contrapartida à afirmação anterior, e em prol da redução das incoerências nas análises de riscos, muitos pesquisadores tem proposto modelos quantitativos ou semiquantitativos complexos que de fato apresentam uma série de ferramentas para redução das incertezas, mas tornam moroso ou dispendioso o processo de avaliação dos riscos, reduzindo sua praticidade quando na aplicação para identificação dos riscos para indústrias, corporações ou projetos de grande porte que trabalhem com prazos muito curtos ou equipes inexperientes. Podemos mencionar a análise de riscos pelo método Monte Carlo, o uso das curvas FN para expressar o grau de exposição das

pessoas ao risco e mesmo a aplicação de lógica difusa (Lógica Fuzzy) nas já mencionadas matrizes de riscos, buscando uma previsão das maiores tendências sobre as variáveis analisadas, além de possibilitar uma análise de sensibilidade dos dados e uma análise de incertezas.

As organizações ficam, dessa forma, transitando entre análises de risco incertas ou morosas, o que impossibilita ou desestimula sua aplicação de maneira continuada e sistêmica, tornando caótico o processo de gerenciamento dos riscos. Faz-se necessário, desta forma, a apresentação métodos medianos em complexidade, que exijam dados comuns à organização para seu julgamento, mas que sejam coerentes e confiáveis o suficiente para extinguir ou diluir os julgamentos subjetivos alcançados em análises qualitativas e semiquantitativas de riscos. Quando tais conclusões são transportadas para uma análise de tecnologias ambientalmente seguras, esse universo torna-se ainda mais restrito. Muitas vezes, as técnicas utilizadas contam mais com os dados sobre impacto para pessoas, sendo extremamente subjetivas para análise dos riscos aos ecossistemas.

## **1.2 Justificativa**

Duas motivações foram consideradas no desenvolvimento deste estudo. A primeira diz respeito ao processo de análise dos riscos que, dependendo da técnica utilizada, consideram os aspectos e os impactos ambientais de uma forma subjetiva. Significa que, depende diretamente do compromisso da organização ou dos profissionais que a executam, com a preservação ambiental, para estar devidamente calibrada para considerar a escolha da melhor tecnologia de produção. Soma-se a isso o fato de que as técnicas de análise de riscos mais comuns e praticadas pelos órgãos de controle ambiental brasileiros estão focadas nos impactos das liberações agudas de materiais e energias perigosas para a população, sem considerar as constantes transgressões para o meio ambiente. A exemplo dos órgãos ambientais dos estados do Rio de Janeiro e São Paulo, duas grandes referências brasileiras, que ao cobrarem nos processos de licenciamento ambiental a avaliação dos riscos, focam seus resultados apenas na exposição das pessoas aos riscos, carecendo de métricas ou indicadores

que definam o potencial ambiental das emissões dessas tecnologias em caso de acidentes industriais, ou mesmo consideram separadamente os resultados das análises dos riscos durante o processo de avaliação e caracterização das tecnologias mais eficientes.

Outra motivação foi encontrada na abordagem e resultados apresentados na aplicação das técnicas de Análise Multicritérios. Abordadas nas próximas seções, essas técnicas tem como principal ponto forte a integralização de diversas informações em uma escala única comparativa que tem por objetivo verificar quais das opções, em um projeto, processo ou qualquer outro tipo de escolha técnica, reúna a maior quantidade possível de pontos positivos, tendo em vista que todas elas podem ser devidamente pontuadas por sua significância, dependendo do planejamento estratégico da corporação ou das leis, normas ou requisitos de suas partes interessadas. Sendo assim, torna-se um recurso perfeito para o atendimento às considerações realizadas no parágrafo anterior, podendo reunir os resultados de análises de riscos à outros indicadores de sustentabilidade e avaliar, em uma única vez, os processos que reúnem desempenho financeiro, sustentabilidade ambiental e social, além de bons requisitos de segurança antes mesmo de sua implantação.

Para que fosse possível avaliar o quanto aplicável a fusão desses dois conceitos seria na tomada de decisão para uma empresa com alto potencial poluidor, foram gentilmente cedidas informações por uma empresa do setor siderúrgico brasileiro, para a qual a avaliação de desempenho econômico, ambiental e social poderia mostrar-se ao garantir um resultado seguro na tomada de decisões pela escolha da melhor tecnologia. Dessa forma, e sob orientação do apoiador, foram utilizados resultados sobre o processo de coqueificação do carvão siderúrgico atualmente aplicado na empresa e este comparado com outras tecnologias disponíveis no mercado para essa mesma função, isso porque o processo de fabricação do coque, além de ser imprescindível ao processo siderúrgico, é responsável por uma boa parcela dos custos (em torno de 30% do custo total da placa de aço) e dos aspectos e impactos ambientais desse processo, sendo ainda mais urgente resultados atualizados e métodos eficientes de comparação para futuras atualizações tecnológicas ou mesmo na construção de novas instalações.

Apesar de ser este o case escolhido para o desenvolvimento dessa pesquisa, os resultados pretendidos foram projetados para serem devidamente aplicados em qualquer setor produtivo que, em seu ciclo de vida, empreguem substâncias ou energias perigosas em quantidades suficientes para causar grandes impactos ambientais.

### **1.3 Objetivos**

Para um registro metódico da ciência aplicada no presente estudo, foi necessário o desenvolvimento de objetivos coerentes com o tema e tempo de seu desenvolvimento. Partindo do universo amostral já discorrido, foi definido um objeto de estudo e a este aplicado o conhecimento adquirido na revisão bibliográfica da qual foi selecionado um método de análise de riscos multicritério maleável o suficiente para permitir a inclusão dos parâmetros mínimos consistentes com uma análise de riscos, conforme os registros consultados.

Com base no exposto, foi definido como objetivo principal e específico do estudo a proposição de Critérios Heurísticos aplicados junto ao método Multicritério proposto por Araújo (2015) para a análise de sustentabilidade da população em estudo, levando-se em consideração como fator primordial os dados sobre os riscos de acidentes e seus potenciais impactos no meio ambiente e para a sociedade. Para aumentar a aplicabilidade e escalabilidade do modelo, foram determinados fatores sociais e econômicos que deveriam pesar na análise de sustentabilidade de forma a torná-la mais coerente com as decisões socioeconômicas requeridas neste tipo de estudo.

Para atingir o objetivo principal proposto, foram definidas fases (metas) em forma de objetivos específicos, a saber:

- 1 - Selecionar Critérios Heurísticos de Sustentabilidade consolidados na literatura mundial. Com base nos critérios definidos, propor um conjunto de critérios heurísticos próprios para julgamento da aderência de cada tecnologia avaliada (população amostral) aos indicadores de segurança ambiental e sustentabilidade;
- 2 - Selecionar indicadores de riscos e sustentabilidade que possam auxiliar na

quantificação da aderência de cada tecnologia aos critérios previamente definidos;

3 - Propor métrica, indicador ou pontuação de comparação dos resultados da segunda fase, considerando o peso de cada um dos indicadores desenvolvidos e dos critérios heurísticos selecionados; e

4 - Aplicar a metodologia proposta a um processo (tecnologia) na forma de estudo de caso, elencando os resultados e possibilitando a verificação da eficácia do método proposto incluindo, mas não se limitando a, pontos positivos e negativos do ponto de vista da avaliação de riscos ambientais e sociais, dentro da análise de sustentabilidade da tecnologia em estudo.

#### **1.4 Metodologia**

A pesquisa foi desenvolvida em caráter aplicado, considerando uma abordagem qualitativa e quantitativa com o objetivo de tornar-se um texto explicativo. Para tal, valeu-se de estudo de caso da aplicação dos métodos e conceitos aqui abordados em um processo operacionalmente ativo e com grande potencial de riscos à segurança ambiental e social. Pode-se dividir a metodologia aqui aplicada em cinco etapas:

1 Levantamento Bibliográfico: Para expor todos os dados necessários ao entendimento dos conceitos e técnicas aplicados, bem como iniciar uma abordagem explicativa sobre o tema proposto, foi realizada uma revisão bibliográfica sistemática e focada nos objetivos definidos. Para isso, foram levantados artigos científicos, dissertações, teses e relatórios elaborados por instituições de ensino e empresas do setor público e privado. A pesquisa foi realizada na base Science Direct do portal Periódicos Capes e em sites nacionais e internacionais. Os dados técnicos sobre a tecnologia analisada no estudo de caso foram retirados de uma empresa de capital privado que gentilmente cedeu as informações.

2 Desenvolvimento de critérios heurísticos de sustentabilidade: A partir do levantamento bibliográfico foi possível definir quais seriam os critérios qualitativos realmente significativos para a aplicação do método proposto e a construção de seus conceitos, calibrando corretamente o conceito de segurança ambiental incorporado

como mais um dos critérios para a sustentabilidade.

3 Definição de indicadores quantitativos que fariam par aos critérios qualitativos propostos. Para isso, foram varridos os principais indicadores de sustentabilidade e de desempenho econômico e social das empresas brasileiras, bem como sugeridos novos indicadores que somariam ao atingimento do objetivo proposto.

4 Propor métrica para a comparação dos critérios qualitativos e seus respectivos indicadores quantitativos em uma única escala comparativa, objetivando facilitar as conclusões da metodologia de tomada de decisões.

5 Estudo de caso: Por fim, foi realizado um estudo de caso utilizando a ferramenta proposta com a finalidade de verificar sua aplicabilidade e eficiência.

## **1.5 Estrutura da Dissertação**

Facilitando o entendimento ao estudo proposto, os capítulos foram divididos de maneira a tornar a leitura mais objetiva e intuitiva possível. Desta forma, os capítulos abordam os temas conforme especificado:

- No Capítulo 2 são apresentadas as fundamentações teóricas sobre os conceitos de segurança ambiental e sobre sustentabilidade. São abordados os principais problemas sobre análises de riscos ambientais e a deficiência dos atuais métodos em possibilitar uma análise integrada entre a parte financeira, social e ambiental. Também foram abordadas informações sobre os critérios de sustentabilidade mais comuns, além de informações sobre o processo selecionado para aplicação do estudo de caso (população em estudo);
- No Capítulo 3 estão expostos os princípios por trás da criação dos critérios qualitativos das métricas de sustentabilidade e segurança ambiental propostas (Critérios Heurísticos de Sustentabilidade). Também são caracterizadas as métricas quantitativas associadas a cada uma das métricas qualitativas;
- O Capítulo 4 guarda a metodologia de Análise Multicritério selecionada, abordando suas nuances, seu memorial de cálculo e a origem dos dados técnicos utilizados para aplicação do modelo;

- O Capítulo 5 apresenta os resultados alcançados com a aplicação da técnica, explicando cada um dos conceitos e sua influência nos resultados; e
- Por fim, no Capítulo 6, estão apresentadas as conclusões do estudo.

Um capítulo adicional não numerado é acrescentado ao final relacionando as referências utilizadas na dissertação.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 Segurança Ambiental e Sustentabilidade**

O conceito de sustentabilidade ou desenvolvimento sustentável foi definido pela primeira vez em 1987 pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, através do Relatório de Brundtland, como “o desenvolvimento que procura satisfazer as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade das gerações futuras em satisfazerem suas próprias necessidades”.

Este conceito tem sido interpretado e traduzido por diversos pesquisadores desde sua primeira definição, levando a diferentes perspectivas, como por exemplo a sustentabilidade corporativa. Um dos conceitos de sustentabilidade mais reconhecidos e adotados é o conceito de *“triple bottom line”*, o qual propõe um balanço entre os aspectos econômicos, sociais e ambientais na performance de um negócio (LONG et al., 2016).

Assim, o modelo mais aceito atualmente, é o de que a tomada de decisão de um projeto no ambiente corporativo deve considerar não somente a habilidade dele de promover lucro, mas também deve reconhecer as implicações ambientais e sociais desta decisão que podem afetar o processo de tomada de decisão como um todo (ABRAHAM, 2006).

Muitas empresas têm adotado o desenvolvimento sustentável como um core business e para a implementação deste conceito em seus processos é preciso identificar indicadores de sustentabilidade e compreender como eles podem ser medidos ao longo do tempo para determinar se tem ocorrido progresso (SCHWARZ; BEAVER, 2002).

Nesse contexto, Neto e Derani (2014), definem que enquanto a noção de desenvolvimento sustentável visa buscar o equilíbrio ideal entre a produção econômica e a manutenção das condições de vida, a de segurança ambiental constitui-se em limite irretratável àquela produção, determinado por critérios técnicos que visem à proteção ambiental e à sua perenidade, fora de qualquer barganha política. De acordo com esses autores, pode-se classificar a Segurança Ambiental como um limite à produção, determinada por critérios técnicos que visem a proteção ao meio ambiente e à sua

preservação.

Logo, é correto afirmar que devem-se empregar técnicas e métodos diferenciados para alcançar a segurança ambiental, mas de forma alguma esses resultados são distintos à noção de sustentabilidade, visto que impactariam diretamente no braço econômico do conceito "*triple bottom line*". A busca pela integração da segurança ambiental como conceito aplicado à noção de sustentabilidade, conta com propostas metodologias com foco na mensuração e delimitação dos limites operacionais aceitáveis, elevando a preservação ambiental em um patamar de maior valor em relação ao capital.

A análise de sustentabilidade de um negócio conta com diversas técnicas e métodos para estabelecer o atingimento das metas firmadas, sempre com base em referências normativas ou organizacionais interdependentes e focados na preservação dos recursos e longevidade do negócio. Tais técnicas contam com um diversificado conjunto de critérios propostos para avaliar a sustentabilidade de um processo de forma qualitativa e, também, muitos indicadores ambientais, sociais e econômicos para mensurar a sustentabilidade destes processos de modo quantitativo. No entanto, há poucas abordagens para unificar estes indicadores quantitativos com os qualitativos. Muitos pesquisadores têm utilizado análise multicritério para cobrir essa falta (ARAÚJO et al, 2015). Existe uma lacuna ainda maior na integração entre os conceitos de segurança ambiental (paralela ao conceito de segurança de processo) com as análises de sustentabilidade.

Quando é necessário unificar indicadores que representam conceitos distintos, buscando melhor entender as alternativas tecnológicas para o desenvolvimento de um processo produtivo, deve-se buscar o desenvolvimento, antes de qualquer procedimento, de um conjunto de métricas qualitativas que priorizem ou sirvam para pontuar o quanto esses indicadores e os processos analisados estão aderentes ao objetivo do processo e de suas partes interessadas (internas e externas). Algumas métricas qualitativas de sustentabilidade, também conceituadas como critérios ou princípios, são os Princípios da Química Verde, Princípios da Engenharia Verde e os Princípios da Engenharia Sustentável.

De acordo com Abraham (2006), os conceitos de Química Verde, Engenharia

Verde e Sustentabilidade têm se incorporado uns aos outros para promover um conjunto de termos que frequentemente são usados para descrever ideias similares, na qual há uma sobreposição destes vários conceitos em relação as questões ambientais, no entanto não há uma hierarquização dos mesmos pois todos estes termos representam perspectivas diferentes para as soluções e desafios ambientais. No entanto, a química verde e a engenharia verde não englobam os impactos e contextos sociais, levando assim, ao conceito de Engenharia Sustentável, a qual tem a habilidade de incorporar as implicações sociais nas decisões de negócios, avaliando as três dimensões do “*triple bottom line*”. Soma-se a isso e à abrangência do conceito, a possibilidade de incorporação das nuances da Segurança Ambiental como um dos fatores contribuintes ao atingimento da sustentabilidade.

## **2.2 Princípios da engenharia verde, da química verde e da sustentabilidade**

Os conceitos aqui abordados são de extrema importância, visto que sua aplicação em diversos estudos e políticas construíram a noção moderna de sustentabilidade. O que pode ser denominado como Química Verde, por exemplo, é definido como o design, estudo, desenvolvimento e confecção de processos e produtos químicos com foco na redução ou eliminação do uso de substâncias perigosas, nocivas à saúde das pessoas e aos ecossistemas. Alguns autores, como Lenardão *et al.* (2003), atribuem esse conceito às tecnologias “limpas”, e denotam sua vasta aplicação em países com forte desenvolvimento da indústria química ou que praticam rigorosos controles ambientais. Além disso, esse é um termo que vem sendo gradativamente incorporado por instituições de ensino em seus cursos.

O ideal da Química Verde visa a garantia da substituição de processos químicos com grande potencial de danos ambientais por processos não poluentes ou com baixo potencial de impacto, incorporado tanto nos equipamentos quanto nos próprios produtos.

Os princípios produzidos pelo conceito de química verde, listados com excelência por Lenardão *et al.* (2003), podem ser divididos em três grupos, e seus conceitos encontrados a seguir:

- Uso de fontes renováveis de matéria-prima;
- Aumento da eficiência energética, ou redução de seu uso na produção da mesma quantidade de materiais (produtos); e
- Evitar, ao máximo, a utilização de substâncias cumulativas ou de difícil depuração pelo ambiente, bem como as tóxicas de efeitos diversos.

Os principais pontos da química verde, sutilmente inseridos em cada categoria mencionada, são doze:

1. Prevenção na geração de resíduos;
2. Economia de átomos, moléculas mais simples são preferíveis às complexas;
3. Síntese de produtos menos perigosos;
4. Desenho de produtos seguros. Com menor toxicidade ou geração de subprodutos tóxicos;
5. Solventes e auxiliares mais seguros;
6. Eficiência de energética;
7. Uso de fontes renováveis de matéria-prima;
8. Evitar a formação de derivados;
9. Primar por reagentes catalíticos tão seletivos quanto possíveis, em detrimento aos estequiométricos;
10. Design com foco na degradação acelerada da substância;
11. Análise em tempo real para a prevenção da poluição; e
12. Desenho de processos intrinsecamente seguros para a prevenção de acidentes.

Em contrapartida e com ideais semelhantes, mas princípios distintos, está a Engenharia Verde. Embora possa variar em detalhes de um setor a outro do mercado, a Engenharia Verde possui alguns conceitos alinhados por todos que são aqui

mencionados, isso para que seja possível comparar seu ideal com o da Química Verde e extrapolar seus conceitos para outros Critérios Heurísticos de Sustentabilidade.

A principal ideia da Engenharia Verde está na proposta de que tem mais sentido conceber um projeto para ser ambientalmente amigável desde seu início, ao invés de projetar modificações e atualizações para essa finalidade. A outra ideia principal reside na proposta de fazer as coisas de forma simples. Parece um conceito demasiadamente simples, mas muitos autores reforçam sua importância na preservação ambiental. Se o projeto incorpora mais simplicidade e menos passos para seu desenvolvimento, a chance para que suas funções saiam do controle e causam os devidos impactos são relativamente menores. Isso porque quanto maior a complexidade, mais matéria e energia são empregadas para sua concepção e certa robustez será devida para controlar suas funções, além disso, maior será a geração de resíduos em seu descarte. É importante pontuar o quanto esse conceito se assemelha ao primeiro princípio da Química Verde. Semelhante à química verde, os doze princípios da Engenharia Verde são:

1. Inerente ao invés de circunstancial;
2. Prevenção em vez de tratamento;
3. Projeto para Separação;
4. Maximize a eficiência;
5. Saída puxada versus entrada empurrada;
6. Conservar a complexidade;
7. Durabilidade em vez de imortalidade;
8. Atenda às necessidades, minimize o excesso;
9. Minimize a diversidade de materiais;
10. Integre fluxos de material e energia;
11. Design para "vida após a morte" comercial; e
12. Renovável em vez de esgotar.

Assim como a química verde está voltada para o desenvolvimento de produtos químicos e processos, está a engenharia verde para o desenvolvimento de produtos e projetos diversos. Tomando por base esses conceitos, intimamente alinhados com o moderno conceito de sustentabilidade, também é possível desenvolver qualquer outra

combinação deles que valha para os processos que tenham interesse em uma análise de sustentabilidade.

Alguns dos conceitos abordados até estão intimamente relacionados com a Segurança de Processo, predecessor da Segurança Ambiental e distinta dessa apenas por estar voltada para as questões ambientais de forma isolada. E como mencionado anteriormente, uma das maneiras de cruzar esses conceitos qualitativos com indicadores quantitativos que possam medi-los, é através do uso de metodologias de Análise Multicritério.

### **2.3 Metodologias de Análise Multicritérios para a tomada de decisões**

Quando é necessário abordar diversos pontos, dados e conceitos em uma única análise, vale o uso de Métodos Multicritério de Apoio à Decisão (ou *Multicriteria Decision Aid* – MCDA, em inglês). Lopes (2008) define, ao recorrer a outros autores para classificar essas técnicas, esse princípio como a busca ou estabelecimento de uma relação de preferência, muitas vezes subjetivas, entre alternativas desejadas para um determinado fim, quando sob a influência de vários critérios.

São diversas as ferramentas com a função distinta de prover uma análise comparativa elencando diversas informações sobre as opções possíveis em um processo e tais técnicas são muito utilizadas em gestão de projetos. Cidad e Manzani (2015) utilizam desta técnica para a avaliação de riscos em projetos, explorando o potencial de previsão desses riscos para a prevenção de suas ocorrências e mitigação dos impactos de forma a não causar grandes danos ou nenhum dano ao negócio.

Lopes (2008), já havia proposto técnica semelhante na análise dos riscos de instalações de gasodutos. Outro exemplo foi o uso, por Weber (2012) que realizou ensaios sobre a influência desses modelos no gerenciamento de riscos de projetos, aplicando seus conceitos dentro das diretrizes do *Project Management Institute* – PMI (Instituto para Gerenciamento de Projetos).

Obviamente, a escolha do método multicritério está totalmente associada à complexidade do problema e suas devidas soluções, não apenas esses, mas à coleta, disponibilidade, qualidade dos dados e os objetivos esperados para essa solução. Isso

reforça a ideia de quão variável essas técnicas podem ser e quanto compromisso com sua aplicação, delimitando conceitos e métricas fortes para sua qualidade, são importantes. Trata-se então, de um conjunto de técnicas que auxiliam diretamente na organização e apresentação das informações, na avaliação das consequências e na redução das surpresas após a tomada de decisão.

As maiores oportunidades para aplicação das Metodologias de Análise Multicritério se encontram onde existem conflitos (políticos, sociais, jurídicos) entre os critérios ou interpretações ambíguas nos dados ou medições utilizadas como referências. Também podem ser utilizadas quando há grandes diferenças de opiniões entre as partes, servindo como uma ferramenta de intermediação na escolha com certo nível de confiança para ambos os pontos de vista.

Não se deve, sob qualquer perspectiva, garantir a resolução ideal de um problema por meio de análise multicritério, isso porque não existem soluções preestabelecidas para nenhuma problemática relacionada à decisões, tudo dependerá do contexto sob o qual a análise está sendo conduzida e o *timing* para a aplicação das alternativas disponíveis, o que pode considerar recursos financeiros, físicos, mão de obra, tempo, leis e pressões sociais, dentre outros que possam interferir em um processo natural de decisão.

Métodos multicritérios podem ser diferenciados pela capacidade de considerar tanto critérios quantitativos como qualitativos, além disso, permitem a análise da decisão e ainda testam sua confiabilidade. Outro aspecto característico das metodologias de apoio à tomada de decisão é a fase de estruturação do problema na qual são levantadas todas as ações juntamente com os aspectos positivos e negativos destas, seguido da fase de avaliação do problema aonde são realizadas as compensações entre os pontos positivos e negativos (GOFFI, 2017).

Todas essas características fazem do MCDA um excelente recurso na integralização das métricas de segurança ambiental nas análises de sustentabilidade, e serão utilizados na proposta desta pesquisa com essa finalidade.

## **2.4 Gestão de Riscos e Diretrizes em Segurança de Processos**

Dentre os mais variados usos da palavra risco, sem dúvida o mais usual é o seu emprego na expressão “Gestão de Riscos” (*Risk Assessment*), permeando os mais diversos ramos de negócio, das ciências e do cotidiano das pessoas, tendo como um dos seus maiores desenvolvimentos a área de gestão de processos industriais que contém, processam ou armazenam substâncias químicas ou energias perigosas em sua dinâmica operacional.

A norma ISO 31.000, de 2009 – Gestão de Riscos, define Gestão de Riscos como um conjunto de “atividades coordenadas para dirigir e controlar uma organização no que se refere a riscos” (ISO, 2009), apesar de abrangente essa definição abriu um leque de oportunidades para que várias corporações desenvolvessem requisitos mínimos para a incorporação dos riscos como fatores inerentes à competitividade do negócio.

Valendo-se do já conhecido conceito de riscos e pautado no desenvolvimento de métodos, experiência de vários profissionais e boas práticas de mercado, o *Center for Chemical Process Safety Institute* – CCPS, organismo Norte Americano responsável por condensar e disseminar conhecimentos sobre o assunto, foi além e introduziu, em seu livro Diretrizes para Segurança de Processo Baseada em Risco uma noção mais focada na segurança industrial, a Gestão de Segurança de Processo, e o definiu como “um sistema focado na prevenção, prontidão, mitigação, resposta, restauração de liberação catastrófica de produtos ou energia de um processo relacionado a instalação” (CCPS, 2014).

Em sua obra, o CCPS definiu uma série de diretrizes e conceitos voltados ao desenvolvimento, em todas as fases do negócio, de um sistema de Gestão dos Riscos pautado na identificação dos cenários de risco, no compromisso da gestão com tais riscos, na assertividade das ações de gestão e no aprendizado continuo sobre os riscos que por ventura possam se desenvolver durante o Ciclo de Vida do processo. Os elementos de segurança de processo do CCPS para o desenvolvimento da Segurança de Processo Baseada em Riscos, e que são largamente utilizados em todo o mundo, podem ser divididos em quatro categorias:

- Diretrizes para o desenvolvimento do compromisso de toda a organização com a segurança do processo;
- Pleno entendimento dos riscos e perigos;
- Gestão eficiente dos riscos mapeados e priorização das ações de resposta ao risco; e
- Aprendizado contínuo a partir da experiência.

Traçando um paralelo entre as orientações do CCPS é possível alinhar seus conceitos e diretrizes com os requisitos mínimos para um sistema de gestão de riscos orientado pela norma ISO 31.000. Assim, comparando-as:

Tabela 1 – Comparativo entre diretrizes para um Sistema de Gestão de Riscos.

Diretrizes CCPS	Diretrizes ISO 31.000
Diretrizes para o desenvolvimento do compromisso de toda a organização com a segurança do processo.	Estabelecimento de um contexto organizacional.
Pleno entendimento dos riscos e perigos.	Processo de avaliação de riscos.
Gestão eficiente dos riscos mapeados e priorização das ações de resposta ao risco.	Tratamento dos riscos.
Aprendizado contínuo a partir da experiência.	Monitoramento e análise crítica.

Tem-se então, uma uniformidade quanto às orientações dos requisitos básicos de um sistema de gestão de riscos. No entanto, o desenvolvimento de cada uma das fases se mostra desafiador sendo, do ponto de vista tecnológico, o processo de identificação e avaliação de riscos o mais complexo por conta do dinamismo dos processos e das interações com partes interessadas, visto que o cenário para operação de cada processo está em constante mudança, além disso, existe a entropia naturalmente incorporada na manutenção dos sistemas de risco, exigindo das corporações altíssimo grau de atenção e comprometimento com os cenários críticos de risco.

Essa característica de processos com altíssimos riscos deve, portanto, ser analisada logo no princípio de sua concepção como projeto, e a aplicação de ferramentas com o objetivo de realizar uma análise direta em toda a tecnologia ao invés

de executar análises detalhadas iniciais em cada uma delas é o principal desafio das corporações, que por carecerem de técnicas eficientes para o apoio à definição de tecnologia, acabam sendo unilaterais no uso de critérios, sendo o financeiro/econômico o mais comum. Quando isso acontece, os fatores ambientais e sociais acabam por serem negligenciados, tornando-se motivo de custos elevados à posteriori.

Quando aplicadas as diretrizes de segurança de processo, com foco na preservação ambiental, é possível alcançar a materialização do termo Segurança Ambiental e essa abordagem acaba por ser a mais recente aposta das corporações no atingimento das metas de sustentabilidade, principalmente por levar em consideração tantos fatores socioeconômicos aos quais as corporações estão expostas.

## **2.5 Panorama de Siderurgia no Brasil e no Mundo**

A metalurgia é a ciência da extração dos metais partindo de seus minérios, preparando-os para os diversos usos aos quais são necessários. A metalurgia do ferro consiste, basicamente, na redução dos seus óxidos por meio de um redutor que, em geral, é um combustível carbonoso.

Dentre as diversas matérias-primas necessárias à produção do aço, a mais importante é o minério de ferro, tanto em quantidade, quanto em custo. O Brasil possui uma das maiores reservas de minério de ferro do mundo: acima de 49 bilhões de toneladas.

O ferro ocorre na natureza, sob diversas formas de minerais. Entretanto, apenas algumas dessas têm valor comercial como fontes de ferro. Dentre esses, os diversos minerais formados por óxidos de ferro representam a grande maioria das fontes de ferro para a indústria siderúrgica.

Dentro da metalurgia, a siderurgia é uma subdivisão de grande destaque. Considerada uma indústria de base, a siderurgia se dedica a fabricação e tratamento de aços e ferros fundidos, podendo ser considerada um dos processos industriais mais importantes e fundamentais para a economia de um país. Os produtos siderúrgicos são matérias-primas para os mais diversificados produtos manufaturados.

O aço é o material mais utilizado na indústria. O aço é uma liga ferro com baixo teor de carbono. Apresenta-se em diversas formas e especificações, objetivando atender à demanda de variados setores como a indústria automobilística, construção civil, máquinas e equipamentos, eletrodomésticos, utilidades domésticas, embalagens, recipientes etc.

Seria, obviamente, impossível fazer uma lista completa de tudo aquilo em que se usa aço, uma vez que podemos encontrá-lo em todo tipo de projeto. O aço é a base para um número infinito de produtos desenvolvidos pela indústria. De forma geral, a produção mundial de aço vem crescendo vertiginosamente ao longo das últimas duas décadas, sendo que nos últimos 10 anos apresentou um aumento de 30% (Figura 2), no qual grande parte pode ser atribuída à China (Figura 3), que conseguiu atingir a marca de quase 100% da sua produção anual instalada.

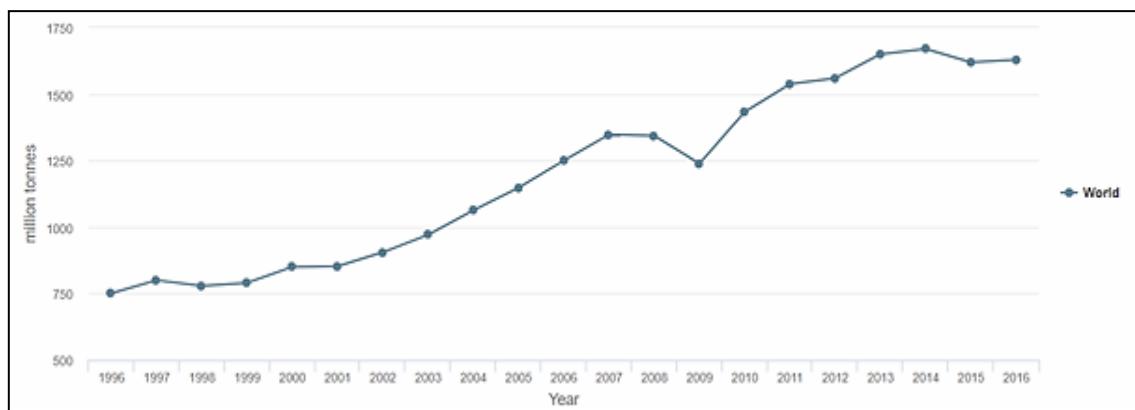


Figura 2 - Produção mundial de aço (Fonte: World Steel Association).

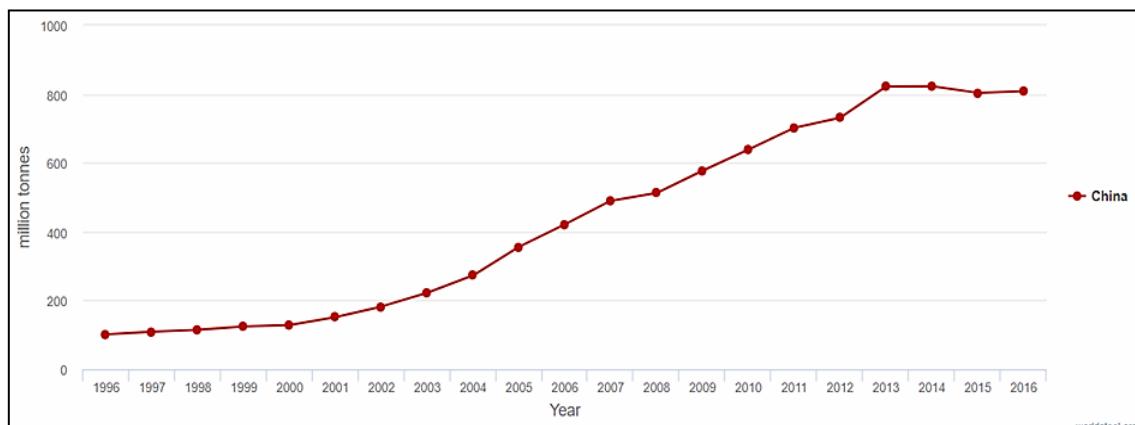


Figura 3 - Produção chinesa de aço (Fonte: World Steel Association).

De acordo com o Ministério de Minas e Energia (MME,2017), a produção nacional de aço bruto em 2015 foi de 33,3 milhões de toneladas, correspondendo a 2% da produção mundial neste mesmo ano, colocando o país na posição de 8º maior produtor mundial.

No entanto, o Brasil vem apresentando um decréscimo de produção em relação aos anos anteriores, conforme apresentado pela Figura 4. A intensidade das quedas no desempenho dos indicadores da indústria brasileira foi atribuída pelo Instituto Aço Brasil – IABr a um cenário difícil devido à manutenção da convergência de fatores estruturais e conjunturais, dos quais o enfraquecimento do mercado interno foi o que causou o principal impacto.

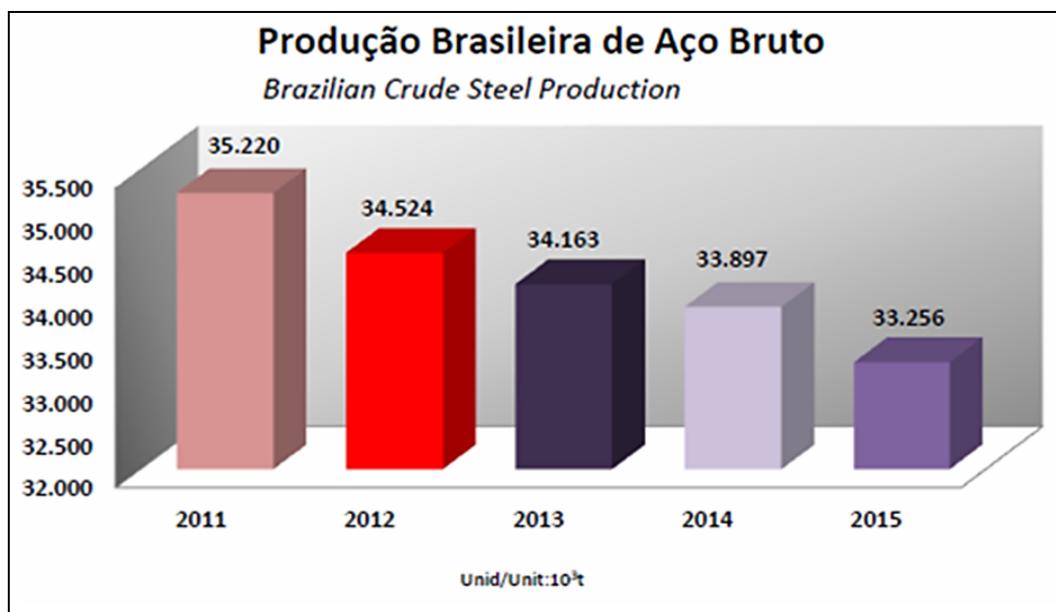


Figura 4 - Produção de aço no Brasil (Fonte: World Steel Association).

Dante disso, a resposta direta para o mercado brasileiro seria a intensificação das exportações. Para isso, o país precisa de isonomia competitiva, teoricamente proporcionada pela compensação de tributos não recuperáveis das exportações e redução dos custos de financiamento. Sob ponto de vista técnico, o aço brasileiro precisa preservar ou elevar seus critérios de qualidade reduzindo ao máximo os custos de produção associados às operações e aos encargos ambientais e sociais.

## 2.6 Sustentabilidade na indústria Siderúrgica

Recuperar a competitividade da indústria siderúrgica brasileira começa no entendimento profundo do processo e seus fluxos produtivos, suas matérias primas, energias e especificidades. O processo é composto pelas etapas ilustradas por meio do fluxograma apresentado na Figura 5.

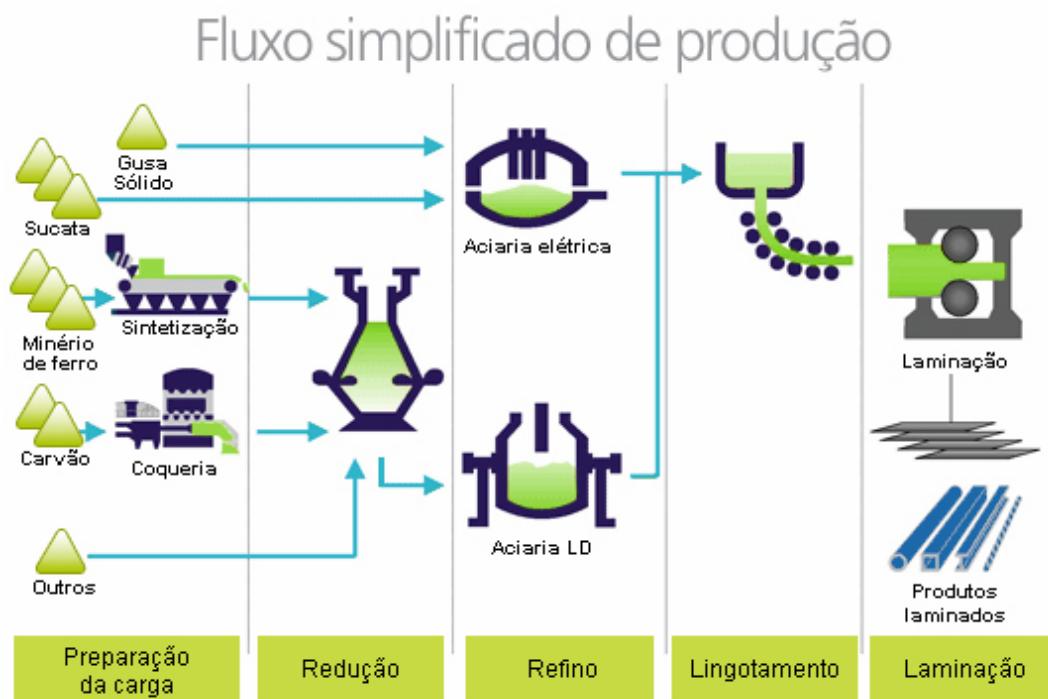


Figura 5 - Fluxograma simplificado de produção do processo siderúrgico.

Dentre as etapas supracitadas, deve-se ressaltar o processo de coqueificação do carvão mineral nos fornos da coqueria. Neste processo, o carvão mineral é craqueado para ser utilizado como agente redutor do minério de ferro, recebendo o nome de coque e possibilitando a extração do oxigênio e a utilização do ferro na forma de gusa nos processos subsequentes. Ressalta-se que, além de proporcionar a continuidade do negócio, a produção de coque influencia em aproximadamente 30% do custo total do aço produzido.

Do ponto de vista operacional, a siderurgia eleva ao extremo as questões ambientais, sociais e econômicas, ao lidar com processos agressivos com grandes cargas de matéria prima e elevadas temperaturas e pressões de trabalho.

Dentre os atuais desafios da indústria siderúrgica, talvez um dos maiores seja a redução de suas emissões de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Essa preocupação é abordada a nível global, pois alcançar as metas de redução estabelecidas demanda colaboração entre as empresas e inovações tecnológicas que sejam competitivamente tangíveis.

O uso eficiente de recursos, reutilização e reciclagem são imperativos para o desenvolvimento sustentável deste setor, que busca reduzir o impacto do aço durante todo o ciclo de vida dos produtos, o uso de subprodutos, reciclagem, energia e gerenciamento de água.

O aumento da eficiência das matérias primas e produtos é parte integrante do processo moderno de fabricação de aço, sendo objetivo global utilizar todas as matérias-primas em sua capacidade total, garantindo o mínimo de desperdícios. Esta ambição garante que quase todos os subprodutos formados durante a fabricação de aço sejam usados em novos produtos, minimizando a quantidade de resíduos enviados para aterros sanitários, reduzindo as emissões e preservando as matérias-primas.

Outro exemplo é o uso eficiente da energia. Essa sempre foi uma das principais prioridades da indústria siderúrgica. O custo é um incentivo chave para isso, considerando que as compras de energia representam 20 a 40% na produção básica de aço. Um estudo do mercado de aço a nível global estima que as empresas siderúrgicas reduziram seu consumo de energia por tonelada de aço produzida em 60% desde 1960. Embora as tecnologias de produção existentes já sejam muito eficientes, cada empresa siderúrgica está em um ponto de maturidade e desenvolvimento diferente.

As indústrias siderúrgicas brasileiras mostram forte aderência aos critérios de sustentabilidade mundialmente estabelecidos para o setor. De acordo com o Relatório de Sustentabilidade do Instituto aço Brasil de 2016, a indústria do aço brasileira vem adotando algumas medidas para reduzir os impactos ambientais de suas atividades, dentre elas estão, principalmente, a otimização do aproveitamento das matérias-primas,

a utilização racional da água, eficiência energética nos processos, redução das emissões de gases de efeito estufa e redução na geração de resíduos e efluentes.

Um avanço sustentável do setor pode ser considerado o desenvolvimento de tecnologias e processos que permitam a utilização dos coprodutos, de forma ambientalmente adequada, como matéria-prima ou fonte de energia na própria atividade.

## **2.7 Processo de Coqueificação: desafio para a sustentabilidade na siderurgia**

Coqueificação é o processo onde o carvão é cozido por 24 a 36 horas com o intuito de expulsar matérias voláteis e criar o coque, de queima mais eficiente e limpa que será utilizado como combustível no alto-forno. Trata-se de um processo complexo por conta do manuseio de grandes quantidades de carvão e gases combustíveis. Os riscos de danos ao meio ambiente e a possibilidade de explosões determinam a necessidade de controles muito robustos e do emprego de mão de obra com boa qualificação. As baterias de coque são equipamentos com vida longa, entre 35 e 50 anos e todas as tecnologias disponíveis têm altíssimo valor de compra, tornando difícil sua substituição em tempos menores. Isso explica o alto risco desse processo, visto que grande parte das baterias de coque no mundo tem acima de 30 anos de operação (COSTA, 2008).

A produção de coque em usinas siderúrgicas integradas compreende diferentes etapas, podendo ser resumidas em: Recebimento e estocagem, recuperação e mistura; coqueificação do carvão e a estocagem para utilização do coque em altos-fornos.

Após o recebimento e descarga, os carvões são geralmente conduzidos por meio de correias transportadoras até os pátios de estocagem. Nessa etapa ocorre a triagem do material nos pátios, considerando a diferente característica dos carvões recebidos.

Antes de seu uso nos fornos, os carvões são peneirados, britados e armazenados em silos de dosagem. Só após esse processo inicial estará adequado para formarem as misturas que entrarão no processo de coqueificação.

De forma resumida, o processo de coqueificação é a “destilação” por pirólise ou decomposição térmica do carvão mineral ao abrigo do ar, que após o desprendimento da matéria volátil obtém-se um resíduo sólido, poroso e carbonoso denominado coque. Neste processo, as baterias do forno de coque são preenchidas com o carvão, o qual é processado a 1.300 °C na ausência de oxigênio. Um controle assertivo do fornecimento e distribuição do calor nas paredes são essenciais para um produto de qualidade e sem custos de manutenção. É nessa etapa que ocorre a grande produção do gás de coqueria – GCO e do alcatrão de hulha, ambos com grande potencial para geração de energia e a produção de outras substâncias químicas de alto valor agregado.

Após o processo de coqueificação, o material (coque) bruto é desenfornado e sua combustão é extinta a úmido ou a seco, dependendo do processo siderúrgico, seguindo então para o beneficiamento, onde é peneirado e britado, atingindo assim a granulometria adequada para a sua utilização no processo do alto-forno, onde exerce um papel térmico, suprindo a maior parte da energia térmica requerido pelo processo.

Atualmente existem duas tecnologias distintas para a produção de coque em larga escala, a Coqueria *non-recovery* (ou *heat recovery*) e a coqueria *by product*. Na coqueria *non-recovery*, o processo é caracterizado por não promover a separação e limpeza dos gases gerados no próprio processo, não havendo o aproveitamento dos gases de coqueria como combustível no restante do processo siderúrgico, nem a recuperação dos produtos chamados carboquímicos. Todos os gases e produtos carboquímicos (incluindo os hidrocarbonetos aromáticos voláteis) gerados são queimados para gerar calor necessário ao processo (JUNIOR, 2010).

A coqueria *by product*, processo mais largamente utilizado na siderurgia, tem como principal característica o processamento da separação e limpeza dos gases gerados no processo, permitindo sua utilização como combustível nas demais fases de produção de uma usina siderúrgica integrada, além da possibilidade de destilação dos gases permitindo a comercialização de produtos carboquímicos de maior valor agregado (JUNIOR, 2010).

Ao processo de coqueificação podemos atribuir muitos dos principais aspectos ambientais da siderurgia, a começar pela grande produção de gás que, se não for

devidamente controlada, torna-se grande fonte de emissão de dióxido de carbono, através da queima do monóxido de carbono presente no GCO (CAVALCANTI, 2012).

Outro aspecto significativo que deve ser mencionado é a intensificada geração de resíduos e a liberação de materiais voláteis deles, o que pode tornar-se um passivo do ponto de vista ocupacional e ambiental. Adicionalmente, a água utilizada no processo de resfriamento do coque, ao evaporar, causa arraste de grandes quantidades de material particulado, além de reduzir a disponibilidade de recurso hídrico, devendo ser recirculada.

Entendendo as nuances do processo de coqueificação pode-se estimar qual das tecnologias apresentadas está mais aderente aos critérios de sustentabilidade estabelecidos para o setor siderúrgico, com base no processo de coqueificação, ou provê bases para a proposição de critérios de sustentabilidade mais adequados, de forma que seja possível prover resultados comprobatórios sobre a tecnologia mais sustentável, somando os pontos de vista social, ambiental e econômico.

## **2.8 Indicadores de sustentabilidade aplicados ao processo de coqueificação**

A adoção de critérios de sustentabilidade na definição de um projeto ou escolha entre tecnologias deve, obrigatoriamente, estar pautada em indicadores que permitam uma clara, concisa e precisa comparação entre as opções definidas, para tal são utilizadas métricas quantitativas que permita tal comparação, a exemplo da emissão de CO<sub>2</sub>. O cálculo das emissões de dióxido de carbono são um indicador consolidado que permitem estimar o impacto causado por aquele processo/tecnologia na atmosfera.

Desta forma, quanto maior a qualidade das métricas utilizadas para medir a sustentabilidade de um processo, negócio ou produto, melhores e mais seguros serão seus resultados, garantindo que a sustentabilidade do negócio seja um critério de decisão tangível e mensurável.

Desta forma, desenvolver critérios e métricas aderentes tornou-se um desafio almejado por diversos profissionais e empresas, com o intuito de comprovar os resultados alcançados pela mesma em um cenário global onde a sustentabilidade pode servir de alavanca ou barreira para a comercialização de um produto ou serviço.

Dentro do enredo apresentado, os resultados registrados no presente estudo denotam o desenvolvimento de critérios de sustentabilidade alinhados com os principais desafios da indústria siderúrgica, com resultados focados no processo de coqueificação do carvão, estabelecendo métricas para avaliar a sustentabilidade das tecnologias mais utilizadas atualmente no mercado a nível global.

### **3 DESENVOLVENDO MÉTRICAS DE SUSTENTABILIDADE**

#### **3.1 Métricas qualitativas de sustentabilidade**

Araújo et al. (2015) propôs um conjunto de critérios heurísticos para tomada de decisão para avaliar a performance ambiental e econômica de alternativas de processo. A definição destes critérios teve como base alguns princípios aceitos internacionalmente e nas inter-relações e correspondências entre cada princípio. Seguindo o princípio deste pensamento, e entendendo que a segurança ambiental é fator integrante do conceito de sustentabilidade, criou-se a partir de princípios da Engenharia Sustentável e da Química Verde, uma série de critérios heurísticos voltados para a Segurança Ambiental dos processos produtivos.

Este trabalho considera o *The Twelve Green Engineering Principle* (ANASTAS; ZIMMERMAN, 2006) o *The Nine San Destin Principles* (ABRAHAM, 2006) e o *Green Design Criteria* (ARAÚJO et al., 2015) como base para a definição de um conjunto de critérios heurísticos qualitativos com foco na segurança ambiental e na sustentabilidade durante a escolha e implantação de tecnologias de produção, propondo princípios básicos para a preservação não só da saúde da população em processos de análise dos riscos mas uma análise pautada em sólidos requisitos de controle ambiental e prevenção de possíveis impactos ambientais. Estes critérios foram definidos como SSEP: *Seven Sustainable Engineering Principles* (Sete Princípios de Engenharia Sustentável) e estão apresentados e comparados, na Tabela 2, com os princípios da engenharia verde e os princípios da química verde, porém ajustado para dar foco aos objetivos da análise aqui proposta.

Tais critérios foram utilizados para a avaliação da sustentabilidade do processo de coqueificação na indústria siderúrgica, porém, é importante que fique clara a abordagem determinada para cada critério, sua abrangência e limitações, buscando alinhar conceitos e termos imprescindíveis à aplicação eficiente de cada um deles.

Tabela 2 - Análise comparativa entre o SSEP e os demais critérios de engenharia sustentável e química verde (Fonte: Autores, 2019).

Criteria and principles of green design			
Seven Sustainable Engineering Principles	The nine San Destin Principles	Green Design Criteria	Green Engineering Principles
SSEP#1 Primar pelo uso de métodos holísticos que permita uma análise do sistema através da incorporação de aspectos e impactos ambientais, de forma a maximizar a eficiência do processo com uma menor diversidade de materiais.	SDP#1 Engineer processes and products holistically, use system analysis and integrate environmental impact assessment tools	GDC#2 incorporating all materials used in the process into the final product, designing tailored to needs with maximum efficiency  GDC#12 material diversity in multicomponent products should be minimized to promote disassembly and value retention	GEP#4 Maximize Efficiency.  GEP#9 Minimize Material Diversity.
SSEP# 2 Garantir que todos os materiais e energias envolvidos no processo sejam inherentemente seguros de forma a conservar o ecossistema e proteger a saúde e bem-estar humano.	SDP#2 Conserve and improve natural ecosystems while protecting human health and well-being  SDP#4 Ensure that all material and energy inputs and outputs are as inherently safe and benign as possible	GDC#3 using and generating substances that posses little or no toxicity to human health and the environment, while preserving efficacy of use  GDC#9 real-time, in-process monitoring and control to monitorize pollution and release of hazardous substances  GDC#10 embody a holistic, systems approach to risk reduction	GEP#1 - Inherent Rather Than Circumstantial.
SSEP#3 Projetar processos e produtos a partir de uma perspectiva de ciclo de vida, priorizando sempre o design simples e sustentável.	SDP#3 Use life cycle thinking in all engineering activities	GDC#8 product should not persist in the environment after usefulness. Targeted durability, not immortality, should be a design goal.  GDC#6 avoiding unnecessary derivatization and minimizing complexity in products  GDC#10 embody a holistic, systems approach to risk reduction	GEP#7 - Durability Rather Than Immortality.  GEP#6 - Conserve Complexity.  GEP#12 - Renewable Rather Than Depleting.
SSEP#4 Estabelecer estratégias de aproveitamento energético, priorizando o uso de materiais e fontes de energia renováveis e economicamente viáveis.	SDP#5 Minimize depletion of natural resources	GDC#7 avoiding by-products using catalytic reagents as selective as possible  GDC#4 Recognizing environmental and economic impacts of energy requirements and minimizing it  GDC#5 using renewable rather than depleting materials	GEP#3 - Design for Separation.  GEP#10 - Integrate Material and Energy Flows.  GEP#12 - Renewable Rather Than Depleting.
SSEP#5 Projetar com o foco na prevenção da geração de resíduos, aderindo ao conceito just-in-time.	SDP#6 Strive to prevent waste	GDC#1 Preventing rather than treating waste is the best environmental protectionon strategy	GEP#2 - Prevention Instead of Treatment.  GEP#5 - Output-Pulled Versus Input-Pushed.
SSEP#6 Considerar as questões sociais e culturais, levando em consideração as opiniões e valores dos principais stakeholders, para o desenvolvimento de soluções de engenharia.	SDP#7 Develop and apply engineering solutions, while being cognizant of local geography, aspiration and cultures  SDP#9 Actively engage communities and stakeholders in development engineering solutions	GDC#14 holistically design with innovative sollutions, while meeting geographic and cultural specificities.	GEP#8 - Meet Need, Minimize Excess.
SSEP#7 O design de produtos e processos deve considerar sua vida útil, em função das tecnologias disponíveis para o seu tratamento e disposição.	SDP#8 Create engineering solutions beyond current or dominant technologies; improve, innovate and invent (technologies) to achieve sustainability	GDC#8 product should not persist in the environment after usefulness  GDC#13 design for performance in a commercial "after life". Design for disassembly	GEP#7 - Durability Rather Than Immortality.  GEP#11 - Design for Commercial "Afterlife".

**SSEP#1 - Primar pelo uso de métodos holísticos que permita uma análise do sistema através da incorporação de aspectos e impactos ambientais, de forma a maximizar a eficiência do processo com uma menor diversidade de materiais.**

Este princípio está baseado no primeiro Princípio de San Destin e em dois princípios da Engenharia Verde.

A análise do sistema é considerada a única ferramenta reconhecida que garante que se pense sobre um problema holisticamente, mesmo quando se quer resolver um problema específico, pois reconhece o problema em seu contexto geral, podendo examinar as relações do processo com o meio ambiente (ANDERSON; JOHNSON, 1997). Dessa forma, quando se trata do sistema como um todo, pode-se atingir uma melhor eficiência, pois como explicado por Gonzalez (2017), quando se integra a eficiência da matéria com a eficiência energética, os benefícios serão maiores e isto se deve ao fato da interdependência entre estas eficiências. E assim, quando estes conceitos são avaliados juntos, há maiores oportunidades para aumentar a sustentabilidade de um processo, pois consegue-se avaliar todos os aspectos envolvidos no processo.

Dessa forma, este princípio busca avaliar se a análise dos sistemas escolhidos leva em consideração todas as entradas e saídas do processo, seus aspectos e impactos ambientais e se assim está buscando otimizar o processo em relação ao consumo energético e de matérias-primas.

**SSEP# 2 Garantir que todos os materiais e energias envolvidos no processo sejam inherentemente seguros de forma a conservar o ecossistema e proteger a saúde e bem-estar humano.**

Este princípio está relacionado com o primeiro princípio da engenharia verde, que de acordo com Anastas e Zimmerman (2006), há duas formas de reduzir o risco de um processo: reduzir o perigo ou reduzir a exposição. Frequentemente, a abordagem para controlar as consequências de um produto perigoso no meio ambiente tem sido o controle da exposição na maioria dos casos. No entanto, uma outra abordagem é tornar

o produto o mais inócuo possível, garantindo a sustentabilidade pelo uso de substâncias inherentemente seguras pois a redução do perigo intrínseco de uma substância reduz consideravelmente as consequências, caso aconteça um incidente.

De acordo com Constable (2017), um dos objetivos deste princípio da engenharia verde é que o engenheiro de processo ou de produto se pergunte se as matérias ou energias utilizadas para produção tem o menor impacto possível. E assim, não só o produto considerado perigoso utilizado no processo é importante, mas também o tipo de energia utilizada, pois tipos diferentes de energia terão perfis de toxicidades e eficiências diferentes.

Com este princípio, busca-se avaliar os processos levando em consideração o mínimo de produtos perigosos e tóxicos nas atividades, avaliando os riscos tanto sociais quanto ocupacionais. Avalia-se também as transformações das matérias que, se em um primeiro momento não apresentam-se de forma perigosa, após algumas etapas podem aparecer subprodutos indesejados, ou desejados mas com altíssima periculosidade para as pessoas ou meio ambiente.

### **SSEP#3 Projetar processos e produtos a partir de uma perspectiva de ciclo de vida, priorizando sempre o design simples e sustentável.**

O ciclo de vida é uma ferramenta de análise que estabelece os fluxos de matéria e energia ao longo de toda produção, manufatura, consumo e as estratégias de gerenciamento do fim do ciclo de vida do produto. Este princípio é importante pois de acordo com Keoleian e Spitzley (2006), o ciclo de vida do sistema de um produto é uma ferramenta lógica para entender e melhorar a integração entre a produção, o consumo e os sistemas, pois ele perpassa por todos os processos direcionando as necessidades da sociedade.

Em relação ao fim do ciclo de vida, o produto precisa ser projetado para a reciclagem, reuso e em último caso, para disposição final. Baseado no nível de complexidade do produto, ou seja, nos níveis de energia, tempo e matéria que foram investidos ao longo da cadeia produtiva, se pode de forma geral definir qual a melhor forma de manuseio e tratamento. Para produtos de alta complexidade, por exemplo,

recomenda-se o reuso (ANASTAS; ZIMMERMAN, 2006).

Assim, este princípio tem o objetivo de avaliar se os processos estão configurados da maneira mais simples e sustentáveis, levando em conta não apenas uma única etapa de processamento, mas todas as etapas consideradas dentro da delimitação do sistema, avaliando por uma perspectiva de ciclo de vida, ou seja, considerando também, as estratégias de gestão dos resíduos gerados no processo.

**SSEP#4 Estabelecer estratégias de aproveitamento energético, priorizando o uso de materiais e fontes de energia renováveis e economicamente viáveis.**

Este princípio se relaciona com dois dos princípios da engenharia verde: integração dos fluxos e a preferência por recursos renováveis. O décimo princípio da engenharia verde trata da integração dos fluxos de matéria e energia, e de acordo com Anastas e Zimmerman (2006), a integração destes fluxos no processo ou sistema pode aumentar a eficiência do sistema como um todo, diminuindo os custos e impactos ambientais destes fluxos. Esta integração garante que os recursos estão sendo utilizados no seu máximo valor e não levando a perdas do produto. Já o princípio 12 da engenharia verde, refere-se a crescente demanda de energia e aos recursos não renováveis que estão diminuindo, levando assim, ao aumento dos preços da commodity e do consumo de energia. As matérias e energias renováveis seriam uma solução para ajudar a driblar estes efeitos negativos. (SHONNARD, 2008).

Dessa forma, este princípio tem como objetivo avaliar a eficiência energética do processo e o consumo de combustíveis de fontes não renováveis, verificando se o processo está tendo o máximo aproveitamento dos combustíveis utilizados.

**SSEP#5 Projetar com o foco na prevenção da geração de resíduos e/ou agregação de valor ao resíduo, aderindo ao conceito *just-in-time*.**

Um dos princípios centrais de uma tecnologia verde é produzir apenas a quantidade de produto que se deseja. Em termos de reações químicas e processos, a questão não é apenas quanto se produziu do produto desejado, mas quanto de

produtos não desejados também foi formado. Dessa forma, os processos devem ser configurados para reduzir a quantidade de resíduo (ABRAHAM, 2017).

Para Zimmerman e Anastas (2006), o resíduo pode não ser considerado um resíduo quando o mesmo possui um objetivo produtivo, ou seja, quando a recuperação do mesmo como entrada de um outro processo representa benefícios tanto ambientais quanto econômicos, pois este cenário promove um mecanismo de prevenção, não sendo necessário o tratamento e disposição final deste resíduo. Neste contexto, considera-se que o resíduo gerado possui valor agregado em termos de investimento.

Dessa forma, este princípio tem como objetivo avaliar os processos quanto aos seus desperdícios, com foco na prevenção da geração de resíduos que precisariam de tratamento fora do sistema, mas também avaliando se há o reaproveitamento e recuperação destes resíduos internamente, agregando valor ao mesmo.

**SSEP#6 Considerar as questões sociais e culturais, levando em consideração as opiniões e valores dos principais *stakeholders*, para o desenvolvimento de soluções de engenharia.**

De acordo com Heine e Willard (2006), projetar soluções que não resolvam apenas problemas técnicos, mas que também levem em conta as preocupações sociais e ambientais, requerem o gerenciamento dos interesses dos diversos grupos de *stakeholders*. O envolvimento de *stakeholders* é uma estratégia efetiva para priorizar as necessidades da sociedade e assim promover a sustentabilidade incluindo os objetivos de bem-estar humano no projeto.

Dessa forma, este princípio busca avaliar se o processo está levando em consideração as necessidades dos stakeholders para que não gerem conflitos com suas necessidades e possam impactar na sustentabilidade.

**SSEP#7 O design de produtos e processos deve considerar sua vida útil, em função das tecnologias disponíveis para o seu tratamento e disposição.**

Este princípio se baseia no décimo primeiro princípio da engenharia verde,

segundo o qual de acordo com Anastas e Zimmerman (2006), se a produção de um certo produto é benéfica tanto para a saúde humana quanto para o meio ambiente e o produto em si é inócuo, ainda assim é necessário garantir que após seu fim comercial, este produto não leva a impactos negativos para o meio ambiente no fim do seu ciclo de vida. É preciso avaliar se além das consequências desejáveis, se há resíduo sólido que possa causar danos ao meio ambiente e também persistência e bioacumulação.

### **3.2 Métricas Quantitativas de Sustentabilidade**

De acordo com Schwarz e Beaver (2002), após o entendimento da empresa da necessidade do desenvolvimento sustentável do seu negócio, a etapa seguinte é a incorporação de tal conceito dentro das suas operações ou atividades, necessitando da identificação dos indicadores de sustentabilidade e como estes podem ser medidos ao longo do tempo para determinar se está tendo progresso. As métricas que relacionam a performance ambiental e econômica para os processos de produção são conhecidas como “ecoeficiência”. Desse modo, a empresa torna os processos mais eficientes enquanto reduzem os impactos ambientais.

As métricas podem ser divididas em indicadores ambientais, indicadores econômicos e indicadores sociais, correspondendo as três dimensões do desenvolvimento sustentável. Os indicadores ambientais devem medir os impactos ambientais, relacionando tanto as entradas quanto saídas do processo. Os indicadores econômicos são os elementos-chave para o sucesso do negócio, gerando lucros ou evitando custos desnecessários. Já os indicadores sociais refletem as atitudes da empresa com os *stakeholders*: funcionários, fornecedores, clientes, e também os seus impactos na sociedade como um todo.

A escolha das métricas é de fundamental importância, pois nem todos os indicadores se aplicam para todos os processos e atividades que se deseja avaliar, e tal tarefa é de responsabilidade de cada empresa. Para se ter uma visão balanceada da sustentabilidade no processo, devem ser escolhidos indicadores nas três dimensões: ambiental, econômico e social.

As métricas de sustentabilidade são calculadas na forma de “razão”, com o

impacto (consumo de recursos, emissões etc.) como numerador e uma representação da saída, em termos físicos ou financeiros, como denominador. Dessa forma, os indicadores seguem então a regra que quanto menor a métrica, mais efetivo é o processo, ou seja, quanto menor o número dessa medida, menor é o impacto ou maior o *output*. Esta regra pode ser utilizada para comparar processos, uma vez que estas métricas são normalizadas pelo *output* (SCHWARZ; BEAVER, 2002).

Ainda de acordo com este mesmo autor, a escolha das métricas deveria seguir alguns critérios, que também estão sendo considerados na escolha dos indicadores de sustentabilidade do processo de coqueificação, base deste trabalho:

- as métricas devem ser simples: não devem requerer muito gasto de tempo para serem definidas e mensuradas;
- as métricas devem ser úteis para a gestão da tomada de decisão e relevantes ao negócio que está sendo avaliado;
- as métricas devem ser reproduutíveis: devem incorporar regras de decisão que produzam resultados consistentes e que possam ser comparados;
- as métricas devem ser robustas para que possa ser medida o progresso quando forem implementadas melhorias de sustentabilidade;

Com base nestes aspectos e também levando em consideração as medidas que tem sido adotadas pelas indústrias siderúrgicas brasileiras para reduzir os impactos de suas atividades, baseadas no Relatório de Sustentabilidade do Instituto Aço Brasil, as métricas quantitativas selecionadas para avaliação do processo de coqueificação são apresentadas na Tabela 3, associadas aos critérios heurísticos definidos anteriormente, de forma que sustentem e aproximem ao máximo os resultados dos critérios de sustentabilidade definidos neste estudo.

Tabela 3 - Critérios quantitativos para sustentabilidade.

<b>Aspectos sustentáveis</b>	<b>Métrica</b>	<b>Unidade funcional</b>	<b>Critérios Associados</b>
<b>Indicadores de impactos ambientais</b>	Intensidade de material	ton insumo/ton produto	SSEP#1, #3 e #5
	Intensidade energética	MWh/ton produto	SSEP#3, #4 e #5

	Pegada Hídrica	m³ água/ton produto	SSEP#3, #5 e #6
	Emissão de MP	ton MP/ton produto	SSEP#3, #5 e #6
	Emissão de NOx	ton NOx/ton produto	SSEP#3, #5 e #6
	Emissão de SOx	ton Sox/ton produto	SSEP#3, #5 e #6
	Emissão de VOCs	Ton VOC/ton produto	SSEP#3, #5 e #6
<b>Indicadores de performance econômica</b>	NPV	Milhões de US\$	SSEP#5
	Intensidade do LCC	US\$/ton.ano	SSEP#5 e #7
<b>Indicadores de riscos e performance social</b>	Alcance dos efeitos físicos dos produtos perigosos	Alcance em metros	SSEP#2
	Risco Individual	TLV-TWA	SSEP#2 e SSEP#6
	Empregabilidade	Empregos gerados	SSEP#6

Desta forma, a adoção de métricas de sustentabilidade que reforcem os critérios de sustentabilidade garantem maior confiabilidade ao tornar mais criteriosa a análise dos processos e alternativas tecnológicas, permitindo que a avaliação passe por algumas etapas que aumentem sua confiabilidade.

## 4 PROCEDIMENTO DE ANÁLISE MULTICRITÉRIO

Este trabalho propõe uma metodologia adaptada para uma análise multicritério baseada em termos de performance de sustentabilidade em prol da segurança ambiental, mas sem perder de vista os fatores sociais e econômicos, integrando os aspectos das três dimensões de sustentabilidade em processo de produção de coque na siderurgia. Isso foi alcançado incorporando-se na análise, indicadores de análise de riscos sociais (comumente defendidos por órgãos de controle ambiental) mesclados aos indicadores de performance ambiental.

Os dados (Tabela 4) sobre produção, custos e emissões, utilizados para aplicação do método no processo de Coqueria By-product com limpeza total do gás de coqueria, foram cedidos por empresa de grande porte do setor siderúrgico brasileiro, conforme mencionado anteriormente, os demais dados foram obtidos da seguinte forma: Para o processo Heat-Recovery foram obtidos parte por esta mesma empresa, proveniente de estudos técnicos para atualização tecnológica e parte retirado de referências bibliográficas nacional e internacionais. Já para o processo By-product com limpeza parcial do gás de coqueria, foram realizadas extrapolações a partir dos dados fornecidos pela empresa para o processo By-product com limpeza total do gás. Isso valendo-se do balanço de massa mostrado nos fluxogramas nas Figuras 5 a 8.

Tabela 4 - Dados dos processos de coqueria utilizados na modelagem do estudo.

Métricas	Alternativas Tecnológicas		
	Coqueria By -product (Limpeza total do GCO)	Coqueria By-product (limpeza parcial do GCO)	Coqueria Heat-Recovery
<b>CAPEX</b>	1424	1414,6	1500,8
<b>OPEX</b>	313	317	306
<b>NPV-Dec. 10%</b>	250	240	224
<b>Empregabilidade</b>	712	659	600
<b>Alcance dos Efeitos Físicos de Acidentes</b>	748	0	0
<b>Intensidade Energética</b>	0,022490476	0,011830952	0,008288095
<b>Intensidade de Material</b>	0,334	0,327	0365

<b>Pegada Hídrica</b>	19,76	7,55	0
<b>Emissão de MP</b>	0,001543262	0,001543262	0
<b>Emissão de NOx</b>	0,000481232	0,000481232	0
<b>Emissão de SOx</b>	0,000544327	0,000544327	0
<b>Emissão de VOC</b>	0,00017803	0,000170286	0
<b>Emissão de</b>	0,357151786	0,403111161	0,162702881

De acordo com Almeida *et al.* (2017), existem diferentes metodologias para análise comparativa de processos, tais como *Life Cycle Assessment* (LCA), *Environmental Impact Assessment* (EIA) e *Potential Environmental Impact* (PEI). No entanto, existem poucas metodologias para unir critérios qualitativos com métricas quantitativas. Menos ainda as que propõe a integração das métricas de riscos ambientais com os riscos sociais.

De acordo com Araújo *et al.* (2015), a análise multicritério (MCA) é uma abordagem estruturada para determinar preferências entre alternativas, na qual se considera que os indicadores qualitativos e quantitativos podem influenciar a determinação das alternativas.

Este trabalho se baseia no procedimento proposto por estes autores, propondo uma combinação dos princípios de engenharia sustentável – qualitativo (Tabela 2) – com métricas quantitativas de sustentabilidade (Tabela 1) baseado em uma análise multicritério, com as seguintes etapas:

## Sistema 01 – Coqueria By-product

(carboquímico com phosan e destilação de amônia)

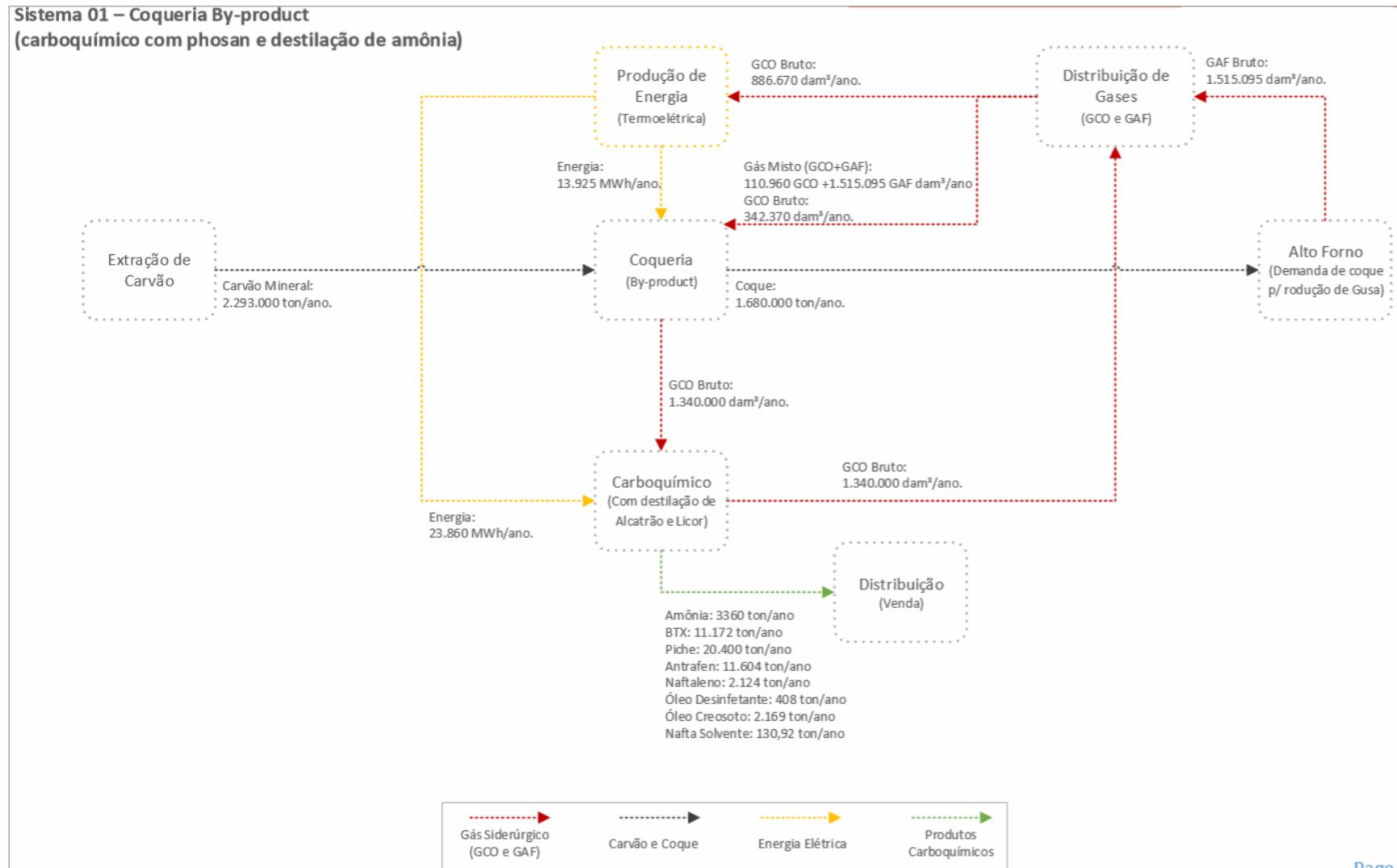


Figura 6 - Balanço de massa simplificado do Processo A (Coqueria com limpeza total do GCO) (Fonte: Autores, 2019).

## Sistema 02 – Coqueria By-product (carboquímico incompleto)

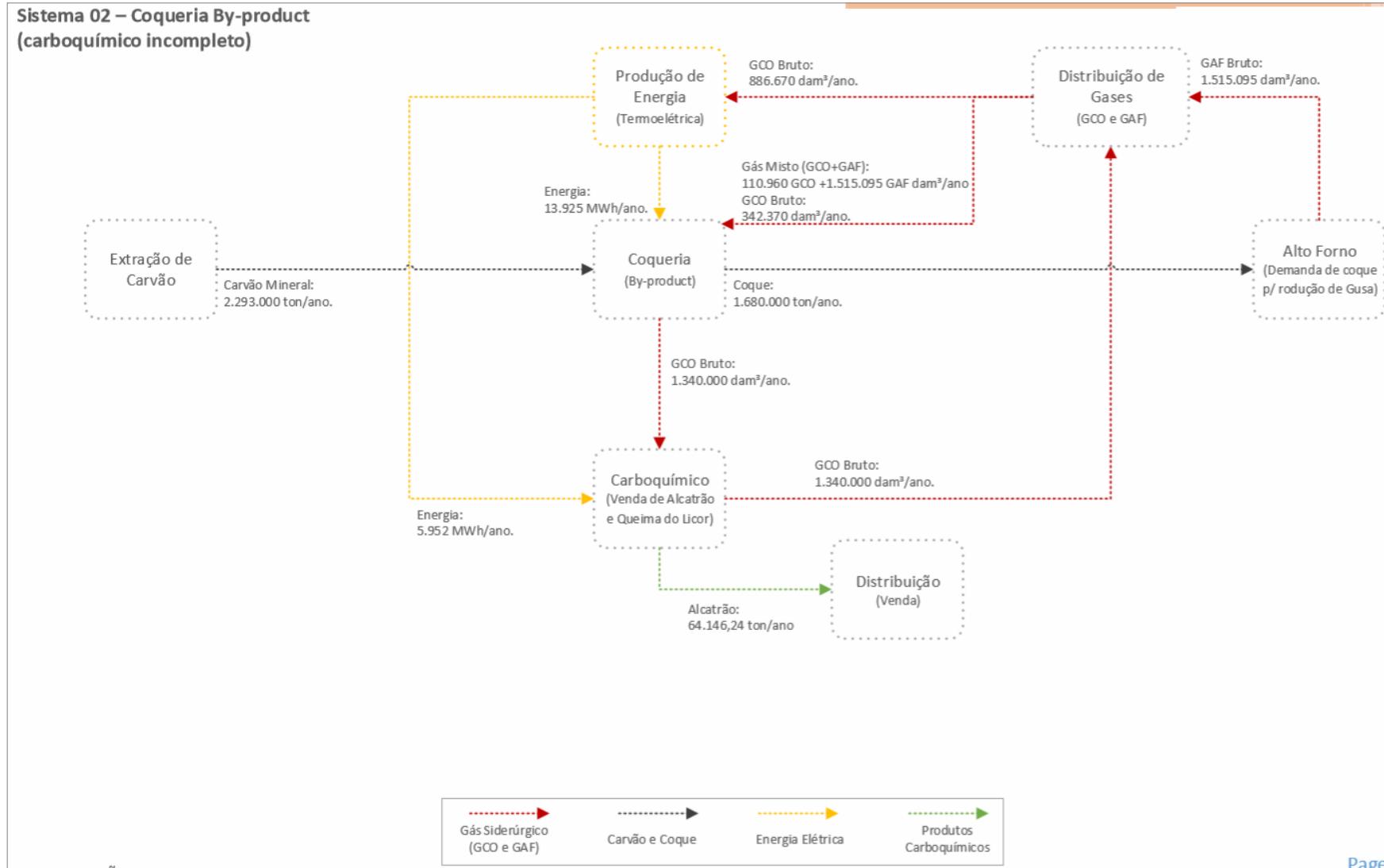


Figura 7 - Balanço de massa simplificado do Processo B (Coqueira com limpeza parcial do GCO) (Fonte: Autores, 2019).

Sistema 03 – Coqueria Heat Recovery

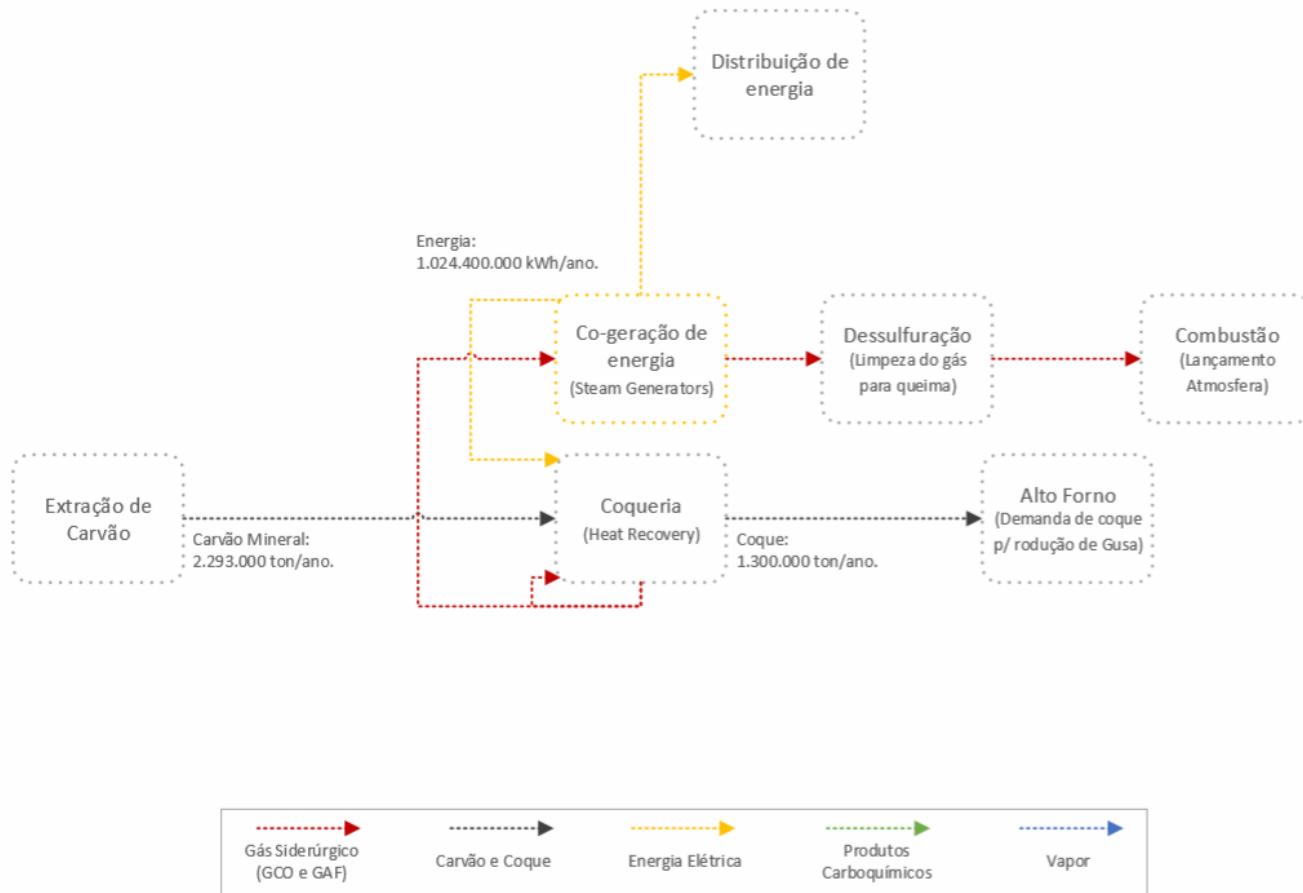


Figura 8 - Balanço de massa simplificado do Processo C (coqueria Heat-Recovery) (Fonte: Autores, 2019).

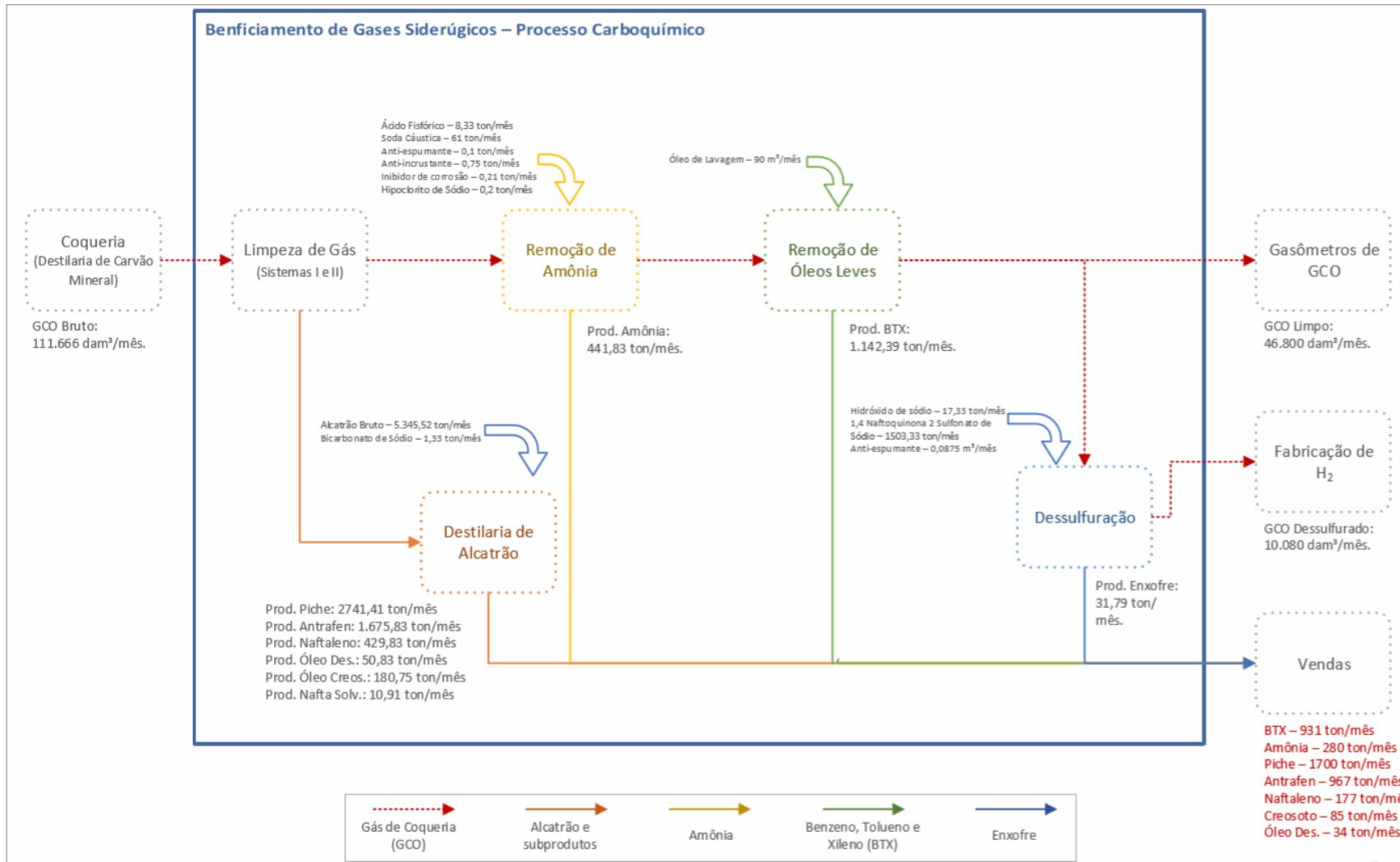


Figura 9 - Processo carboquímico de referência, com processamento de alcatrão de hulha e destilaria de amônia (Fonte: Autores, 2019).

#### **4.1 Etapa 1 - Pontuar as alternativas de processo de acordo com o SSEP**

Cada critério do SSEP foi pontuado de acordo com o grau de conformidade para cada alternativa de processo, de acordo com o seguinte critério:

- I. alta conformidade = 1
- II. média conformidade = 3
- III. baixa conformidade = 9

Estas pontuações foram atribuídas de acordo com a experiência de profissional envolvido nos processos de coqueificação da empresa doadora dos dados utilizados neste estudo. Isso foi realizado na forma de um formulário padrão distribuído para 3 engenheiros de processo e dois engenheiros de manutenção, bem como 10 operadores com experiência maior que 5 anos e com conhecimento sobre as demais tecnologias. Os dados dos formulários foram devidamente compilados para as próximas etapas.

#### **4.2 Etapa 2 - Pontuar métricas quantitativas.**

As métricas quantitativas foram normalizadas, de acordo com a equação abaixo.

Em seguida pontuadas de acordo com os seguintes atributos:

- I. 1 = boa performance, se  $NM_{i,j} < 1$
- II. 3 = performance regular, se  $1 \leq NM_{i,j} < 3$
- III. 9 = performance ruim, se  $NM_{i,j} \geq 3$

#### **4.3 Etapa 3 - Computar a Matriz de Severidade (ou Matriz Multicritério)**

Primeiramente, é calculada uma matriz GDCI, que é o índice de criticalidade das métricas qualitativas (SSEP), ou seja, quão crítico é um processo para o meio ambiente e é uma medida de intensidade dos impactos potenciais. Esta matriz é calculada

através da seguinte equação:

Onde  $GD$  é a matriz com a pontuação da aderência do processo ao SSEP e  $PWV$  é um vetor de peso para direcionar as prioridades nas tomadas de decisão, essas definidas com base no objetivo requerido por essa análise, no caso da presente pesquisa, um peso maior foi atribuído aos impactos ambientais e sociais advindos do potencial de risco do processo em estudo.

Em seguida é calculada a matriz de severidade através das seguintes equações:

Para o cálculo das matrizes foi utilizado o software MatLab® da MathWorks.

#### **4.4 Etapa 4 - Computar o Fator de Criticalidade e o Grau de Sustentabilidade**

A matriz de severidade apresenta várias performances ambientais como severidades, intensificadas pelos critérios qualitativos (SSEP). Assim, para suportar os processos de tomada de decisão, índices de performance são propostos: CF (Fator de Criticalidade) e SD (Grau de Sustentabilidade), sendo calculados a partir das equações utilizadas por Araújo (2015).

O índice de severidade (SI) pode ser interpretado que quanto maior o valor de um elemento deste vetor menos sustentável é a alternativa do processo. A partir deste índice, pode-se calcular a matriz de contribuição da severidade nos processos.

## 5 RESULTADOS DAS ANÁLISES MULTICRITÉRIOS

A análise multicritérios definida permitiu uma avaliação sistemática das tecnologias para o processo de coqueificação escolhidos, a partir de agora denominados processos A, B e C para melhor entendimento, para a aplicação da metodologia proposta neste estudo, considerando como:

- Tecnologia By-product com limpeza total do gás de coqueria (Processo A), ou seja, apresentando unidade carboquímica contendo os seguintes processos:
  - destilaria de amônia (processo Phosam);
  - destilaria de alcatrão; e
  - dessulfuração (redução da concentração do enxofre presente no gás).
- Tecnologia By-product com limpaza parcial do gás de coqueria (Processo B), que contém:
  - Sistema de lavagem primária do gás e venda direta do alcatrão de hulha e queima do licor amoniacial.
- Tecnologia Heat-Recovery (Processo C), que faz a recirculação do gás de coqueria diretamente em seus processos e queima o excedente para geração de energia, com uma planta de co-geração de energia associada.

Um mapa de *Compliance* com os *Seven Sustainable Engineering Principles – SSPEs* definidos como critérios mínimos para a sustentabilidade de tecnologias de coqueificação do carvão foi compilado com base na Tabela 5, partindo da experiência dos autores com o processo e baseado em referências bibliográficas e consulta a especialistas no setor.

Tabela 5 - Grau de *Compliance* dos processos ao SSEP.

SSEP #1	SSEP #2	SSEP #3	SSEP #4	SSEP #5	SSEP #6	SSEP #7	GDCI

<b>Coqueria by-product completo (Processo A)</b>	3	9	9	9	1	9	9	6.8600
<b>Coqueria by-product incompleto (Processo B)</b>	9	3	9	9	3	3	9	6.3000
<b>Coqueria Heat-recovery (Processo C)</b>	3	1	9	3	9	1	3	4.0600

O mapa compilado na Tabela 5 permite uma análise facilitada dos resultados desta primeira etapa de julgamento dos processos. Uma abordagem explicativa foi desenvolvida para facilitar o entendimento do mapa de *Compliance* e dos resultados alcançados nessa etapa, a saber:

Tratando-se do SSEP#1, o Processo B difere dos demais por não explorar ao máximo as possibilidades comerciais dos subprodutos da coqueria. Como visto nos fluxogramas de processo, o processo B termina na produção do resíduo alcatrão para a limpeza e beneficiamento do gás para uso na matriz energética da siderúrgica integrada, esse alcatrão pode ser vendido para diversos clientes em potencial, porém, por ainda conter uma alta carga de resíduos e impurezas, tem baixo valor agregado reduzindo o potencial de lucro do processo. Soma-se a isso a produção de licor amoniacial, que é queimado, mas possui baixo rendimento energético. O licor poderia ser convertido em amônia anidra a 99%, produto de grande importância para setores como a produção de fertilizantes e fármacos. Os Processos A e C receberam a mesma nota de *Compliance* na avaliação dos especialistas, isso porque o Processo A tem o melhor potencial de reaproveitamento energético do gás de coqueria, enquanto o Processo C possui o potencial de realizar a queima direta dos produtos de gás que são gerados na etapa de produção do coque, mesmo não possuindo meios para reaproveitamento dos materiais ele não incorpora os custos CAPEX e OPEX dispendidos no Processo A.

O Processo A foi o que apresentou menor aderência ao SSEP#2, visto que seus equipamentos são projetados para a produção de subprodutos (coprodutos) como amônia, Benzeno, Tolueno, Xileno e outros óleos pesados. Para tal, esse processo trabalha em altíssimas pressões e com produtos liquefeitos com alto teor de toxicidade. Desta forma, os Processos B e C apresentam melhor rendimento ao trabalharem,

respectivamente, com menores e nenhuma quantidade de tais produtos ou equipamentos. Na fase de avaliação dos indicadores quantitativos será possível visualizar o potencial do Processo A em causar impactos para a população e o meio ambiente, o que reforça ainda mais a avaliação dos especialistas.

No critério SSEP#3 foi decidido classificar todos os processos como não aderentes, considerando sua complexidade, grande demanda de energia, matéria prima e altíssimos níveis de emissões. Por tratar-se de um processo arcaico, do ponto de vista tecnológico, a produção de coque na siderurgia não leva em consideração o conceito de ciclo de vida ao trabalhar quase que totalmente na contramão de todos os princípios expostos, o que muitas vezes dificulta uma abordagem sustentável e segura em sua operação.

No SSEP#4 o Processo C foi definido como o mais aderente, isso porque sua tecnologia trabalha com a sucção do gás de coqueria no interior da própria bateria de coque, o que gera pressão negativa na bateria impedindo emissões fugitivas de compostos orgânicos voláteis, tóxicos ao meio ambiente e para as pessoas. Já os processos By-product (Processos A e B) trabalham em pressão positiva causando diversas emissões atmosféricas, o que diretamente causa prejuízos à qualidade de vida da população e degradação da qualidade do meio ambiente nas regiões que estão instaurados. Outro fato é o grande número de substâncias perigosas, influenciando diretamente na saúde e segurança do colaborador que se expõe e pode sentir-se desconfortável em um ambiente com altíssimo potencial de risco e possibilidade de acidentes graves envolvendo produtos químicos perigosos.

No critério SSEP#5 o Processo A foi definido como o mais aderente por conta de sua conversão de grande quantidade dos resíduos do processo de coqueificação em subprodutos rentáveis para a empresa e menor geração de resíduos para disposição em aterros ou tratamento em outras unidades, o que está diretamente associado a custos e impactos relativos ao transporte de tais resíduos. Já os demais processos carecem no aproveitamento máximo dos subprodutos do gás tendo custo um pouco mais elevado de disposição dos resíduos.

Continuando no critério SSEP#6, por evitar ao máximo impactos ambientais e de

consumo de matéria e energia local, além de ser inherentemente mais seguro, o Processo C foi o que apresentou maior aderência. Segue-se o mesmo raciocínio no critério SSEP#7, visto que no descomissionamento da planta carboquímica tanto no Processo 01 quanto no 02 o número de equipamentos e tubulações contaminadas com resíduos tóxicos e com potencial carcinogênico são exponencialmente maiores. Além das grandes áreas ambientalmente inviáveis por potencial de contaminação do solo e águas pluviais.

O valor GDCI na Figura 10 resume qual dos processos apresenta maior aderência aos critérios SSEP's definidos. Mesmo contendo várias vantagens do ponto de vista da produção e da rentabilidade, o Processo A foi o de menor pontuação e aderência à sustentabilidade, isso porque, conforme objetivo desse estudo, o peso atribuído aos indicadores de segurança ambiental e social tiveram grande influência na pontuação deste processo. Sendo o processo de maior potencial de impacto, conforme mostrado anteriormente.

Valores menores do GDCI explicitam maior aderência aos critérios de sustentabilidade propostos, o que classifica o Processo C como o mais sustentável entre as opções, e o de menor risco.

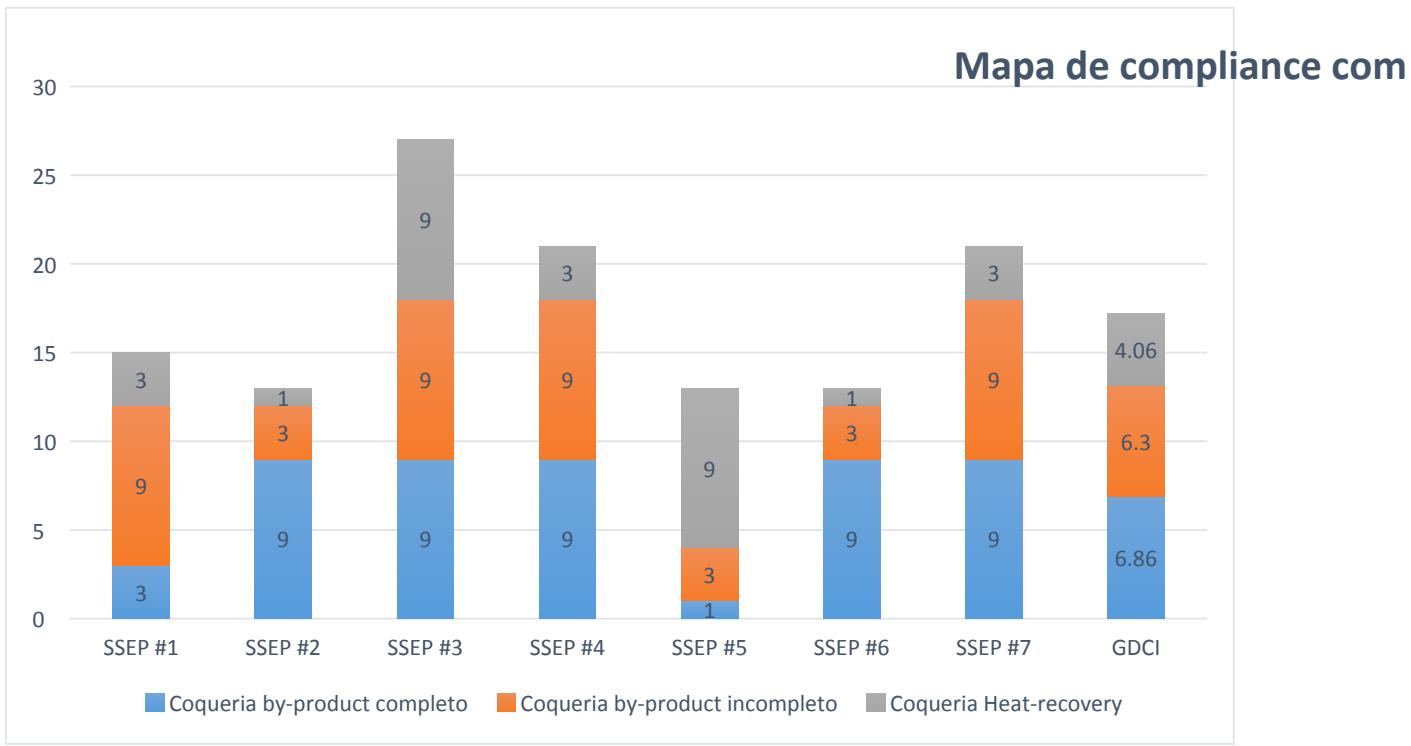


Figura 10 - Mapa de Compliance dos processos ao SSEP.

De acordo com a Figura 11, que apresenta o gráfico das contribuições de severidade que influenciam a sustentabilidade dos processos analisados, pode-se verificar que para o processo de coqueria By-product completo (Processo A), a métrica que possui uma contribuição mais significativa para o índice de severidade é o alcance dos efeitos físicos, ou seja, o risco associado a separação de amônia no processo carboquímico é o que mais contribui na avaliação de sustentabilidade desta alternativa. Isso porque considera o potencial de danos do risco social da amônia em caso de liberações acidentais, bem como a liberação de outros compostos com alto potencial de danos ambientais como a tríplice BTX e as grandes quantidades de óleos. Seguido do processo B, com grande quantidade de alcatrão e licor amoniacial, com comprovados efeitos nocivos ao meio ambiente.

Na alternativa de um processo de coqueificação heat-recovery (Processo C), os indicadores de CAPEX e intensidade de material são as contribuições mais significativas para influenciar a avaliação de sustentabilidade desta alternativa. Trata-se de uma tecnologia com alto valor de mercado e mão de obra altamente qualificada,

além disso não há a possibilidade do aproveitamento de grande parte dos produtos presentes nas baterias de coque By-product.

E como são muitos os indicadores influenciando a análise de sustentabilidade, percebe-se a importância da determinação do grau de sustentabilidade (*Sustainable Degree - SD*), que contabiliza todos os índices de severidade dos processos avaliados. E quanto maior o grau de sustentabilidade, mais sustentável é a alternativa analisada. Dessa forma, o processo de coqueria heat-recovery foi considerado a alternativa mais sustentável em comparação com os outros dois processos analisados e a coqueria by-product completo a menos sustentável. Este resultado poderia ter sido diferente caso o vetor PWV fosse dimensionado de forma diferente, levando a priorização de algumas métricas em detrimento de outras.

## Contribuição da Severidade e Grau de Sustentabilidade

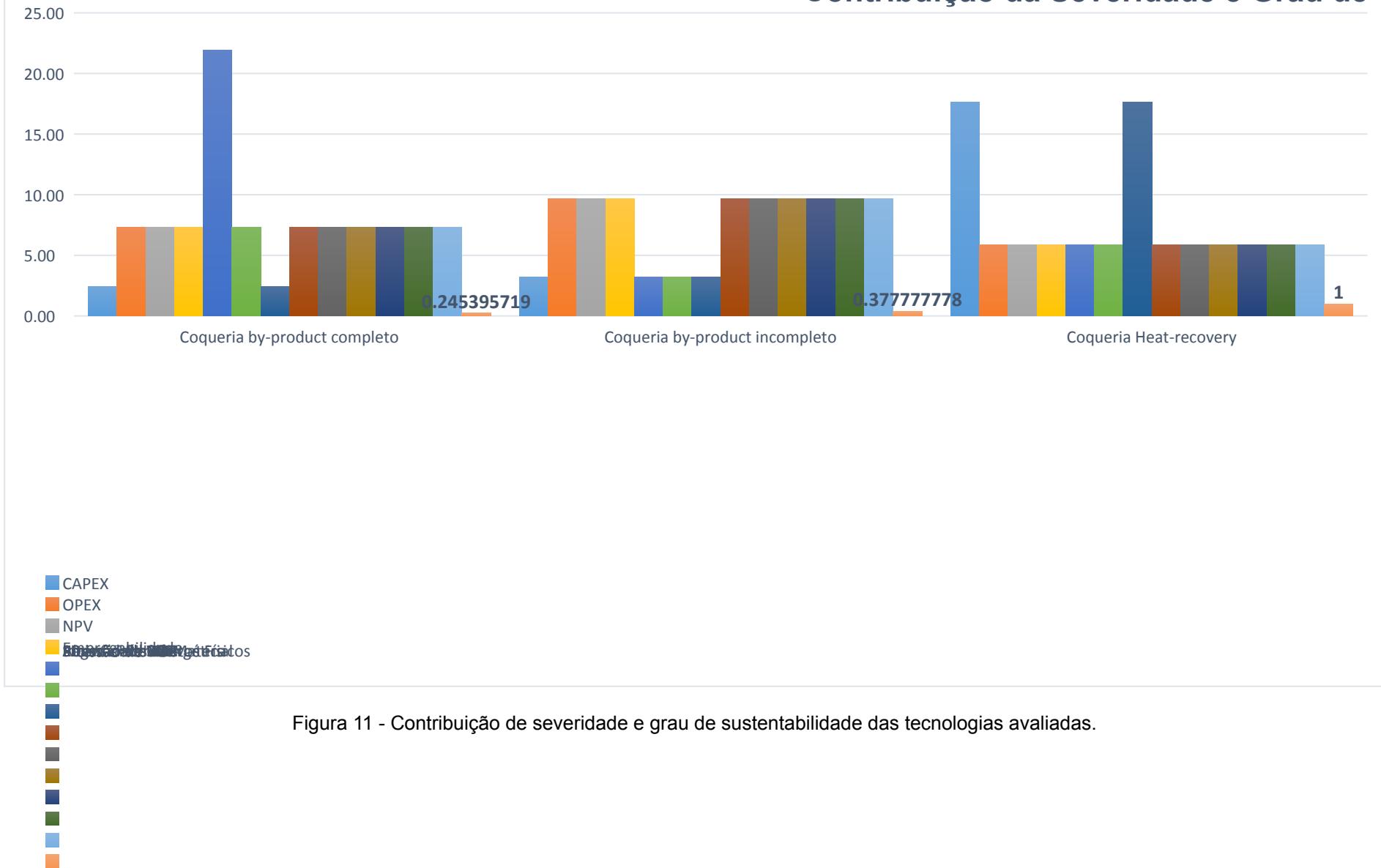


Figura 11 - Contribuição de severidade e grau de sustentabilidade das tecnologias avaliadas.

## **6 CONCLUSÃO**

Tendo em vista os objetivos definidos para o presente trabalho optou-se por pontuar cada etapa desse trabalho na conclusão, de forma que cada etapa do estudo, suas nuances, vantagens de desvantagens estejam claras e sejam possíveis de reproduzir e comparar com trabalho futuros que queiram se valer do método aqui empregado.

Tendo em vista o principal foco deste estudo, que era incorporar o fator ambiental nas análises de riscos propondo um método mais holístico do que o atualmente empregado por órgãos de controle ambiental no Brasil, o que ocorre de maneira a prover resultados unicamente dos riscos de liberações acidentais para a saúde das pessoas e pouco se analisa sobre o meio ambiente em si, a aplicação da Análise Multicritério considerando requisitos de emissões ambientais e consumo de recursos naturais, integrados à análise econômica e de impactos sociais, mostrou-se uma ferramenta versátil na escolha da tecnologia mais sustentável. Contudo, algumas ponderações devem ser realizadas, esclarecendo os limites dessa ferramenta.

Semelhante aos atuais métodos de análise de riscos, a definição de critérios heurísticos qualitativos requer certo grau de maturidade dos profissionais que participam do julgamento e da aderência de cada tecnologia a esses critérios, mas a definição dos mesmos, se bem realizada, é um poderoso indicador dos objetivos da MCDA e potencializa o uso da ferramenta ao estabelecer limites claros para a tendência e peso de cada indicador. Em contrapartida, quando mal definidos os critérios qualitativos, os quantitativos sofrem desregulagem e podem influenciar negativamente nas análises.

No entanto, a adoção de critérios heurísticos de sustentabilidade norteia a tomada de decisões provocando um pensamento abrangente e sistêmico, possibilitando que sejam considerados fatores prontamente ignorados quando da abertura, projeto ou encerramento de um negócio. Os SSEPs definidos neste trabalho tomaram por base critérios de sustentabilidade já consolidados, com intuito de definir os mais importantes critérios a serem alocados em um ambiente siderúrgico na sua produção de coque para abastecimento dos fornos. O grande fato é que, diferente dos métodos qualitativos de

análise de riscos ambientais, a definição de critérios no MCDA é menos subjetiva sobre os limites de classificação, e abre espaço para uma etapa quantitativa utilizando indicadores determinísticos. Foi possível, também, partindo dos princípios, notar a disparidade entre tecnologias ao considerar sua aderência a tais critérios, resultados estes que devem ser discutidos em momento oportuno.

Sobre os indicadores, sua definição não é um grande desafio, mas a coleta de dados confiáveis que é uma análise de confiabilidade dos mesmos é requerida, pois se fornecidos de maneira leviana, suas valores influenciam fortemente na matriz de criticalidade. É positivo, no entanto, o fato de que a maior parte das organizações se vale dos indicadores aqui utilizados para garantir seu controle operacional e financeiro, tornando as propostas de indicadores aqui utilizados ideal para o início do estudo em outros processos diferentes do processo de coqueificação.

No processo de definição de métricas de sustentabilidade para o setor foi possível verificar que, em vista da complexidade do processo em relação aos critérios ambientais, muitos indicadores são encontrados para dar base a uma análise voltada aos aspectos e impactos ambientais, esse resultado é díspar quando falamos de métricas sociais. Aí torna-se interessante os dados atualmente produzidos pelas análises de risco ambientais geradas a partir dos estudos realizados para atendimento à legislação ambiental.

A dificuldade no estabelecimento de métricas sociais encontra-se na ausência da sistematização de coletas de dados que mostrem de forma transparente e confiável os comportamentos dos *stakeholders*, em todos os níveis da organização e da sociedade, de forma que seja possível seguir os princípios anteriormente definidos para a escolha das métricas. Os resultados do risco individual e social se mostraram de grande valia para encopar a dimensão da análise da sustentabilidade na vertente dos fatores sociais.

Quando levamos em consideração o ponto de vista financeiro, existem algumas métricas que comprovam o desempenho econômico da organização, no entanto tais métricas têm pouca ou nenhuma relação direta com as demais, principalmente as ambientais e sociais. Esse fato revela uma falta de integração dos custos ambientais

nas tomadas de decisão baseadas em análises financeiras, o que pode deixar a empresa em risco, pois tais custos são frequentemente calculados após o início das operações. Este fato é um desafio que deve ser superado, visto que cada vez mais os custos ambientais estão sendo decisivos para aumentar ou reduzir a competitividade das empresas a nível mundial, visto que a legislação ambiental não é equalizada internacionalmente.

O uso dessas métricas utilizando análise multicritério permitiu verificar dentre as alternativas tecnológicas, qual apresenta melhores resultados do ponto de vista dos pilares da sustentabilidade, partindo de indicadores ambientais, sociais e econômicos, de forma a possibilitar uma abordagem mais assertiva para a tomada de decisões de forma estratégica e sustentável.

Sobre a criação de um fator comparativo entre as tecnologias, o SD, seu estabelecimento foi primordial para a conclusão da metodologia. Isso porque sem sua definição as matrizes utilizadas iriam continuar gerando uma série de critérios que dificilmente seriam reunidos de forma eficiente apenas analisando seus números/resultados.

Recomenda-se que em estudos semelhantes sejam estudados métodos que permitam estabelecer um grau de priorização das métricas de sustentabilidade, de forma a considerar quais são as prioridades da empresa em suas políticas econômicas, ambientais e sociais, essa recomendação esta baseada no fato de que o grande ponto fraco da análise multicritério adotada é a possibilidade de o vetor de peso estar mal calibrado para atingimento dos objetivos pretendidos com a análise.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAHAM, M. **Green Engineering Principle #2.** Disponível em:  
<<https://www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry/what-is-green-chemistry/principles/12-principles-of-green-engineering/green-engineering-principle-2.html>>. Acesso em: 23 ago. 2017.
- ABRAHAM, M. A. Chapter 1: Principles of Sustainable Engineering. **Sustainability Science and Engineering: Defining Principles**, v. 2711, n. 5, p. 30–10, 2006.
- ANASTAS, P. T.; ZIMMERMAN, J. B. Chapter 2: The Twelve Principles of Green Engineering as a Foundation for Sustainability BT - Sustainability Science and Engineering: Defining Principles. **Sustainability Science and Engineering: Defining Principles**, v. 2711, n. 5, p. 11–32, 2006.
- ANDERSON, V.; JOHNSON, L. Chapter 5: Systems thinking basics. **Sustainability Science and Engineering**, v. 2711, n. 5, p. 1–14, 1997.
- ARAÚJO, O. Q. F. Metrics for sustainability analysis of post-combustion abatement of CO<sub>2</sub> emissions: Microalgae mediated routes and CCS (carbon capture and storage). **Energy**, v. 92, p. 556–568, 2015.
- CONSTABLE, D. **Green Engineering Principle #1 - American Chemical Society.** Disponível em:  
<<https://www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry/what-is-green-chemistry/principles/12-principles-of-green-engineering/green-engineering-principle-1.html>>. Acesso em: 22 ago. 2017.
- GONZALEZ, M. A. **Green Engineering Principle #4 - American Chemical Society.** Disponível em:  
<<https://www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry/what-is-green-chemistry/principles/12-principles-of-green-engineering/green-engineering-principle-4.html>>. Acesso em: 22 ago. 2017.
- HEINE, L. G.; WILLARD, M. L. Chapter 13: Actively engage communities and stakeholders in the development of engineering solutions. **Sustainability Science and Engineering**, v. 1, n. C, p. 267–290, 2006.
- IABR, I. A. B. **Processo siderúrgico.** Disponível em:  
<<http://www.acobrasil.org.br/site2015/processo.html>>. Acesso em: 22 ago. 2017a.
- IABR, I. A. B. **Relatório de Sustentabilidade.** Disponível em:  
<<http://www.acobrasil.org.br/sustentabilidade/>>. Acesso em: 23 ago. 2017b.
- KEOLEIAN, G. A.; SPITZLEY, D. V. Chapter 7: Life Cycle Based Sustainability Metrics. **Sustainability Science and Engineering: Defining Principles**, v. 2711, n. 5, p. 127–159, 2006.

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

MME. Anuário estatístico do setor metalúrgico. p. 105, 2017.

PASMAN, H. J. ROGERS, W. J. MANNAN, S. M. How to consolidate Trevor's experience and knowledge? Impossibilities, reflections on possibilities, and call to action. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 25(5), p. 870–875, 2012.

SCHWARZ, J.; BEAVER, E. Use Sustainability Metrics to Guide Decision-Making. **Environmental Protection**, n. July, p. 58–63, 2002.

SHONNARD, D. Green Engineering Principle #12. **Science**, v. 319, n. 5867, p. 1238–1240, 29 fev. 2008.

WSA. **Global interactive map | worldsteel**. Disponível em: <<https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/global-map.html>>. Acesso em: 22 ago. 2017.

ZIMMERMAN, J. B.; ANASTAS, P. T. Chapter 10: When is waste not a waste? **Sustainability Science and Engineering**, v. 1, n. C, p. 201–221, 2006.