UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

JAQUELINE DELESPORTE DE LOURDES PINHEIRO

ECOLOGIA INDUSTRIAL:
UM ESTUDO SOBRE A VIABILIDADE DE APLICAÇÃO EM UMA EMPRESA METALÚRGICA

JUIZ DE FORA
2013

JAQUELINE DELESPORTE DE LOURDES PINHEIRO

ECOLOGIA INDUSTRIAL:
UM ESTUDO SOBRE A VIABILIDADE DE APLICAÇÃO EM UMA EMPRESA METALÚRGICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Produção.

Orientador: D. SC., Bruno Milanez

JUIZ DE FORA

2013

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ser fonte incessante de força e sabedoria.

Aos meus pais, pelo apoio e confiança, não apenas durante esta etapa, mas também durante toda minha vida.

Aos queridos amigos que me acompanharam durante essa trajetória e participaram dessa conquista.

Ao D. SC., Bruno Milanez, que apoiou e orientou a elaboração deste trabalho, pela transmissão do conhecimento e pela paciência dispendida.

Ao D. SC., Luiz Henrique Dias Alves, pelas colaborações e por participar da banca.

Ao Sérgio de Azevedo Penchel Júnior, por toda atenção e sugestões, bem como pela sua participação na banca.

Aos companheiros da empresa, sem os quais as inúmeras informações não seriam alcançadas.

E a todos que, de alguma forma, torceram por mim e contribuíram para que este momento chegasse. Obrigada!

RESUMO

O presente trabalho objetiva analisar se a aplicação dos conceitos da Ecologia Industrial é uma solução viável para os problemas ambientais e as dificuldades de obtenção de matéria prima enfrentados pelo setor metalúrgico. Nesse contexto, são avaliadas as oportunidades de sucesso da transferência de resíduos entre as indústrias do aço e do zinco e, em de que forma o resíduo daquela pode ser utilizado com fonte de matéria prima para esta. Inicialmente, é realizada uma revisão bibliográfica sobre a Ecologia Industrial, destacando suas principais características e sua aplicabilidade dentro do setor estudado. Em um segundo momento é feito um estudo de caso em uma empresa produtora de zinco, onde está sendo implantado um projeto que visa à utilização de matérias primas alternativas para a produção de zinco. O estudo demonstra que a aplicação dos conceitos de EI no setor metalúrgico se mostra como uma potencial solução para os problemas de obtenção de matéria prima e descarte de resíduos dentro desse mercado. Nesse sentido, é perceptível a efetiva consolidação de um ecossistema industrial a partir da integração entre os diferentes setores envolvidos centrado no intercâmbio eficiente de resíduos entre tais setores.

Palavras-chave: Ecologia Industrial, Metalurgia, Zinco

ABSTRACT

The purpose of this study is evaluate whether the application of the Industrial Ecology concepts is a viable solution to environmental problems and difficulties in obtaining raw materials faced by the metallurgical sector. In this context, the opportunities for successful transfer of waste between the steel and zinc industries are analyzed and, after that, how the waste of the steel sector can be used to supply the raw material necessity of the zinc industry is discussed. Initially, it is conducted a literature review on Industrial Ecology, highlighting its main characteristics and its applicability within the studied sector. Secondly is performed a case study in a factory of producing zinc, which has implemented a project in order to use of alternative raw materials for the production of zinc. The study demonstrates that the application of EI concepts in the metallurgical sector are shown as a potential solution to the problems of obtaining raw materials and waste disposal in the market discussed. Thus, it is noticeable the effective consolidation of an industrial ecosystem formed by the integration among the different sectors involved, which are focused on the efficient exchange of waste among these sectors.

Keywords: Industrial Ecology, Metallurgy, Zinc

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ecologia Industrial em relação a outros conceitos/ferramentas de preservação ambiental 29
Figura 2 - Interações dentro do ecossistema de Kalunborg 32
Figura 3 - Fluxo linear de materiais 38
Figura 4 - Ciclo fechado de materiais 38
Figura 5 - Relação de tecnologias e gestão com a Ecologia Industrial 39
Figura 6 - Áreas de abrangência da Ecologia Industrial 40
Figura 7 - Fluxo simplificado de produção do aço 44
Figura 8 - Desenho esquemático do processo *Waelz* 47
Figura 9 - Oferta X Demanda de zinco no mundo 48
Figura 10 - Necessidade de Concentrado China 49
Figura 11 - Perfil do consumo de zinco no mundo 49
Figura 12 - Fluxograma esquemático para produção de zinco segundo a rota Ustulação-Lixiviação-Eletrólise 50
Figura 13 - Fluxograma dos Processos da VM Zinco Juiz de Fora 54
Figura 14 - Fluxograma dos processos envolvidos no Polimetálicos 55
Figura 15 - Fluxograma atual dos processos envolvidos no Polimetálicos 58
Figura 16 - Evolução do estoque de PAE 60

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Cronograma do Projeto 26
Quadro 2 - Cronograma dos acordos estabelecidos em Kalunborg..... 33
Quadro 3 - Relação dos principais resíduos siderúrgicos..... 45
Quadro 4 - Processo de Tratamento de PAE 46

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

BOF - Fornos Básicos a Oxigênio

CNI - Confederação Nacional da Indústria

CRISP - *Centre de Recherche et d'Information Socio-Politique*

DFE - *Design for Environment*

EPA - *Environmental Protection Agency*

ETEI – Estação de Tratamento de Efluentes Industriais

FEA - Fornos Elétricos a Arco

IABr - Instituto Aço Brasil

IZA - *International Zinc Association*

MFA - Análise de Fluxo de Materiais

PAE - Pó de Aciaria Elétrica

SHG - *Special High Grade*

UNEP - *United Nations Environmental Program*

USEPA - *United States Environmental Protection Agency*

VMZ-JF - Votorantim Metais Zinco - Juiz de Fora

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 21

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS 21
1.2 JUSTIFICATIVA 22
1.3 ESCOPO DO TRABALHO 23
1.4 FORMULAÇÃO DE HIPÓTESES 24
1.5 ELABORAÇÃO DOS OBJETIVOS 24
1.6 DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA 24
1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO 25
1.8 CRONOGRAMA 25

2. ECOLOGIA INDUSTRIAL 27

2.1 DEFINIÇÕES 27
2.2 ELEMENTOS DA ECOLOGIA INDUSTRAL 31
2.2.1. O ESTABELECIMENTO DE ECOSSISTEMAS INDUSTRIAIS 31
2.2.2. EQUILÍBRIO ENTRE ENTRADA/SAÍDA DE MATERIAL DA INDÚSTRIA E CAPACIDADE DA BIOSFERA 34
2.2.3. DESMATERIALIZAÇÃO DAS ATIVIDADES 35
2.2.4. MELHORIA DOS CAMINHOS METABÓLICOS NOS PROCESSOS INDUSTRIAIS E USO DE MATERIAIS 36
2.2.5. PROCESSOS SISTÊMICOS DE USO DE ENERGIA 37
2.2.6. POLÍTICA ALINHADA COM UMA PERSPECTIVA DE LONGO PRAZO PARA EVOLUÇÃO DO SISTEMA INDUSTRIAL 38
2.3 ÁREAS DE ABRAGÊNCIA DA ECOLOGIA INDUSTRIAL 39
2.3.1 ABRANGÊNCIA AMBIENTAL E ECONÔMICA 40
2.4 CRÍTICAS E LIMITAÇÕES 41
2.5 APLICAÇÃO DA ECOLOGIA INDUSTRIAL NO SETOR METALÚRGICO 43
2.5.1. PÓ DE ACIARIA ELÉTRICA 44
2.5.2. RECUPERAÇÃO DO ZINCO CONTIDO NO PEA VIA PROCESSO *WAELZ* 45

3. DESENVOLVIMENTO 48

3.1. O MERCADO DE ZINCO 48
3.2. PRODUÇÃO DO ZINCO 50
3.3. O MERCADO DE PAE 51

3.4. PAE COMO FONTE SECUNDÁRIA DE ZINCO 52
3.5. ESTUDO DE CASO EM UMA EMPRESA METALÚRGICA 53
3.5.1 A VOTORANTIM METAIS ZINCO 53
3.5.2 O PROJETO POLIMETÁLICOS 55

4. RESULTADOS 57

4.1 RESULTADOS ALCANÇADOS 57
4.2 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS 58

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS 62

REFERÊNCIAS 65

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A preocupação com o esgotamento dos recursos naturais teve início na década de 1970 com o Relatório "Limites do Crescimento" do Clube de Roma (MEADOWS et al, 1972), em que se tornou evidente a capacidade do ser humano de alterar o meio ambiente positiva e/ou negativamente, deixando clara a interdependência entre a economia e o ambiente. Atualmente, existe o entendimento da necessidade de se buscar uma forma integrada de aliar a questão ambiental ao desenvolvimento econômico, de maneira a desmitificar que a economia é um sistema a parte da natureza, uma vez que "não existe atividade humana sem água, fotossíntese ou ação microbiana no solo" (CAVALCANTI, 1998, p. 17).

Nesse cenário estão as indústrias do setor metalúrgico, um dos principais setores da economia mundial, que muito contribuem para a poluição. Assim, constantemente são estudados novos meios de adaptar as unidades desse setor, seja através do aumento de eficiência, da reutilização e/ou da reciclagem, demonstrando um aumento crescente da preocupação ambiental nesse contexto.

Dentre as soluções estudadas para resolver a problemática ambiental, um conceito que vem tomando forma e se mostrando cada vez mais aplicável em diversos setores, inclusive no metalúrgico, é o de Ecologia Industrial (EI). Embora não seja encontrada no termo propriamente dito, a teoria de produção sem resíduos defendida pela Ecologia Industrial começou a surgir nas literaturas dos anos 1970 e, em meados dessa década, alguns artigos publicados como "*Principles of Systems*", 1968, e "*World Dynamics*", 1971 em Cambridge, bem como o livro "*Limits to Growth",* 1972 em Nova York viriam a se tornar precursores desse novo conceito. Mesmo tendo repercussão limitada na época, alguns países como o Japão viram nesse conceito a oportunidade de ser tornar competitivo através do desenvolvimento de atividades econômicas menos dependentes de recursos materiais.

Desde então, essa nova maneira de relacionamento entre a natureza e o meio ambiente vem sendo cada vez mais promovida, principalmente com a crescente necessidade de inovações que propiciem meios de produções mais sustentáveis. Essa tem sido a grande relevância da Ecologia Industrial, pois, na conjuntura atual, a mesma se destaca como um modo de utilizar, de forma mais econômica e menos degradante, os recursos naturais, visando diminuir ou até mesmo suprimir os resíduos industriais.

1.2 JUSTIFICATIVA

É perceptível que a sustentabilidade ambiental vem ganhando cada vez mais importância na definição das estratégias competitivas das empresas, principalmente naquelas que atuam no ramo metalúrgico, químico e energético.

No século XXI, o setor industrial vem investindo em tecnologias de baixo consumo como forma de aumentar a eficiência do uso dos recursos naturais Atrelado a isso, conceitos relacionados à Ecologia Industrial, reciclagem e ciclo de vida dos materiais tornaram-se presentes em regulamentos e normas técnicas, o que serviu de incentivo para o desenvolvimento tecnológico e pesquisas nesse campo. Entretanto, apesar do visível desenvolvimento, a otimização do uso dos recursos naturais ainda tem muito a aprimorar, seja com relação ao potencial de conservação de energia da sociedade ou à importante questão da poluição.

Atualmente, uma empresa competitiva precisa inovar de forma constante, visando sempre uma produção “mais limpa”, valendo-se de insumos e processos menos agressivos a natureza e, de preferência, recicláveis. Nesse contexto, a preocupação advinda de organizações industriais, associações ambientais e de toda a sociedade revela a necessidade de soluções que envolvam a mudança de processos de produção para redução/prevenção de resíduos e desenvolvimento de processos para reaproveitamento de rejeitos, conforme se pretende estudar nesse trabalho.

Apesar da existência de estudos sobre Ecologia Industrial, é notório que tal assunto ainda é relativamente novo e pouco difundido no Brasil, possuindo rara aplicação no país. O presente trabalho terá uma abordagem voltada para a prática, através de um estudo de caso em uma empresa produtora de zinco, podendo ser considerado então, de grande valia para o desenvolvimento do conceito e geração de oportunidades de aplicação do mesmo em território nacional.

Além disso, outro ponto a ser destacado são os benefícios advindos da aplicação do conceito de Ecologia Industrial para o setor metalúrgico e para a sociedade de maneira geral. Nesse sentido, vale atentar-se para o fato de que, dentro da unidade produtora estudada neste documento, o maior custo de produção é oriundo da compra do sulfeto de zinco importado, principal matéria prima necessária à produção do zinco metálico. Sabendo-se da possibilidade

de reaproveitamento do Pó de Aciaria Elétrica (PAE), um resíduo Classe I [1]resultante da produção de aço, em substituição ao sulfeto de zinco importado, propõe-se um novo modelo de relacionamento entre as indústrias do setor metalúrgico, em que o resíduo da indústria do aço seria matéria prima para a indústria do zinco. Tal proposta poderia contribuir a minimização dos custos advindos da importação de matéria prima para a produção de zinco e redução dos impactos ambientais advindos do setor.

1.3 ESCOPO DO TRABALHO

Este estudo busca discutir até que ponto a aplicação dos conceitos da Ecologia Industrial pode se mostrar com uma solução para essa problemática vivida por uma empresa metalúrgica que atua no mercado do zinco.

O enfoque do trabalho será um estudo de caso na empresa multinacional Votorantim Metais Zinco - Unidade Juiz de Fora (VMZ-JF). Este estudo será limitado à identificação, detalhamento e análise da aplicabilidade dos conceitos de Ecologia Industrial na planta através da implantação de um projeto que visa à utilização de matérias primas alternativas para a produção de zinco. Tendo em vista que o projeto ainda se encontra em processo de desenvolvimento quando do desenvolvimento deste trabalho, as referências aqui utilizadas estarão sempre relacionadas à fase de implantação do projeto.

O estudo teórico se limitará a abordar os conceitos, princípios e contextualização mercadológica e ambiental para a aplicação da Ecologia Industrial no setor metalúrgico, dando ênfase às indústrias do zinco e do aço.

---

[1] De acordo com a norma ABNT NBR-10004 (2004), resíduos sólidos são classificados quanto aos seus potenciais riscos de contaminação do meio ambiente. A classificação é dividida em duas classes:

1) Resíduos Classe I – Perigosos

2) Resíduos Classe II – Não Perigosos

- Classe II A- Não Inertes
- Classe II B – Inertes

Os resíduos classificados como perigosos são aqueles que apresentam características de inflamabilidade, reatividade, patogenicidade ou toxicidade, riscos à saúde pública, ou ainda provocam efeitos adversos ao meio ambiente quando manuseados ou dispostos de forma inadequada.

1.4 FORMULAÇÃO DE HIPÓTESES

Diante da problemática tratada neste trabalho que envolve a aplicabilidade da Ecologia Industrial no setor metalúrgico, é assumida como hipótese que a utilização dos conceitos da EI é, de fato, viável. Nesse contexto, pretende-se avaliar até que ponto o intercâmbio do resíduo PAE da siderurgia para a indústria do zinco pode ser uma solução viável para ambos os setores, tanto do ponto de vista ambiental e quanto do econômico.

Para essa análise, parte-se do pressuposto de que o processo *Waelz* seria aquele mais exequível para a recuperação do zinco presente no PAE e mais viável para a consolidação de projetos de integração dos setores envolvidos como componentes de um ecossistema industrial. A partir dessa premissa, a avaliação da recuperação de zinco será baseada fundamentalmente em experiências que adotem esse processo.

1.5 ELABORAÇÃO DOS OBJETIVOS

De maneira geral, o trabalho em questão tem como objetivo geral avaliar o potencial da Ecologia Industrial se tornar uma das estratégias para problemas de obtenção de matéria prima e para as questões ambientais ligadas ao setor metalúrgico.

Para alcançar esse objetivo, são propostas os seguintes objetivos específicos:

- Aprofundar o conhecimento conceitual sobre Ecologia Industrial e de sua aplicação no setor metalúrgico;
- Analisar a conjuntura do mercado nacional e global de zinco;
- Avaliar a viabilidade econômica e ambiental do uso de PAE como fonte de matéria prima para a produção de zinco;
- Estudar os riscos e benefícios da construção de uma planta de recuperação do zinco para o contexto atual do mercado de metalúrgico.

1.6 DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA

O presente trabalho é classificado como uma pesquisa do tipo aplicada, devido ao seu foco prático e direcionado à solução de problemas específicos, envolvendo verdades e interesses locais. Quanto aos objetivos, podem ser considerados exploratórios, por proporcionarem maior familiaridade com o problema, visando torná-lo explícito ou incentivar

a construção de hipóteses. A forma de abordagem é qualitativa, pois considera que há uma relação dinâmica entre o mundo real e o sujeito. Além disso, o estudo é baseado no método de estudo de caso.

Os estudos de caso são usados para vivenciar um momento atual e, segundo Gil (2002), algumas etapas podem ser seguidas na aplicação dessa metodologia:

- Formulação do problema, que é a base da pesquisa e requer profunda reflexão das várias fontes bibliográficas utilizadas;
- Definição da unidade-caso, que se refere a um caso base de um determinado contexto;
- Elaboração do protocolo, que aumenta a confiabilidade do caso, pois define como será realizada a coleta de dados e sua aplicação;
- Coleta de dados, que utiliza de entrevistas como colaboradores da empresa estudada, documentos e demais meios para adquirir as informações desejadas referentes ao assunto;
- Análise dos dados, que separa os dados coletados em informações úteis e não úteis, estruturando as mesmas em formato de relatório.

1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho é estruturado em cinco capítulos. O capítulo I faz uma introdução dos principais elementos do estudo, apresentando justificativa, escopo, objetivos, metodologia, estrutura do trabalho e cronograma. O capítulo II traz uma revisão bibliográfica referente à Ecologia Industrial e discute as possibilidades de sua aplicação dentro do setor metalúrgico. Já o capítulo III apresenta a conjuntura do mercado metalúrgico com foco na indústria do zinco e do aço, detalhando a empresa que será objeto de estudo neste documento. Em seguida, o capítulo IV expõe os resultados obtidos com este trabalho e faz uma análise crítica dos mesmos. Por fim, o capítulo V traz as considerações finais do estudo e apresenta as recomendações para trabalhos futuros relacionados a este tema.

1.8 CRONOGRAMA

Pode-se de dividir o desenvolvimento do trabalho em sete etapas, sendo o início marcado pela revisão bibliográfica do assunto e pela coleta de dados da empresa em estudo.

Após a análise crítica das informações angariadas e a consolidação do embasamento teórico será escrito e revisado o relatório proposto neste documento, conforme pode ser visualizado no Quadro 1 a seguir:

Meses / quizenas	mar/12	abr/12		mai/12		ago/12		set/12		out/12		mai/12		jun/12		jul/13		ago/13
	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª
1. Escolha do tema	X																	
2. Revisão bibliográfica		X	X	X	X	X	X	X	X									
3. Coleta de dados na Votorantim					X	X	X	X	X			X	X					
4. Análise dos dados													X	X	X			
5. Análise dos resultados														X	X	X	X	
6. Elaboração do relatório							X	X	X	X				X	X	X	X	
7. Revisão do relatório									X	X	X						X	X

Quadro 1 - Cronograma do Projeto
Fonte: Desenvolvido pela autora

2. ECOLOGIA INDUSTRIAL

2.1 DEFINIÇÕES

O desenvolvimento de estudos voltados para a Ecologia Industrial tem origem recente, sendo mais difundida a partir do início dos anos 1990 a partir da movimentação de engenheiros industriais que faziam parte da *"National Academy of Engineering"* nos Estados Unidos (ERKMAN, 1997). Atualmente esse conceito vem evoluindo e sofrendo transformações, se fazendo cada vez mais presente no meio acadêmico e na indústria.

O surgimento do primeiro conceito de Ecologia Industrial com repercussão reconhecida se deu com a publicação do artigo "Estratégias de Manufatura", de Robert Frosch e Nicholas Gallopoulos (FROCH E GALLOPOULOS, 1989). Segundo Costa (2002), esses autores defendiam a transformação do modo tradicional de atividade industrial, baseado no consumo de insumos necessários à produção pelas firmas individuais e posterior geração de emissões e resíduos. A proposta dos mesmos seria a criação de um sistema mais integrado denominado ecossistema industrial, em que se tem uma otimização do consumo de materiais e energia e reaproveitamento de recursos - o que é resíduo para um processo pode ser insumo para outros processos.

Embora esse artigo seja por certo a fonte do atual avanço da Ecologia Industrial, as ideias que ele continha não eram exatamente novas. Como antecedentes, pode-se mencionar especialmente o estudo *"L'écosystème Belgique. Essai d'écologie industrielle"* (O ecossistema Belga. Ensaio de Ecologia Industrial), realizado no início da década de 1980 pelo *Centre de Recherche et d'Information Socio-Politique* (CRISP) na Bélgica. Outra abordagem precursora nessa área foi feita no Japão, nos anos 1970, com um Grupo de Trabalho Indústria-Ecologia organizado pelo Ministério de Comércio Internacional e Indústria (ERKMAN et al, 2001).

É importante ressaltar que a Ecologia Industrial não deve ser considerada como uma ferramenta rígida resumida em um conjunto de ações, sendo na verdade uma ferramenta de análise do cumprimento das leis ambientais, bem como o aumento da eficiência de processos industriais. A definição de Ecologia Industrial segundo Allenby (1992, p. 57) e dada por:

> "(...) os meios que um estado de desenvolvimento sustentável é atingido e mantido. Consiste em uma visão sistêmica das atividades econômicas e suas relações com os sistemas biológicos, químicos e físicos com o objetivo de alcançar e manter a espécie humana em um nível que pode ser sustentado indefinidamente, dadas as evoluções econômica, cultural e tecnológica."

Para Gonzales (2009, p. 250) a Ecologia Industrial é tratada de maneira mais estratégica, uma vez que:

> "(...) permite um vislumbre do médio e longo prazo, através da evolução de padrões de produção e consumo voltados para a preservação dos recursos naturais visando o impacto negativo sobre o ambiente, enquanto há chances de vantagens econômicas para as empresas, permitindo-lhes favorecer devido à concorrência imposta por um mundo globalizado."

Apesar da existência de diferentes definições e entendimento para a Ecologia Industrial na literatura, há pontos coincidentes entre elas. De um modo geral, segundo Erkman (1997), é possível listar no mínimo três aspectos comuns entre elas:

- É uma visão sistêmica, abrangente e integrada de todos os componentes da economia industrial e suas relações com a biosfera.
- Enfatiza o substrato biofísico das atividades do ser humano, ou seja, os padrões complexos de fluxos de materiais dentro e fora do sistema industrial, em contraste com abordagens atuais que mais consideram a economia em termos de unidades monetárias abstratas, ou alternativamente, os fluxos de energia.
- Considera a dinâmica tecnológica, reconhecendo que o desenvolvimento de tecnologias é um elemento crucial, porém não exclusivo, para a transição do sistema industrial insustentável atual a um ecossistema industrial viável.

Além da Ecologia Industrial, existem outras ferramentas de análise que, apesar de terem objetivos que vão ao encontro deste conceito, não devem ser confundidas com ele, uma vez que tais abordagens não são excludentes, e sim, complementares, conforme exposto na figura 1 seguinte:

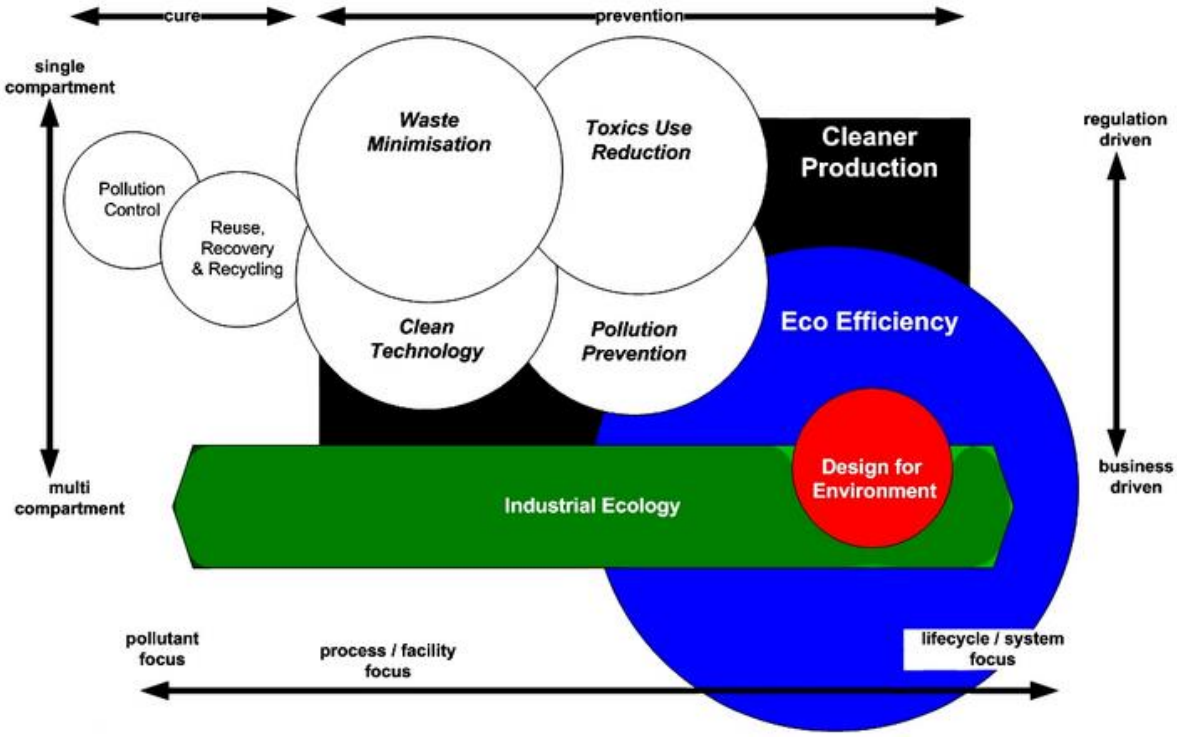

Figura 1 - Ecologia Industrial em relação a outros conceitos/ferramentas de preservação ambiental
Fonte: Van Berkel, (2000)

A ideia de Metabolismo Industrial defendida por Ayres (1994) propunha a analogia de atividades industriais com a dinâmica dos organismos biológicos. Tenta-se entender a relação da circulação de matérias e do fluxo de energia com as ações humanas através da descrição e elaboração de balanços dos fluxos de materiais e energia envolvidos ao longo dos processos industriais. Entretanto, de acordo com Erkman (1997), a Ecologia Industrial está à frente deste conceito, uma vez que o Metabolismo Industrial se limita a analisar o funcionamento e a regulação dos sistemas produtivos, bem como suas relações com o ambiente, sem nada propor a respeito dos modos de reestruturação compatíveis com os ecossistemas naturais e a perspectiva da sustentabilidade.

A Produção Mais Limpa é vista como a "aplicação contínua de uma estratégia integrada de prevenção ambiental a processos, produtos e serviços, para aumentar a eficiência de produção e reduzir os riscos para o ser humano e o ambiente" (GIANNETTI, 2006, p. 119). Mostrando-se uma ferramenta menos abrangente possuindo foco exclusivo prevenção da poluição, seja através da redução de emissões atmosféricas, do consumo de energia e de água, ou pela redução de geração de resíduos sólidos e contaminação de efluentes líquidos.

Já a Análise do Ciclo de Vida propõe que o mapeamento dos impactos gerados por um produto pode ser realizado através de uma metodologia de análise de todas as fases necessárias à construção do produto em estudo, desde a extração dos recursos requeridos até o

descarte final do mesmo (HISCHIER, 2010). Atrelado a esse conceito pode-se citar o Projeto para o Ambiente (*Design for the Environment, DfE*), que é uma ferramenta baseada no exame de todo o ciclo de vida de um produto a fim de se encontrar oportunidades de melhoria no projeto de maneira a minimizar o impacto ambiental do produto desde sua fabricação até seu descarte (GARNER, 1995).

Sagar e Frosch (1997) pontuam uma série de ações que, juntamente com o entendimento da Ecologia Industrial, possuem considerável relevância no contexto de elaboração de análises integradas e construção de soluções viáveis para um determinado ecossistema industrial. Segundo tais autores, a *United States Environmental Protection Agency* (USEPA) sugere como principais ações para proteção do meio ambiente reduzir/reutilizar/reciclar, as quais ao serem trabalhadas dentro da abordagem da EI irão resultar em um melhor quadro analítico para a correta tomada de decisão de uma estratégia.

Para os propositores da Ecologia Industrial, o advento de ecoparques industriais seria um elemento essencial à viabilização do ecossistema industrial, uma vez que a criação de redes de empresas envolve unidades de produção diversificadas e bem definidas que transacionam produtos e energia (CÔTÉ E COHEN-ROSENTHAL, 1998). Entretanto, é importante ressaltar que Ecoparques Industriais não são sinônimos de Ecologia Industrial, mas, na verdade, uma possível aplicação do conceito.

Nesse sentido, valendo-se de conceitos já consolidados como Produção mais Limpa, Controle e Prevenção da Poluição, Projeto para o Ambiente e Análise de Ciclo de Vida, de aplicações de redução, reutilização e reciclagem, bem como de aplicações como os ecoparques, a Ecologia Industrial, de maneira geral, propõe uma nova organização do fluxo de energia e materiais envolvidos nas atividades industriais, promovendo uma maior interface das atividades econômicas e otimizando o uso dos recursos ambientais.

Sendo assim, embora a Ecologia Industrial não tenha um quadro bem estabelecido de conceitos e aplicações práticas, o avanço das visões e atividades que foram incorporadas e desenvolvidas ao longo do tempo levou ao desenvolvimento de seis elementos que, de acordo com o Tibbs (1993), compõem um programa geral de atuação e que serão abordados a seguir.

2.2 ELEMENTOS DA ECOLOGIA INDUSTRAL

2.2.1. O estabelecimento de ecossistemas industriais

Conforme defendido por Tibbs (1993), os ecossistemas industriais são extensões do conceito de Ciclo de Vida, transformando a avaliação em implementação. Isso envolve a criação de um ciclo fechado de materiais através da prática da reciclagem, otimização no uso de insumos e energia, minimização na geração de resíduos e reaproveitamento de rejeitos de um processo como fonte de matéria prima para outro.

Na biologia, o ecossistema é definido como a "unidade natural que abrange o conjunto de seres vivos e de materiais inorgânicos os quais interagem a fim de constituir um sistema estável no qual o intercâmbio de materiais entre ambos segue trajetórias circulares" (ODUM,1953 apud COUTINHO et al, 2011, p. 74). No campo industrial, a simbiose é baseada em três tipos de informações: geográfica, organizacional e processual.

Através das relações entre tais informações se estabelece a conexão entre as atividades industriais no nível regional e se consegue efetuar o planejamento de sistemas industriais que possuam uma ciclagem contínua dos materiais, tornando-os mais eficientes. O intercâmbio ocorre em um grupo de empresas de um mesmo parque industrial, vizinhas ou de uma mesma região, que busca a reutilização de subprodutos (energia, água e materiais) umas das outras, agregando valor ao que até então seriam resíduos. Esse intercâmbio pode ir além da simples transferência de subprodutos locais, sendo possível estabelecer uma interconectividade industrial de empresas pertencentes a diferentes parques industriais e organizações gerenciadoras.

Nesse sentido, empresas interagindo entre si para desenvolver uma região do ponto de vista ambiental, social e econômico criam opções de compartilhamento de serviços e facilidades, em que o processo de conexão entre as organizações passa a ter uma relação mercadológica e logística. A primeira traduz a relação entre a oferta e procura de acordo com o tipo de processo industrial, e a segunda identifica e organiza os meios que proporcionam o melhor fluxo dos materiais, levando em consideração a posição geográfica e o campo de atuação de cada empresa componente do ecossistema industrial (PEREIRA, 2007).

Um exemplo sempre citado quando há referência a este assunto é o ocorrido em 1961, na cidade de Kalunborg, na Dinamarca. Com a chegada de uma refinaria de petróleo instalada no município, foi necessário o estabelecimento de um acordo entre as autoridades locais e a empresa, garantindo o abastecimento de água potável na região. Foi liberado o uso do Lago

Tisso como fonte de água pela refinaria, entretanto a mesma foi incumbida de financiar o projeto de construção de uma linha adutora para a cidade, atendendo assim as necessidades de ambos os lados (GARNER, 1995).

O ecoparque dinamarquês foi constituído pela integração de vários parceiros além da refinaria e as autoridades locais, contando com a participação de: termoelétrica, empresa de gás, biotecnologia, indústria química, de gesso e de fertilizantes, sendo considerado como referência que rendeu frutos em todo mundo. Na figura 2 seguinte é possível visualizar os canais de integração entre os participantes desse parque industrial.

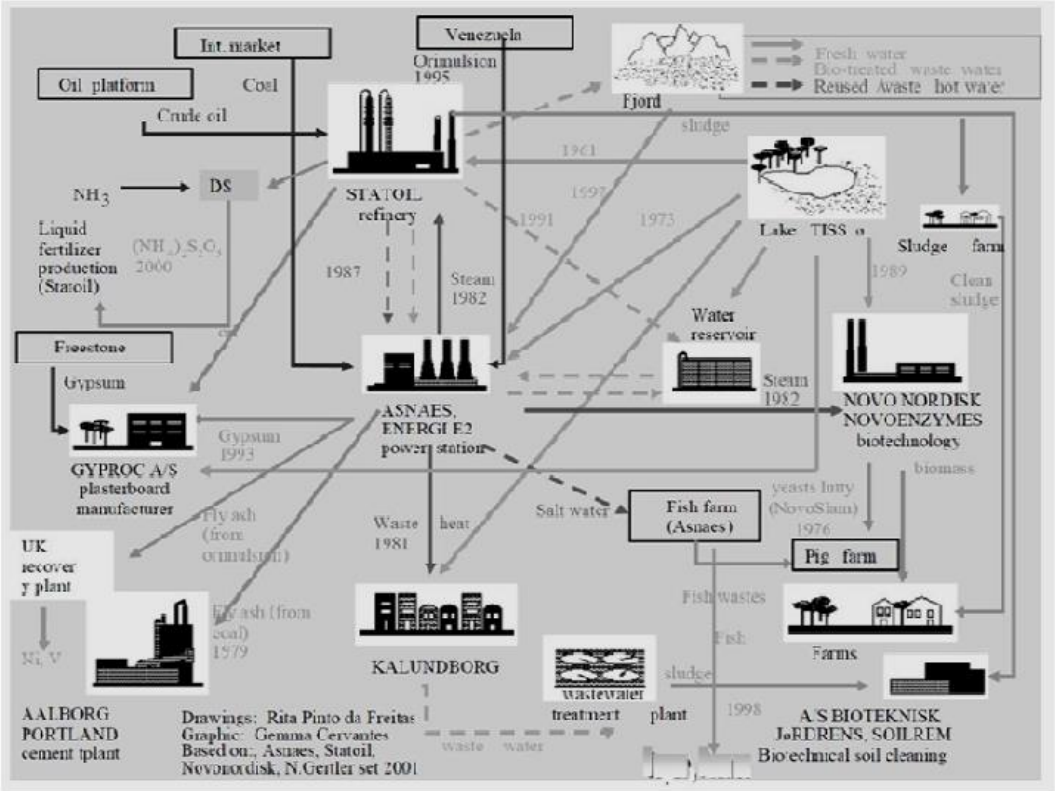

Figura 2 - Interações dentro do ecossistema de Kalunborg
Fonte: CERVANTES (2001)

O estabelecimento dessa simbiose apresentada na Figura 2 não se deu de maneira imediata, sendo que tais relações foram constituídas ao longo dos anos, conforme os acordos estabelecidos seguiram a cronologia exposta no Quadro 2:

1961: - Refinaria Statoil passa a utilizar a água do Lago Tissø	**1982:** - Statoil disponibiliza vapor para Novo Nordisk
1972: - Statoil fornece excesso de gás para a empresa de Gesso Gyproc	**1987:** - Statoil fornece efluente para resfriamento da Asnæs
1973: - Termoelétrica Asnæs faz acordo para utilização da água do Lago Tissø	**1989:** - Asnæs fornece água aquecida para a piscicultura
1976: - A empresa de biotecnologia Novo Nordisk fornece lodo biológico para fazendas	**1990:** - Sistema de dessulfurização na Asnæs serve de matéria prima para a produção de H2SO4
1979: - Asnæs fornece cinzas para produtora de cimento Aalborg	**1992:** - Statoil disponibiliza gás expelido da refinaria para Asnæs
1981: - Asnæs fornece água aquecida para a cidade	**1993:** - Asnæs fornece CaSO4 para Gyproc

Quadro 2 - Cronograma dos acordos estabelecidos em Kalunborg
Fonte: Adaptado GARNER (1995)

Para Garner (1995), os principais benefícios alcançados através dos acordos de cooperação entre as indústrias de Kalunborg foram:

- Reduções do consumo de energia e serviços públicos em termos de carvão, óleo e água;
- Reduções das emissões de SO2 e CO2;
- Minimização do volume de efluentes e melhoria da qualidade dos efluentes ainda emitidos;
- Conversão de resíduos advindos de cinzas, enxofre, lama biológica, e gesso em matéria-prima para a produção;
- Desenvolvimento gradual de um novo "Modo de pensar" aplicável a muitos outros setores, podendo ser útil no planejamento de futuros complexos industriais;
- Melhora na imagem de Kalundborg, que passou a ser vista como um modelo de cidade limpa industrial.

O investimento aproximado na construção do parque de Kalundborg foi de 60 milhões de dólares. Entretanto os benefícios ecológicos, acompanhados dos benefícios econômicos, foram estimados em cerca de US$ 12 a US$ 15 milhões de dólares por ano (HEERES et al, 2004), apresentando um retorno de investimento de aproximadamente cinco anos.

2.2.2. Equilíbrio entre entrada/saída de material da indústria e capacidade da biosfera

A Ecologia industrial objetiva evitar impactos ambientais advindos da indústria, tentando promover uma correta gestão da interface entre a indústria e o meio ambiente natural. Entretanto, vale ressaltar que isto requer uma expansão do conhecimento sobre a dinâmica dos ecossistemas naturais em escalas local e global, compreensão detalhada capacidade de assimilação dos ecossistemas e tempos de recuperação, bem como reais informações sobre as atuais condições ambientais. Irá envolver também o estudo das formas que a indústria pode seguramente interagir com a natureza, em termos de localização, intensidade e tempo, desenvolvendo meios de ajustar continuamente essa interação em resposta às condições ambientais (TIBBS, 1993).

Nesse sentido já foram percebidos esforços através do uso de tecnologias computacionais avançadas na tentativa de criar uma imagem do funcionamento do ecossistema planetário, estabelecendo um monitoramento contínuo das condições ambientais em escala local e global. No entanto, futuramente espera-se a integração em larga escala de dados ambientais armazenados em computadores de uma empresa específica com dados nacionais, dados de satélite e dados coletados em tempo real por um grande número de sensores biológicos, para fornecer uma imagem verdadeiramente global em tempo real das condições ambientais. Sendo a elaboração de um banco de dados de subprodutos com a quantidade, frequência de geração, classificação, principais componentes que possam viabilizar, ou não, o seu reaproveitamento em outra empresa, uma fator fundamental para a prática da Simbiose Industrial (KINCAID, 2001).

É perceptível que o desenvolvimento desta área depende muito da compreensão teórica da ecologia natural, uma vez que esta ciência não se mostra consolidada, apresentado dificuldades no entendimento dos processos ecológicos e a interação entre os mesmos. Dessa maneira, em apoio à aplicação prática da compreensão ecológica, seria possível a criação de indicadores específicos que refletissem o impacto de ecossistemas industriais sobre os aspectos ambientais. Por exemplo, em uma determinada instalação industrial poderia ser elaborado um esquema de pontuação para o equilíbrio de lançamento de CO_2 para o ambiente. Essa pontuação poderia ser utilizada para a realização de comparações entre organizações, para o monitoramento exigido em auditorias ambientais, além de servir como uma base para a avaliação de uma taxa sobre o carbono (TIBBS, 1993).

Além disso, Tibbs (1993) afirma que outra maneira de se avaliar a interface entre o ambiente e a indústria é a elaboração de um "balanço de massa" baseado na abordagem do conceito de "ciclos de materiais". Esse "balanço de massa" é feito através da coleta de dados numéricos para entradas diretas de materiais, disponíveis a partir de estatísticas ou registros individuais de cada empresa, em combinação com detalhes dos processos em estudo, possibilitando uma avaliação mais precisa dos resíduos liberados para o ambiente. Nesse sentido, deve-se levar em consideração o conceito de "ciclos de materiais" como uma extensão da ideia de ciclos biológicos, em que se propõe incluir todos os fluxos dentro do sistema industrial (JELINSKI, 1992). Tentando-se estabelecer, a partir doa resultados obtidos, a melhor forma de equilibrar a entrada e a saída industrial à capacidade dos ecossistemas naturais.

2.2.3. Desmaterialização das atividades

Segundo Erkman et al (2001) o objetivo da desmaterialização é minimizar o fluxo de material e energia para uma mesma unidade de serviço ou produto, ou seja, a utilização de menos de entrada por unidade de produção. Nesse contexto, defende-se que, através do desenvolvimento tecnológico, é possível a obtenção de um aumento de eficiência, conseguindo-se produzir um mesmo produto valendo-se de uma quantidade menor de matéria, fabricando produtos mais leves ou com um melhor reaproveitamento após o uso. Os resultados advindos da desmaterialização da economia estão nos campos econômico e ambiental, em que o crescimento econômico é dissociado do aumento da utilização de recursos e de resíduos (PEREIRA, 2004).

Além disso, a desmaterialização pode ser classificada em relativa, referente à obtenção de mais serviços e bens a partir de uma determinada quantidade de matéria; e em absoluta, relacionada com a redução da necessidade de recursos no sistema industrial como um todo. Todavia, é importante ressaltar que a desmaterialização não é tão fácil como pode parecer: produtos menos volumosos podem ter menor durabilidade e acabar resultando em consumo de mais recursos e gerando mais lixo. Por outro lado, a diminuição do uso de materiais não vale apenas para bens de consumo, mas também para a infraestrutura pesada do sistema industrial, como é o caso de edifícios, estradas e redes de transporte (HERMAN, 1989).

Conforme Costa (2002), os exemplos mais citados são os da indústria eletrônica e da indústria de comunicações. A revolução dos transistores permitiu uma grande redução de massa dos componentes eletrônicos em relação à tecnologia das válvulas. A redução dos

circuitos se traduziu num círculo virtuoso de relações, no qual o desenvolvimento de tecnologias estimulou outras mais, permitindo incrementar o desempenho e reduzir a utilização de materiais.

Desse modo, é perceptível, conforme abordado por Stahel e Jackson (1993) que muito provavelmente, uma das melhores maneiras de se "desmaterializar" a economia é ressaltar a utilidade que o objeto ou serviço proporciona, isto é, vender o uso do produto mais do que o produto em si. Por muitos anos, o nosso sistema econômico tem sido organizado com o propósito de maximizar a produção. No contexto da Ecologia Industrial, o objetivo é priorizar o uso de modo a evoluir para uma sociedade realmente orientada à utilidade prática. Isto envolve aspectos como a durabilidade (extensão da vida útil do produto), a opção pelo aluguel em lugar da aquisição e vendas que focalizem o uso do produto em vez do produto em si.

Apesar das vantagens da desmaterialização, ela ainda é um tema complexo e envolve diferentes nuances. Uma área que merece investigação futura é a relação entre o PIB e as emissões de CO2 levando-se em consideração a Curva Ambiental de Kuznets. Este modelo descreve o relacionamento entre crescimento econômico e nível de poluição de um país, defendendo que quando um país começa a se desenvolver, seu crescimento econômico é acompanhado pelo aumento da contaminação, entretanto após a economia atingir um certo nível de crescimento, o grau de poluição começa a decrescer (KEARSLEY e RIDDEL, 2010). Nesse contexto, existem situações em que países alcançam a desmaterialização pela transferência das atividades mais intensivas em recursos naturais e em seus respectivos impactos ambientais, para outras regiões denominadas "paraísos de poluição", que são, na maioria das vezes, países emergentes. Essa estratégia, porém, não deve ser confundida com a desmaterialização da economia.

2.2.4. Melhoria dos caminhos metabólicos nos processos industriais e uso de materiais

Para Tibbs (1993) ecossistemas industriais e metabolismos industriais são conceitos paralelos. A ideia do ecossistema industrial centra-se no intercâmbio eficiente de subprodutos e intermediários entre as empresas relacionadas, que correspondem aproximadamente aos indivíduos de uma espécie no ecossistema biológico. Por outro lado, o metabolismo industrial está ligado à eficiência dos processos metabólicos que ocorrem dentro dos indivíduos das espécies, que correspondem aproximadamente às empresas individuais ou operações de processos industriais. O estudo sistemático do tipo de reações químicas e materiais que estão

envolvidos no sistema industrial indica um número de áreas potenciais de melhoria. Quase todos os processos industriais tendem a envolver múltiplas etapas separadas, em que subprodutos são incorporados na fase de produção seguinte, ou libertados como resíduos, em vez de serem reutilizados. Tendo-se então que a redução do número de passos do processo produtivo pode ser um poderoso e significativo aumento da eficiência energética.

Nesse contexto, conforme citado por Van Berkel (2000) a empresa pioneira na utilização de uma abordagem preventiva para gestão ambiental industrial foi a 3M, lançando em 1975 o programa 3P, *"Pollution Prevention Pays".* Tal programa abordava a eliminação da poluição na fonte - nos processos de fabricação e produtos - ao invés de removê-la depois que ela havia sido criada. Mesmo a ideia não sendo nova em 1975, o conceito da aplicação da prevenção da poluição em toda uma empresa e da documentação dos resultados ainda não havia sido colocado em prática antes. O sucesso do programa foi amplamente reconhecido, com a eliminação de mais de 5,4 milhões de toneladas de poluição para o ar, terra e água, e significante redução da poluição por unidade de produção. Desde então, outros projetos 3P vêm sendo realizados em todo o mundo, como estudos de melhorias no controle de peso de revestimentos em uma instalação no País de Gales, pesquisas focadas na reciclagem das águas residuais de uma planta, na Alemanha, e uma variedade de projetos de controle da combustão e recuperação de calor no Japão.

2.2.5. Processos sistêmicos de uso de energia

Embora esforços sejam feitos para fechar ciclos de materiais no ecossistema industrial, não há como fazer isso com a energia. E, ainda por cima, é preciso consumir energia para recuperar materiais e conseguir fechar o ciclo. Isto faz da energia um fator de extrema importância na ecoreestruturação do sistema industrial. Uma abordagem positiva consiste em aumentar a eficiência energética com avanços como a cogeração e o aproveitamento em cascata (ERKMAN et al, 2001).

Jelinski (1992) afirma que, desde os tempos mais primórdios, os ciclos de materiais sempre foram tratados considerando que os recursos utilizáveis eram ilimitados. Na verdade, o ciclo de materiais era visto como de maneira linear, em que os recursos direcionados de uma fase para a seguinte é independente de todos os outros fluxos, conforme retratado na Figura 2. Entretanto, a partir de 1970, foi sendo consolidada a percepção de que os recursos são limitados e que há forte interligação entre os processos, os seres atuantes e o ambiente, sendo necessário que os ecossistemas biológicos se tornem de natureza cíclica, com "recursos" e

"resíduos" sendo indefinidos, uma vez que os resíduos de um componente do sistema representam os recursos para outro. Sendo assim, foi proposto um novo modelo de relacionamento entre os integrantes do ecossistema a fim de minimizar o desperdício de recursos (como pode ser observado na Figura 4). Neste modelo, os componentes do ecossistema mantêm relações de troca de recursos/resíduos entre si de maneira a fechar o ciclo de materiais, sendo dependentes apenas da energia.

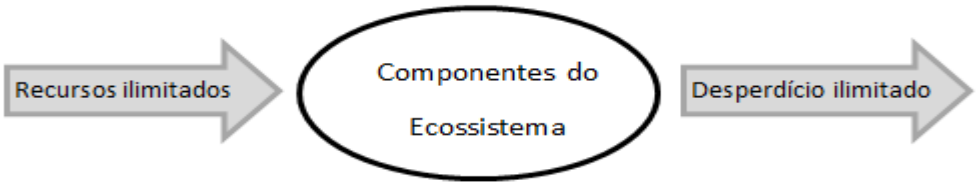

Figura 3 - Fluxo linear de materiais
Fonte: Adaptado JELINSKI (1992)

Figura 4 - Ciclo fechado de materiais
Fonte: Adaptado JELINSKI (1992)

2.2.6. Política alinhada com uma perspectiva de longo prazo para evolução do sistema industrial

Tibbs (1993) sugere que a consolidação da Ecologia Industrial levou ao surgimento de um novo paradigma para o equilíbrio estrutural e ambiental e à otimização do sistema industrial, sendo inevitável o trabalho conjunto de todas as nações para integrar políticas econômicas e ambientais de maneira ampla. Para atingir o seu pleno impacto, os ideais da Ecologia Industrial precisam ser apoiados por novas políticas inovadoras que coerentemente se alinham de acordo com premissas mundiais de regulamentos, financeiras e econômicas.

Nesse sentido, a Ecologia Industrial e os conceitos que a respaldam podem servir como base para se repensar como lidar com o meio ambiente e o desenvolvimento ao formular políticas e criar o correspondente marco legal. Ainda conforme Tibbs (1993, p. 22) “a principal preocupação política é a resolução do amplo debate nos recentes anos sobre a

necessidade de refletir os verdadeiros custos da degradação ambiental para os preços de mercado." Sendo necessária, desse modo, a criação de uma forma efetiva de como e quando atribuir esses custos entre jurisdições, precificando os danos ambientais e internalizando os custos dos mesmos a qualquer instituição.

2.3 ÁREAS DE ABRAGÊNCIA DA ECOLOGIA INDUSTRIAL

De acordo com Tibbs (1993), a aplicação da Ecologia Industrial se dá pela prática de uma gestão integrada em conjunto com um programa técnico conforme mostrado na Figura 4. O lado gerencial objetiva analisar a interface entre a indústria e o meio ambiente, fornecendo uma base para o desenvolvimento de opções estratégicas e decisões políticas. As ferramentas analíticas vão além do método de Análise do Ciclo de Vida, citado na seção anterior, promovendo um mapeamento detalhado dos ecossistemas industriais existentes e identificando os metabolismos industriais dentro dos processos industriais em questão.

Já o lado técnico da Ecologia Industrial está baseado no uso de programas de engenharia e sistemas operacionais específicos para a coleta de dados e monitoramento ambiental em tempo real, valendo-se da tecnologia da informação como uma ferramenta de mapeamento prático e de gestão de impactos ambientais. Além disso, deste lado estão relacionadas às tecnologias de design de produtos, que refletem o princípio da Ecologia Industrial de designs iniciais voltados para a desmontagem e remanufatura de produtos após o fim de sua etapa de consumo.

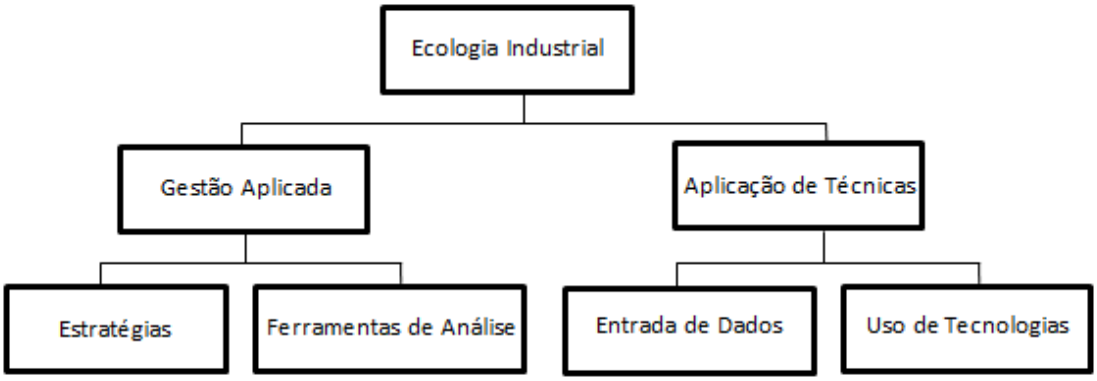

Figura 5 - Relação de tecnologias e gestão com a Ecologia Industrial
Fonte: Adaptado TIBBS (1993)

Para Chertow (2000), a Ecologia Industrial se dá em diferentes níveis de atuação que permitem o desenvolvimento de ações internas à empresa, entre unidades de negócio ou em

escala regional. No nível interno, podem-se citar os programas de Prevenção da Poluição, Produção mais Limpa, Projeto para o Meio Ambiente, Contabilidade Verde, Química Verde. Entre empresas, são exemplos os sistemas baseados na Análise de Ciclo de Vida, Simbiose Industrial, bem como iniciativas setoriais como a Atuação Responsável, entre outros. Já em escala regional, a Análise de Fluxo de Substância e Energia, o Planejamento Estratégico Institucional, e o Plano de Desenvolvimento Regional são as estratégias mais utilizadas, conforme exposta na Figura 6:

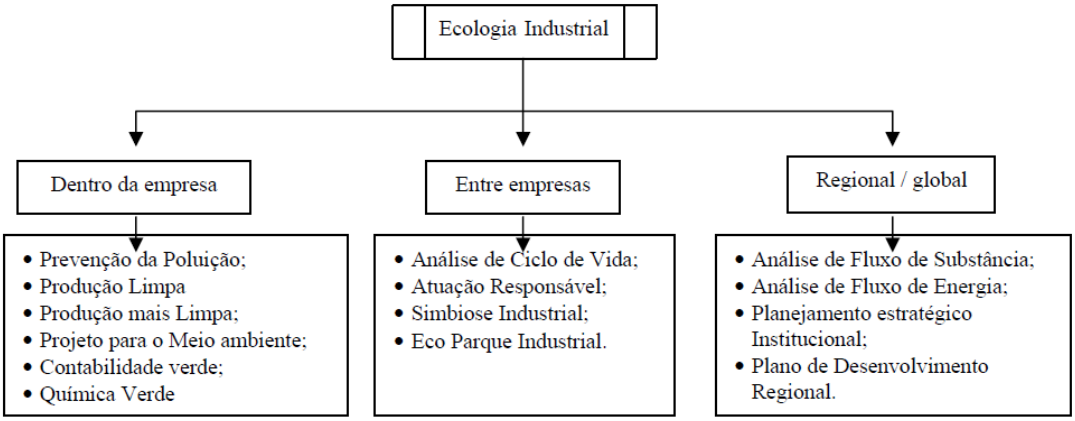

Figura 6 - Áreas de abrangência da Ecologia Industrial
Fonte: Adaptado CHERTOW (2000)

2.3.1 Abrangência ambiental e econômica

De acordo com Martínez (1995), a economia ecológica enfatiza a relação entre o sistema natural e o sistema econômico como um sistema conectado, onde os dois são interdependentes. É defendida a necessidade de se conhecer detalhadamente o processo de produção e obtenção de um bem e sua relação com o meio ambiente para, dessa forma, tornar possível a valoração desse produto economicamente. Sendo a Ecologia Industrial uma proposta que segue base teórica da economia ecológica, é perceptível que a mesma está inserida em um contexto que pretende conectar os princípios e elementos da economia com os do meio ambiente.

Para Gonzales (2009), Ecologia Industrial é uma maneira de se combinar as diferentes abordagens econômicas, já que, em princípio, a lógica da produção neste setor representa a parte "rígida" do modelo de acumulação predominante, mas por outro lado, ele também permite um vislumbre do médio e longo prazo. Ou seja, com a EI é possível projetar os padrões de produção e de consumo de forma a preservar os recursos naturais e reduzir os impactos negativos sobre o ambiente, enquanto há chances de conquistar vantagens

econômicas para as empresas, permitindo-lhes sobressair perante a concorrência imposta por um mundo globalizado.

Além disso, outro ponto a ser tratado é a relação lógica entre meio ambiente, produtividade de recursos, inovação e competitividade, defendida por Porter e van der Linde (1995). Segundo os autores, padrões ambientais projetados adequadamente podem desencadear inovações, reduzindo o custo global de um produto ou aumentando seu valor agregado. Essas inovações permitem que as empresas utilizem uma variedade de insumos de forma mais produtiva – buscando uma maior eficiência no uso de matérias-primas e de energia – de maneira a compensar o custo da redução dos impactos ambientais e gerar bons resultados para as organizações. Eles ainda defendem que as unidades de negócio que se esforçam para alcançar maior produtividade de seus recursos tornam-se mais competitivas e ganham destaque no cenário mercadológico atual, que estaria cada vez mais inclinado para as questões de sustentabilidade.

2.4 CRÍTICAS E LIMITAÇÕES

É importante ressaltar que as vantagens apresentadas pela Ecologia Industrial não são de consenso geral, existindo discussões avindas de alguns defensores da prevenção da poluição, dentre outros. Por um lado, estes consideram que a prevenção da poluição já tem um histórico de resultados a apresentar e seus mecanismos já conseguiram um significativo ganho ambiental nos processos produtivos. Forçadas, por regulamentos e pela opinião pública, a reduzir as pressões sobre o meio ambiente, as empresas obtiveram, em paralelo, ganhos econômicos pelo aumento da eficiência dos processos. Essa experiência, que já permite somar ganhos ambientais com melhoria da imagem perante os consumidores e ganhos econômicos, mantida a pressão legal, determinaria um movimento crescente do sistema produtivo no sentido da adoção de tecnologias limpas. Apesar de a proposta de Ecologia Industrial não ser incompatível com a prevenção da poluição, a implementação simultânea de ambas propostas aumenta a complexidade dos sistemas e a concorrência por recursos (normalmente escassos). Nesse sentido, as principais diferenças entre as duas propostas se daria pelo fato de a EI promover a valorização da reciclagem, diminuindo a importância de ações preventivas (OLDENBURG E GEISER, 1997).

Ainda segundo alguns críticos, a Ecologia Industrial, ainda não teria resultados a apresentar, seria baseada em uma fundamentação teórica vaga, aumentaria riscos e não

incentivaria a inovação tecnológica. As críticas à fundamentação teórica vão desde considerar a teoria como a soma de várias outras, à argumentação de que se basearia em um princípio falso, uma vez que, há muito tempo, não existiriam sistemas naturais intactos que pudessem servir como referência (COMMONER, 1997).

Além disso, há críticas relacionadas às difíceis formas de cooperação entre as empresas e sociedade, que usualmente têm diferentes objetivos, por isso há necessidade de pesquisa e desenvolvimento contínuo nessa área para que se encontrem alternativas economicamente viáveis para todas as partes, conforme exposto por Erkman (2001, p. 66):

> "(...) a Ecologia Industrial é um conceito de extrema relevância para orientar mudanças no mundo, mas para tal é preciso contemplar a questão da participação de toda a sociedade na definição do que produzir e para que. A viabilidade econômica deverá vir associada à viabilidade da vida em sociedade de forma ética e digna. Portanto, melhorar padrões de produção com critérios de eficiência econômica e sustentabilidade ambiental, não é suficiente. É preciso promover uma inversão de critérios e priorizar a produção de bens e serviços com critérios sociais e ambientais."

Garner (1995) afirma ainda que a Ecologia Industrial é um campo de estudo emergente e lista algumas necessidades futuras imprescindíveis ao seu desenvolvimento, tais como:

- Uma definição mais clara do campo e seus conceitos. A definição de Ecologia Industrial, seu alcance e suas metas precisam ser esclarecidos e unidos a fim de ela ser mais útil. Além da necessidade de aperfeiçoamento da aplicação da análise de sistemas.
- Uma maior participação de uma seção transversal de domínios, tais como ecologia, saúde pública, negócios, recursos naturais e engenharia deve ser encorajada, a fim de conseguir melhores resultados em pesquisas e ser uma fundamentação solida para a correta identificação de estratégias para reduzir os encargos ambientais.
- Maiores esforços em incluir disciplinas relacionadas ao Desenvolvimento Sustentável na grade de escolas profissionais de engenharia, negócios, saúde pública, recursos naturais, e de direito. O papel da Ecologia Industrial nesses campos deve ser melhor explorado e definido.
- Mais pesquisas sobre os impactos reais do ecossistema industrial a fim de identificar a identidade que problemas precisam ser resolvidos e como.

- Desenvolvimento de ferramentas como a Avaliação do Ciclo de Vida e Projeto e Design para o Ambiente.
- A melhoria das políticas governamentais, reforçando os incentivos destinados à indústria para redução dos encargos ambientais.

Entretanto, e importante destacar que tais limitações não anulam os aspectos positivos já expostos neste documento, tais como a construção simultânea de melhorias ambientais, reduções de custos, eficiência no uso de recursos, melhor relacionamento entre empresas, redução de rejeitos, e, por isso, a Ecologia Industrial ainda se apresenta como um conceito útil para planejamento e avaliação de sistemas industriais.

2.5 APLICAÇÃO DA ECOLOGIA INDUSTRIAL NO SETOR METALÚRGICO

Na metalurgia é vislumbrada uma possível aplicação da Ecologia Industrial entre a indústria do zinco e do aço. Tal possibilidade mostra-se viável devido ao grande potencial dessas indústrias manterem relações e se estabelecerem como componentes de um ecossistema industrial, em que a empresas produtoras de aço irão fornecer seus resíduos para as unidades do setor do zinco. Tais resíduos, denominados PAE, possuem uma considerável porcentagem de zinco em sua composição e serviriam de matéria prima para a produção de zinco metálico.

Nesse contexto, vale lembrar que a produção do aço pode ser feita através de dois tipos de usinas: as integradas e as semi-integradas. As usinas integradas são aquelas que produzem aço a partir do minério de ferro, usando o carvão (mineral ou vegetal) como agente redutor, nos Fornos Básicos a Oxigênio (ou processo BOF), para obtenção do ferro metálico. Já as usinas semi-integradas não têm a etapa de redução e usam sucata de aço e ferro gusa para alimentar as aciarias elétricas, utilizando os Fornos Elétricos a Arco (processo FEA) (BRASIL, 2011). A Figura 7 apresenta os fluxos simplificados das rotas de produção do aço:

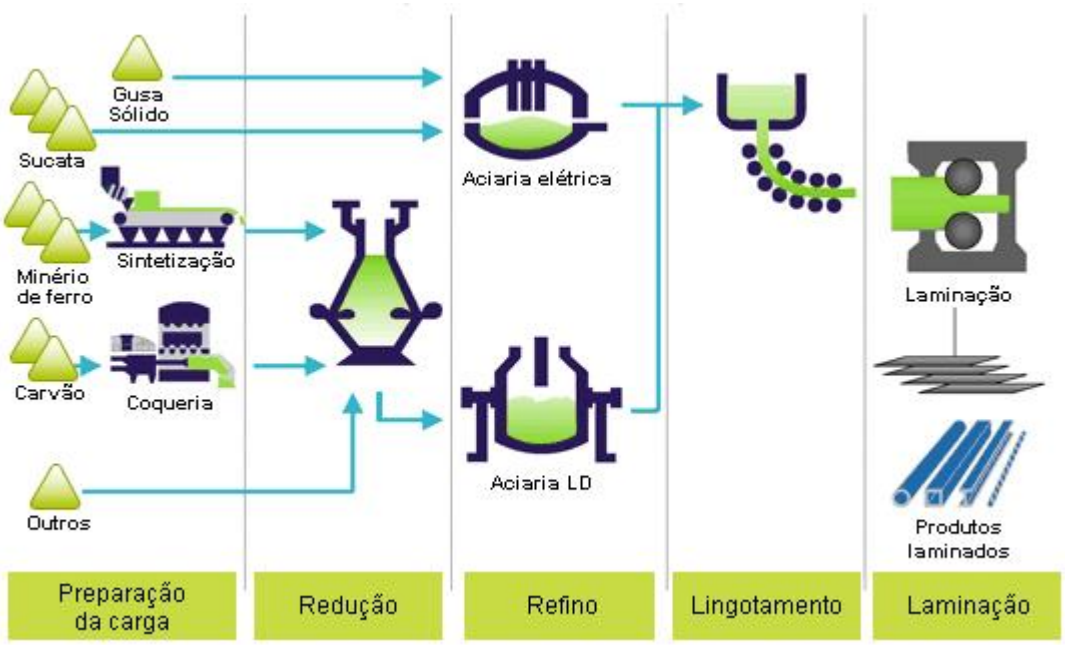

Figura 7 - Fluxo simplificado de produção do aço
Fonte: Instituto Aço Brasil(2009)

Os resíduos que podem ser aproveitados como fonte de matéria prima para obtenção de zinco são apenas os provenientes das usinas de Forno Elétricos a Arco, que representam 23% da produção total de aço nacional (BRASIL, 2011).

2.5.1. Pó de aciaria elétrica

De acordo com Moraes e Brehm (2007), a indústria siderúrgica mundial, ao mesmo tempo em que recicla cerca de 50% de toda sucata de aço gerada, gera uma série de outros resíduos sólidos, efluentes líquidos e emissões gasosas durante o processo de fabricação do aço. Quanto aos resíduos sólidos, as siderúrgicas geram escória, pó, carepa e lama em várias etapas do processo, desde a redução do minério de ferro até a conformação mecânica do aço. O Quadro 3 apresenta uma relação dos principais resíduos siderúrgicos, com suas respectivas utilizações e porcentagem de ferro:

Resíduo	Destino	Observação	% Massa
Pó Coletor de Alto Forno	Sinterização	Presença de zinco	41% Fe e 26% C
Pó de Sinterização	Sinterização	Piora na Permeabilidade da mistura a sintetizar	45% Fe
Fino de Coque (moinha)	Sinterização	Presença de álcalis	70% C
Lama Grossa de Aciaria LD	Concentrado de Ferro em substituição a sucata	Aumento na geração de finos	87% Fe onde 85% metal
Lama Fina de Aciaria LD	Disponibilizado em aterro para venda	Presença de zinco	60% Fe onde 85% metal
Carepa	Sinterização	Perda na redutibilidade	70% Fe
Pó de Forno Elétrico	Disponibilizado em aterro	Presença de zinco	52% Fe2O3 e 15% ZnO

Quadro 3 - Relação dos principais resíduos siderúrgicos
Fonte: REIS (2007)

Neste trabalho o PAE será destacado como um resíduo sólido gerado na rota semi-integrada da produção do aço a partir da coleta, via sistema de despoeiramento, do material particulado presente nas emissões liberadas pelo Forno Elétrico a Arco (FEA). Este material é classificado como resíduo Classe I, sendo exigida sua estocagem em local adequado, ou seja, local coberto protegido das intempéries (MORAES e BREHM, 2007). O processo FEA gera aproximadamente 15 kg de PAE por tonelada de aço produzido, sendo estocadas, em média, 70.000 toneladas por ano dentro do território brasileiro. Devido a essa grande quantidade gerada, torna-se prioritário que se estudem alternativas de reciclagem do mesmo, em vez de dispô-lo em aterros industriais, como é feito na atualidade (BRASIL, 2009).

Ainda conforme Moraes e Brehm (2007), a caracterização do pó de aciaria seja química, física e de fases de um resíduo sólido é a etapa fundamental para avaliar a viabilidade de reciclagem. No caso de fabricação de aço via aciaria elétrica, os pós possuem uma quantidade representativa de ferro e zinco, com porcentagens de zinco variando de 10,9 - 21,5 % e de ferro total entre 37,7 - 48,7%. O PAE pode ser classificado de duas formas, segundo a quantidade de zinco, existindo os pós com altos teores de zinco (acima de 15% de Zn) e os pós com baixos teores de zinco (abaixo de 15% de Zn).

2.5.2. Recuperação do zinco contido no PEA via processo *Waelz*

No Brasil, apesar de a geração de sucata zincada ainda não ter atingido os patamares da Europa, a reciclagem de sucata galvanizada está em fase de expansão. Nesse sentido, o percentual do zinco no PAE vem crescendo ao longo dos anos devido ao aumento de sua

utilização no setor siderúrgico em processos de galvanização dos aços. Além disso, o mercado de zinco tem mostrado problemas devido ao aumento de preço deste elemento, essencialmente obtido a partir de minérios de zinco extraídos da natureza (MORAES e BREHM, 2007). O que torna imperativo a necessidade de viabilizar economicamente os processos de obtenção de zinco através da reciclagem já utilizados em nível mundial no Brasil.

Dentre os processos existentes que visam recuperar os elementos de valor comercial presentes no PAE, conforme apresentado no Quadro 4, será abordado neste documento apenas o processo *Waelz*. Segundo Menad et al (2003), o processo *Waelz* é o método comercial mais utilizado para tratamento e recuperação de metais não-ferrosos (especialmente zinco) das poeiras de aciaria elétricas. Sendo considerado pela indústria como o melhor processo para a recuperação e reciclagem das poeiras contendo zinco superior a 15%.

Processos de Tratamento de PAE:
- Flame Reactor: Tal processo requer a alimentação de PAE e oxigênio para reagir com o coque ou carvão utilizado como redutores. Os produtos obtidos consistem em um óxido de zinco impuro e uma escória rica em ferro que atende os requisitos para ser descartada ou utilizada em pavimentação de rodovias.
- ZTT Ferrolime: É um processo em que o PAE é pelotizado e tratado em um forno rotativo, utilizando como redutor carvão ou coque. Resulta em um óxido de zinco que contém várias impurezas, além de um produto rico em ferro, podendo este, retornar para o forno elétrico, contribuindo para o aumento do rendimento metálico.
- MF: Tecnologia utilizada em pequena escala no Japão. Utiliza uma retorta vertical para o tratamento de resíduos de indústrias produtoras de metais não-ferrosos. Devido aos altos custos de instalação não são amplamente comercializados.
- Laclede Steel: Processo que consiste em misturar o PAE junto com o redutor, e injetar na região onde se forma o plasma. Os vapores de Zn, Pb, Cd são condensados. Outro subproduto gerado é uma escória rica em ferro que é apropriada para o descarte.
- Sirosmelt: Técnica de fusão e redução em que oxigênio, redutor e PAE são injetados por meio de uma lança em direção a uma escória. Os vapores são coletados por filtros de manga. A escória gerada é levada até um segundo forno e são produzidos pós com teores de zinco e chumbo diferentes, podendo ser vendido para a indústria de zinco.
- Enviroscience Met Wool: Processo em que poeira e fundentes são briquetados. Após o processo de cura, os briquetes são levados até um forno de cuba, e são carregados junto com redutor. Neste processo são produzidos ferro gusa e óxido de zinco contaminado com chumbo.
- Eviroplas: Primeiramente ocorre a remoção dos halogeneos (Cl e F), após esta etapa o material é misturado com redutor carbonáceo e carregado no forno. Os gases produzidos são direcionados ao condensador em banho de chumbo para produzir Zn metálico e uma escória inerte que pode ser utilizada para outros fins.
- FASTMET: Tecnologia largamente utilizada pelos EUA e Japão que se baseia na fusão em um forno de soleira rotativa. Este processo produz um material que contem 30-70% de Ferro e o óxido de zinco que contem entre 50-65% Zn. A desvantagem desse processo é o alto consumo de gás combustível.
- Ezinex: Ocorre a lixiviação através de ácido sulfúrico para solubilizar os óxidos, após a eletrólise é obtido um produto rico em zinco metálico de alta pureza.
- Zicex: Ocorre a lixiviação utilizado cloreto de amônia para solubilizar os óxidos e após a eletrólise também é obtido um produto rico em zinco metálico de alta pureza. O resíduo da lixiviação é pelotizado com carvão e reciclado no forno elétrico a arco.

Quadro 4 - Processo de Tratamento de PAE
Fonte: Adaptado ZUNKEL & SCHIMITT (1995)

O circuito *Waelz* se inicia com a mistura da PAE com carvão e fundentes. Em seguida, esta carga é introduzida no forno *Waelz* e, à medida que o forno gira, ocorre a secagem da carga, a volatização dos haletos e álcalis, a redução parcial dos óxidos de ferro e a redução e volatização dos óxidos de zinco. O produto resultante contém até 68% Zn contaminado por chumbo, elementos halogênios e pela escória, outro produto com alto teor de ferro, que não é tóxico (ZUNKEL & SCHIMITT, 1995).

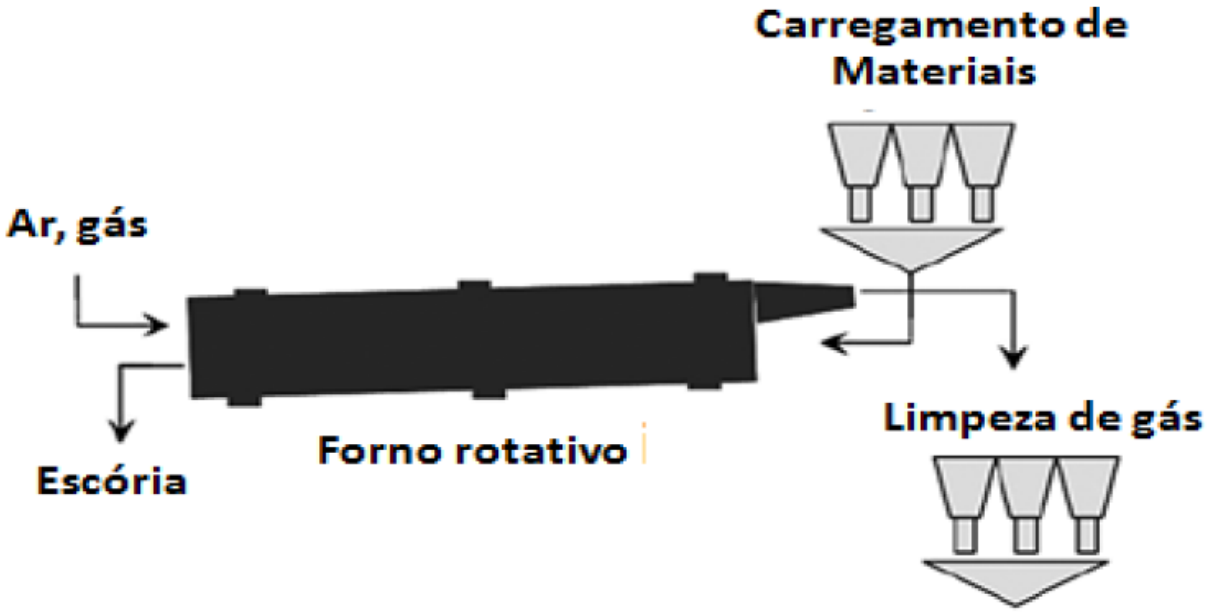

Figura 8 - Desenho esquemático do processo *Waelz*
Fonte: DORONIN & SVYAZHIN (2011)

Esse processo possui mais de 40 unidades em operação no mundo e se distingue pela sua universalidade e simples manutenção do equipamento. O processo *Waelz*, conforme apresentado na Figura 8, tem sido usado para reciclar poeira de aciaria desde meados de 1970 (DORONIN & SVYAZHIN, 2011).

Dessa forma, o processo *Waelz* se mostra uma alternativa interessante para o reaproveitamento do zinco contido no pó de aciaria elétrica, viabilizando a implementação de princípios da Ecologia Industrial na integração entre o setor siderúrgico e a indústria do zinco. Em que o primeiro será beneficiado com o tratamento de um de seus principais resíduos e a segunda terá vantagens com relação ao processo de obtenção de matéria prima.

3. DESENVOLVIMENTO

3.1. O MERCADO DE ZINCO

O zinco é o terceiro metal não-ferroso mais consumido do mundo, tendo como maior produtor e consumidor a China, por isso, o mercado de zinco apresenta uma grande dependência da atividade econômica chinesa. Existem no mundo aproximadamente 270 minas de zinco, sendo 75% localizadas na América e na Ásia (BRASIL, 2010).

No Brasil existem duas minas de zinco, uma em Vazante (MG) e outra em Paracatu (MG), entretanto a disponibilidade de minério de zinco no Brasil não é suficiente para a transformação e produção do metal refinado, gerando assim uma maior necessidade do concentrado de zinco importado (PENHA JÚNIOR, 2002).

No que tange ao processo de transformação e refino de zinco no Brasil, existem apenas duas unidades, ambas pertencentes ao grupo Votorantim: uma localizada no município de Três Marias (MG), com capacidade de produção anual de 180.000 toneladas de zinco metálico e a outra localizada no município de Juiz de Fora com capacidade de produção 98.000 toneladas por ano de zinco metálico. A Votorantim Metais Zinco S.A., unidade pertencente ao Grupo Votorantim, é a única mineradora e produtora de zinco no Brasil (ANUÁRIO MINERAL BRASILEIRO, 2006).

De acordo com dados levantados pela área comercial do Grupo Votorantim (2012) a análise da indústria do zinco global aponta para um déficit de oferta do metal em relação a sua demanda para os próximos cinco anos, conforme verificado na Figura 9 seguinte:

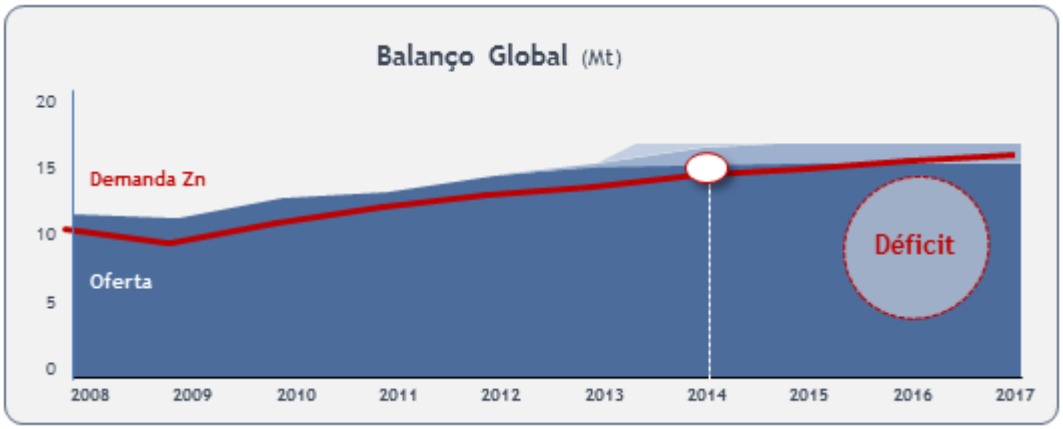

Figura 9 - Oferta X Demanda de zinco no mundo
Fonte: GRUPO VOTORANTIM (2012)

Tal situação tem como principal agravante, conforme mencionado anteriormente, a atuação da China, que mesmo sendo o maior produtor mundial, representando 42% da oferta total em 2012, é o país que possui a maior perspectiva de crescimento do consumo global. É previsto um crescimento da demanda de Zinco de 6,7% a.a. no período de 2012 a 2017, contra um crescimento de oferta de 2,5% a.a., sendo o principal motivador do déficit mundial de concentrado, conforme exposto na Figura 10.

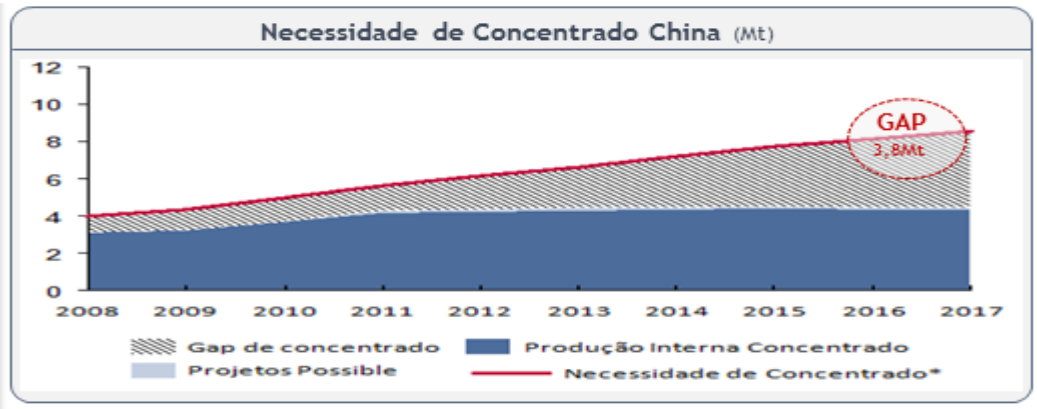

Figura 10 - Necessidade de Concentrado China
Fonte: GRUPO VOTORANTIM (2012)

Conforme apresentado na Figura 11, o perfil do consumo mundial de zinco se estrutura principalmente a partir do mercado de galvanização, seguido pelos setores de fundição, latão e bronze. Ao mesmo tempo, as aplicações do metal se concentram nos setores ligados à infraestrutura, como a construção e transporte, além da produção de bens de consumo e maquinário industrial.

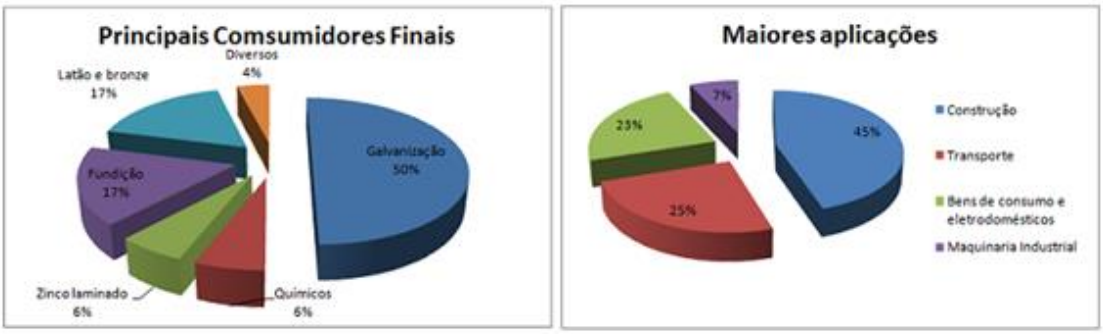

Figura 11 - Perfil do consumo de zinco no mundo
Fonte: IZA(2012)

De forma geral, o uso no Brasil se diferencia um pouco no campo das aplicações. Segundo Carlos Neves (2010), a galvanização é responsável por 45% do consumo nacional de zinco aplicado, principalmente, nas indústrias automobilística, da construção civil e de eletrodomésticos. Para Eduardo Perez (2010), o mercado brasileiro de galvanização

apresentaria um crescimento forte nos anos seguintes, sustentado, principalmente, pelos investimentos em infraestrutura e levando-se em consideração a construção dos empreendimentos relacionados com a Copa do Mundo de 2014. Entretanto, vale destacar que, o atendimento a essa demanda é visto como um desafio para o mercado de zinco brasileiro, uma vez que o Brasil ainda depende da importação de concentrado de zinco para abastecer suas indústrias.

3.2. PRODUÇÃO DO ZINCO

Segundo Magalhães Filho (2000), aproximadamente 90% da produção de zinco advêm de minérios sulfetados que são comercializados como concentrado sulfetado de zinco, apresentando um teor de zinco que varia de 45 a 60% e um teor de enxofre entre 30 e 33%. Além desses elementos, tais concentrados contêm ferro (2-12%), sílica (0,5-3%), chumbo (0,5-3%) e cobre (0,1-1%) como principais impurezas.

Ainda segundo esse autor, o processo mais utilizado para tratamento dos concentrados sulfetados, com mais de 80% de aplicação em plantas de zinco é conhecido como processo eletrolítico, ou por via hidrometalúrgica, que separa os elementos químicos de um composto através da eletricidade. As principais etapas do processo eletrolítico para concentrados sulfetados de zinco são expostas na Figura 12 e descritas adiante:

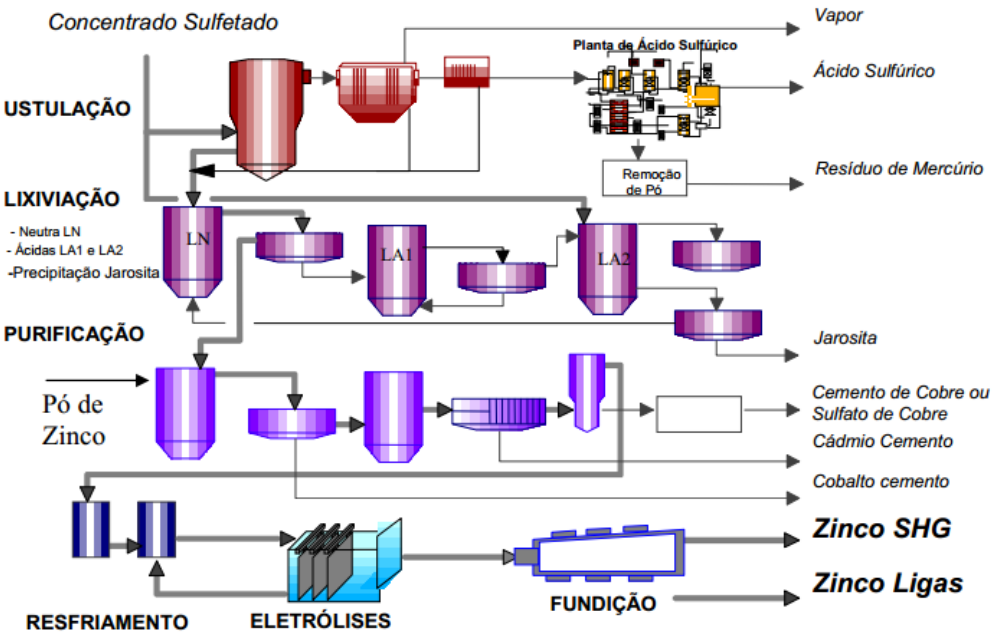

Figura 12 - Fluxograma esquemático para produção de zinco segundo a rota Ustulação-Lixiviação-Eletrólise
Fonte: SVENS et al. (2003)

1) a Ustulação possui a finalidade de remover o enxofre e converter o sulfeto de zinco (ZnS) concentrado em óxido de zinco (ZnO);

2) a Lixiviação é o método de remoção do ferro com ácido sulfúrico. Como 90% do zinco ustulado encontra-se na forma de óxido de zinco, a maior parte do restante está presente como ferrita de zinco;

3) a Purificação objetiva remover algumas impurezas contidas na solução da lixiviação neutra para que a mesma possa ser enviada para a etapa seguintes do processo;

4) a Eletrólise se dá com a presença de várias cubas eletrolíticas onde estão dispostos os catodos de alumínio e os anodos de uma liga chumbo-prata. Tais cubas são alimentadas pela solução eletrolítica, que é uma solução com uma concentração de zinco na faixa de 50 a 70 g/l. Através da aplicação de uma corrente elétrica entre os anodos e catodos, o zinco é depositado nos catodos, formando as folhas catódicas (placas finas de zinco), com um grau de pureza superior a 99,995% de zinco;

5) a Fundição tem como objetivo fundir as folhas catódicas advindas da eletrólise e efetuar o lingotamento de zinco como zinco SHG (*Special High Grade*) ou ligas de zinco.

3.3. O MERCADO DE PAE

De acordo com o Relatório de Sustentabilidade 2012 do Instituto Aço Brasil (IAB, 2012), foram produzidas 104.559 toneladas de pó de aciaria elétrica no ano de 2011. Conforme mencionado no item 2.5.1, o PAE é considerado um resíduo de classe I e, por isso, deve ser armazenado em local adequado, coberto e protegido das intempéries. Um estudo de mercado realizado pelo Grupo Votorantim (2012) revela que há um estoque de 395.000 toneladas de PAE disponíveis em território nacional, sendo esperada uma geração de aproximadamente 100.000 toneladas por ano para os próximos cinco anos.

Em diversas partes do mundo, o estudo de reciclagem do PAE é focado na recuperação do zinco contido no pó. Isso ocorre devido ao fato de o percentual deste elemento no PAE vir crescendo ao longo dos anos, uma vez que o zinco está sendo cada vez mais usado no setor siderúrgico em processos de galvanização dos aços. Quando se reutiliza a sucata galvanizada o zinco evapora durante o processo de fusão, ficando retido no PAE. Nesse sentido, vale ressaltar que, no Brasil, a reciclagem de sucata galvanizada está em fase de expansão e que o teor de zinco no PAE vem crescendo devido ao aumento da sucata

galvanizada, o que evidencia que os processos de reciclagem utilizados em nível mundial, como o processo *Waelz* descrito anteriormente, podem se demonstrar viáveis economicamente dentro da realidade brasileira. Além disso, o mercado de zinco vem mostrando problemas em relação ao aumento de preço deste elemento, principalmente o obtido a partir de minérios de zinco extraídos da natureza (BRASIL, 2009).

3.4. PAE COMO FONTE SECUNDÁRIA DE ZINCO

Segundo Harper (2006) o crescimento considerável do uso de metais somado ao pouco avanço tecnológico, leva ao aumento dos impactos da mineração, consumo de energia e água, bem como das questões toxicológicas. Para o melhor entendimento do uso dessas substâncias e suas consequências, assim como das oportunidades para reciclagem/reutilização das mesmas, a caracterização dos ciclos de materiais tecnológicos é necessária.

Nesse sentido, os ciclos de materiais tecnológicos são classificados como ciclos que quantificam o uso de determinados materiais em tecnologias, os quais, teoricamente, podem abranger informações sobre a forma de como um material se move através da sociedade e sua relação com a economia e o meio ambiente. Quanto maior o número de informações obtido, maior será o nível de detalhamento do estudo, entretanto, é notório que o principal desafio atrelado à elaboração de tais análises está no alcance de informações corporativas, dado que na maioria das vezes, as organizações não possuem robustos sistemas de monitoramento e armazenamento de dados (GRAEDEL et al, 2004).

Atrelado a esse conceito tem-se a Análise de Fluxo de Materiais (MFA), que se baseia na coleta do maior número de dados possível sobre os fluxos e estoques do material a ser investigado, bem como na organização desses dados de maneira a visualizar a política de gestão de materiais (VAN DER VOET et al., 1995). A maior parte dos trabalhos MFA regionais já concluídos consiste em modelos de fluxo estáticos para metais nos níveis nacional e global para curtos intervalos de tempo (por exemplo, um ano).

Tal análise fornece estimativas de todos esses recursos não tradicionais e potenciais, tais como a quantidade de material existente em aterros ou em estoque. Desta forma, permite que os pesquisadores atendam com precisão as questões de escassez de material e alimentação, evidenciando os benefícios ao quantificar a poupança de energia dada a utilização de materiais secundários (HARPER, 2006).

Nesse sentido, vale ressaltar o exemplo da análise de fluxo de zinco no Japão. Aproximadamente 60% de zinco no Japão são usados para o aço galvanizado, ou seja, o zinco está, na maioria das vezes, ligado a outras substâncias. Dessa forma, um modelo dinâmico de análise de fluxo foi usado para o melhor entendimento dessas ligações e foi notado que a maior parte do zinco descartado era recuperada como sucata de aço ou de liga de cobre de sucata. O ciclo de vida do zinco ligado ao aço obteve um aumento do seu ciclo de vida, pela sua separação durante o processo de reciclagem do aço e posterior reutilização. Por outro lado, o zinco ligado ao cobre não é reciclado e termina o seu ciclo de vida no cobre (TABAYASHI et al, 2009).

No período entre 1980 e 2006 o estoque de zinco reciclável no Japão era de 3.300kt, que é quase igual às necessidades de consumo do país por sete anos. Para a recuperação desse zinco estocado, foi utilizado o processo *Waelz*, sendo o Japão referência no uso desse processo. Em 2005, apesar da quantidade total de zinco recuperando atingir um valor de 120kt /ano, as perdas estimadas de zinco pelo processo estavam em torno de 132kt/ano, o que representa aproximadamente 52% das perdas totais. Sendo assim, a fim de aumentar a quantidade total de zinco reciclado, deve-se melhorar a taxa de reciclagem de produtos siderúrgicos e taxa de escoamento de produtos galvanizados (TABAYASHI et al, 2009).

Conforme citado no item 2.5.2 a tecnologia mais usada para a recuperação do zinco contido no pó de aciaria elétrica é o forno *Waelz*, com plantas em operação nos Estados Unidos, Japão, Espanha, Alemanha e Turquia (Befesa, 2013). Na Suíça, tem-se conseguido uma produção de 15.000 toneladas de zinco por fontes secundárias de matéria prima, dentre elas a mais expressiva é o PAE, sendo processadas 12.500 toneladas por ano do pó. Nesse caso o processo de reciclagem utilizado é o Ezimex, citado no Quadro 4 (WIAUX, 2003).

3.5. ESTUDO DE CASO EM UMA EMPRESA METALÚRGICA

3.5.1 A Votorantim Metais Zinco

Os dados estudados foram coletados junto à empresa Votorantim Metais Zinco – Unidade Juiz de Fora, a qual pertence ao Grupo Votorantim. O Grupo Votorantim é o quarto maior grupo empresarial privado do Brasil, presente em mais de 20 países da América do Sul, América do Norte, Europa e Ásia. Atua na produção de cimento, metais, suco concentrado de laranja, compostos químicos, energia, papel e celulose; além de manter negócios nas áreas financeira, tecnológica e biotecnológica (VOTORANTIM METAIS, 2013).

A Votorantim Metais foi criada em 1996 e suas Unidades de Negócio estão divididas nos seguimentos: Alumínio, Níquel e Zinco. Atualmente, a VM é segunda maior empresa brasileira de metais não-ferrosos sendo uma das cinco maiores produtoras mundiais de zinco.

A unidade Juiz de Fora, pertencente ao segmento Zinco, surgiu em abril de 2002, quando a Votorantim Metais assumiu a Companhia Paraibuna de Metais. Com a operação, ampliou sua capacidade de produção de 170 mil toneladas/ano para 265 mil toneladas/ano e reforçou sua participação no mercado de zinco, contando atualmente com 463 colaboradores próprios e 112 terceirizados fixos.

Os principais produtos oferecidos pela unidade são: zinco metálico (102.000 ton/ano), ácido sulfúrico (115.000 ton/ano), sulfato de cobre (3800 ton/ano), concentrado de prata (1200 ton/ano) e cádmio metálico (224 ton/ano). Já a principal matéria prima da unidade é o concentrado sulfetado de zinco, importado de Cajamarquilla, no Peru (VOTORANTIM METAIS, 2013).

O processo produtivo da empresa conta com as etapas do processo eletrolítico para concentrados sulfetados de zinco descritas no item 3.2. e pode ser melhor compreendido conforme a Figura 13:

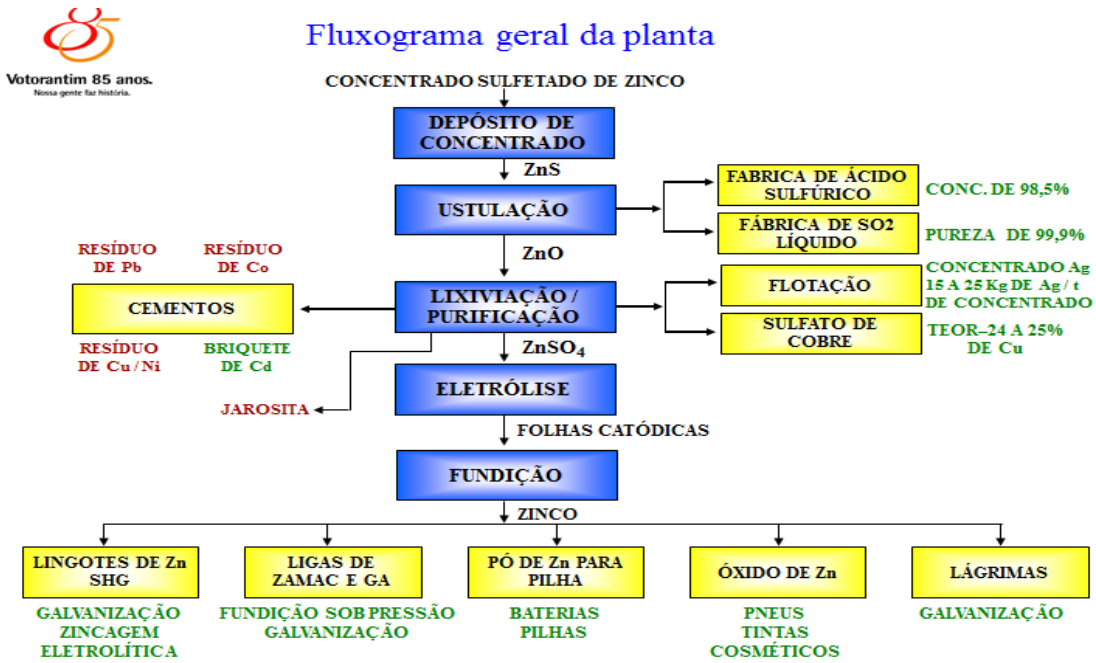

Figura 13 - Fluxograma dos Processos da VM Zinco Juiz de Fora
Fonte: VOTORANTIM METAIS ZINCO JF (2013)

3.5.2 O Projeto Polimetálicos

A Votorantim Metais investiu cerca de R$ 520 milhões na construção da primeira fábrica de Polimetálicos do Brasil, em Juiz de Fora. Este projeto objetiva unir ganhos operacionais e ambientais, permitindo à empresa adicionar valor aos seus produtos e contribuir para melhoria do meio ambiente. A proposta do projeto foi a construção de uma planta que viabilizasse a utilização do processo *Waelz*, já discutido anteriormente, para o reaproveitamento do zinco contido no PAE estocado em território nacional.

A planta projetada entrou em operação no ano de 2011 e a proposta inicial era a redução em 30% do concentrado importado, principal custo da unidade, e diminuição em até 80% a geração de rejeitos (VOTORANTIM METAIS, 2013).

O processo Polimetálicos, conforme exposto na Figura 14, inicia-se com o recebimento e estocagem da matéria prima. Tal material é direcionado para os silos, onde os minérios e resíduos contendo zinco, como: pó de aciaria elétrica, resíduos de lixiviação gerados na própria unidade e outros resíduos e minérios de baixo teor de zinco. Esses resíduos são misturados ao coque e aditivos e encaminhados para a unidade de pelotização. A mistura final alimenta o forno *Waelz*.

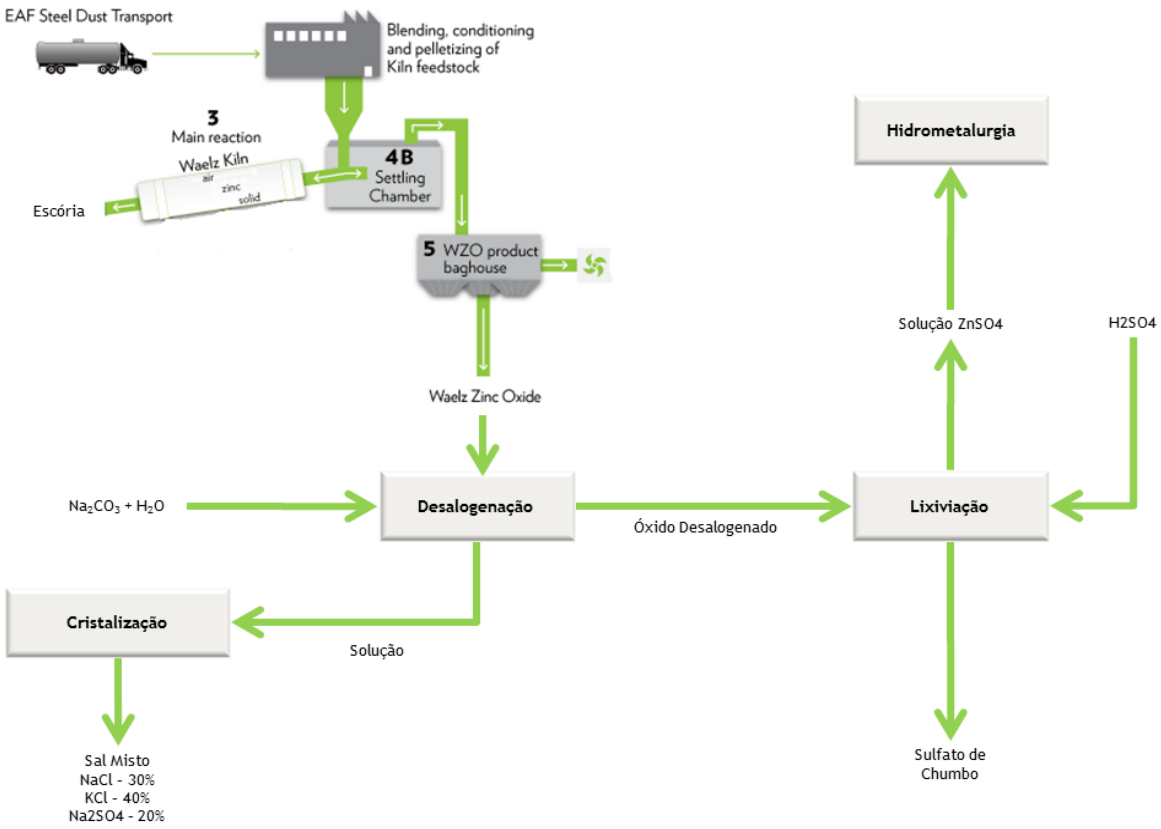

Figura 14 - Fluxograma dos processos envolvidos no Polimetálicos
Fonte: VOTORANTIM METAIS ZINCO JF (2013)

No forno, o material carregado desloca-se lentamente e é aquecido por gases quentes. Junto ao zinco, alguns metais como o chumbo, cádmio e índio, além dos halogênios são volatizados e saem do forno via fluxo de gases. Os gases vão para os filtros de manga, onde são resfriados e o pó, denominado óxido *Waelz,* contido nesses gases é capturado. O óxido *Waelz* é composto, principalmente, pela mistura de óxidos de zinco, cádmio e chumbo, além da presença do sódio, bem como dos halogênios cloro e flúor. Em seguida o óxido *Waelz* é encaminhado para a etapa de desalogenação, que dará origem a uma solução com os halogênios, a qual irá para a fase de cristalização, gerando o sal misto (material utilizado pela indústria de reciclagem de alumínio). O óxido resultante desalogenado segue para a lixiviação, sendo integrado ao fluxo do zinco já existente na Unidade, mostrado anteriormente na Figura 14.

4. RESULTADOS

4.1 RESULTADOS ALCANÇADOS

Apesar da implantação da planta Polimetálicos ter sido em 2011, apenas no final de 2012 o processo se tornou mais estável e a produção de zinco a partir do PAE começou a ser efetivamente realizada.

O forno *Waelz* construído na unidade possui capacidade de processamento de 200.000 toneladas de resíduos por ano. Entretanto, devido a problemas de fornecimento e à queda da produção do setor siderúrgico, é previsto que durante o ano de 2013 serão processadas 70.000 toneladas de PAE, o que representa aproximadamente 11.000 toneladas de zinco advindo do resíduo.

Além disso, a obtenção de zinco via PAE, contribui para a redução de 25% da importação do concentrado importado pela unidade, o qual é um dos principais custos da organização. Tal fato vem contribuindo para a melhora dos resultados financeiros da empresa.

Do ponto de vista operacional, o fluxo do processo projetado, mostrado na figura 14, sofreu alterações devido ao alto teor de flúor presente no óxido *Waelz* proveniente da desalogenação. Dessa forma, tal óxido, atualmente está sendo direcionado para a etapa de Ustulação do fluxo do zinco já existente conforme exposto na figura 15. Esse redirecionamento do óxido *Waelz,* apesar de não programado, não vem comprometendo a eficiência do processo de produção do zinco, dado que o forno ustulador possui capacidade ociosa.

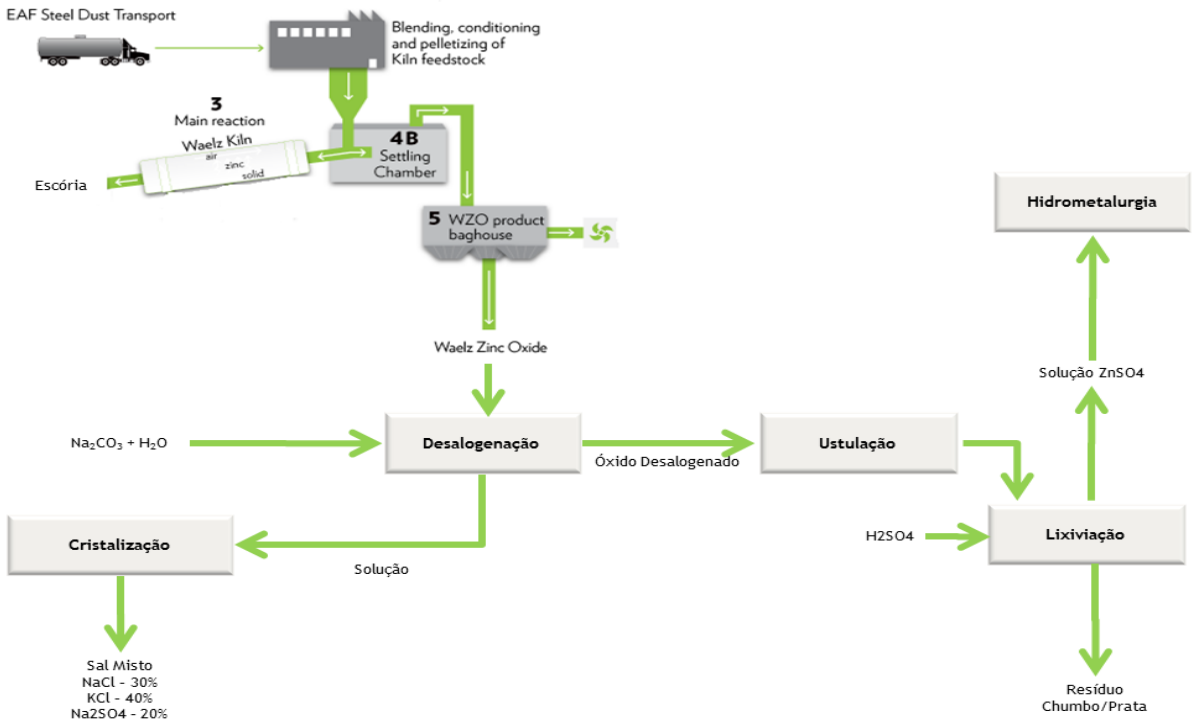

Figura 15 - Fluxograma atual dos processos envolvidos no Polimetálicos
Fonte: VOTORANTIM METAIS ZINCO JF (2013)

Após o processamento do PAE têm-se como saídas: o sulfato de zinco, de onde o zinco será extraído; o sal misto, que, inicialmente não possuía mercado, mas atualmente está sendo vendido para a indústria de reciclagem de alumínio; o resíduo chumbo/prata, que é destinado à barragem de rejeitos da própria empresa; e a escória, a qual está sendo estocada dentro unidade, dado que estão sendo feitos estudos de possíveis mercados para destinação da mesma.

4.2 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

De maneira geral, verifica-se que a implantação do projeto estudado vem trazendo bons resultados para a organização em questão, entretanto, vale destacar alguns pontos de discussão, dificuldades e oportunidades de melhoria do mesmo.

Ao se analisar “Projetado X Realizado”, observa-se que a utilização do forno *Waelz* está abaixo de sua especificação de projeto. A capacidade nominal do forno é de 200.000 toneladas anuais, sendo esperado para o ano de 2013 o processamento de 150.000 toneladas, porém, dadas as condições atuais da unidade, serão processadas aproximadamente 70.000 toneladas de PAE.

Durante a fase de testes, a etapa do processo que mais apresentou problemas foi a desalogenação, devido, principalmente, a alta concentração de flúor presente na matéria prima não prevista pelo projeto. Apesar de terem sido tomadas medidas a melhoria do processo e da etapa se mostrar estabilizada atualmente, o alto teor de flúor no óxido *Waelz* ainda persiste e a melhor solução encontrada até o momento foi direcionar tal óxido para o forno ustulador. No ustulador, o flúor é volatilizado acompanhando os outros gases presentes no forno, sendo purgado pela água inserida no processo de lavagem de gases do forno. Essa água é destinada a ETEI para tratamento e, para garantir que nenhum flúor irá chegar à planta de ácido, foram instalados placas de sílica gel para retenção desse material. A preocupação com o teor de flúor no óxido está no fato de que tal halogênio prejudica a separação das folhas de zinco das folhas catódicas, dentro do processo de Eletrólise.

Devido ao fato de o óxido *Waelz* estar sendo encaminhado para a ustulação ao invés de seguir para a lixiviação conforme especificação do projeto, o sulfato que chumbo, que era umas das saídas do processo *Waelz* não está sendo produzido. O chumbo presente no material resultante do processo de ustulação segue o fluxo de produção de zinco indo para a Lixiviação, onde será purgado no resíduo chumbo/prata e destinado à barragem da unidade. Nesse contexto, vale ressaltar outro objetivo do projeto Polimetálicos que ainda não foi alcançado, dado que, inicialmente, era vislumbrada a recuperação de metais existentes nas barragens da planta, com uma expectativa de produção de 75.000 toneladas de chumbo metálico por ano, que representam 50% do consumo doméstico, 91 toneladas de liga de prata com ouro, 45 mil toneladas de ácido sulfúrico e 6.000 toneladas de polipropileno.

Além disso, outro elemento que vem sendo estudado dentro do processo é o cobre, o qual é perdido no forno *Waelz* e sua recuperação não fora considerada no projeto inicial. Pesquisas estão sendo direcionadas para este assunto, dado que o cobre possui valor representativo no mercado e outras fontes de resíduos que venham a ser processadas no forno *Waelz* podem estar relacionadas com a presença de tal elemento.

Outro ponto a ser citado é o descarte da escória, a qual, de acordo com o projeto inicial, seria direcionada para empresas produtoras de cimento. Devido ao alto teor de flúor e ferro encontrado nesse resíduo, não está sendo possível o reaproveitamento da escória por outras indústrias e seu armazenamento dentro da unidade pode chegar a causar danos ambientais, dado que a empresa não contava com o estoque de tal material. Após dois anos de operação têm-se 45.000 toneladas de escória dentro da unidade e projetos de busca de novas oportunidades de uso do resíduo vêm sendo executados.

Uma visível oportunidade de melhoria dentro do processo Polimetálicos está na redução do consumo de coque, que é utilizado para o aquecimento do forno *Waelz* e é considerado o insumo mais caro de toda a unidade. São consumidos, em média, 300 quilos de coque por tonelada de PAE.

Por fim, outra discussão interessante é sobre as fontes de PAE e sua perspectiva para o futuro. Dada a diminuição da produção do setor siderúrgico durante o ano de 2013, apenas 7.000 toneladas de PAE esta sendo entregue à Votorantim por mês. Apesar de a siderúrgica que firmou acordo com a VM possuir considerável estoque de PAE, a mesma não está se mostrando interessada em mexer em seu estoque, direcionando para a Votorantim apenas o PAE resultante da produção atual. O acordo firmado pelas empresas tinha como pressuposto que a empresa siderúrgica iria disponibilizar toda sua produção e estoque de PAE, sendo onerada por todas as despesas de transporte do material, além de pagar à Votorantim pelo tratamento do resíduo PAE.

Segundo estudos realizados pela Votorantim, no longo prazo, percebe-se que a geração de PAE, bem com o estoque do resíduo não serão suficientes para a alimentação do forno *Waelz* no seu nível máximo de capacidade, conforme mostrado na figura 16 a seguir.

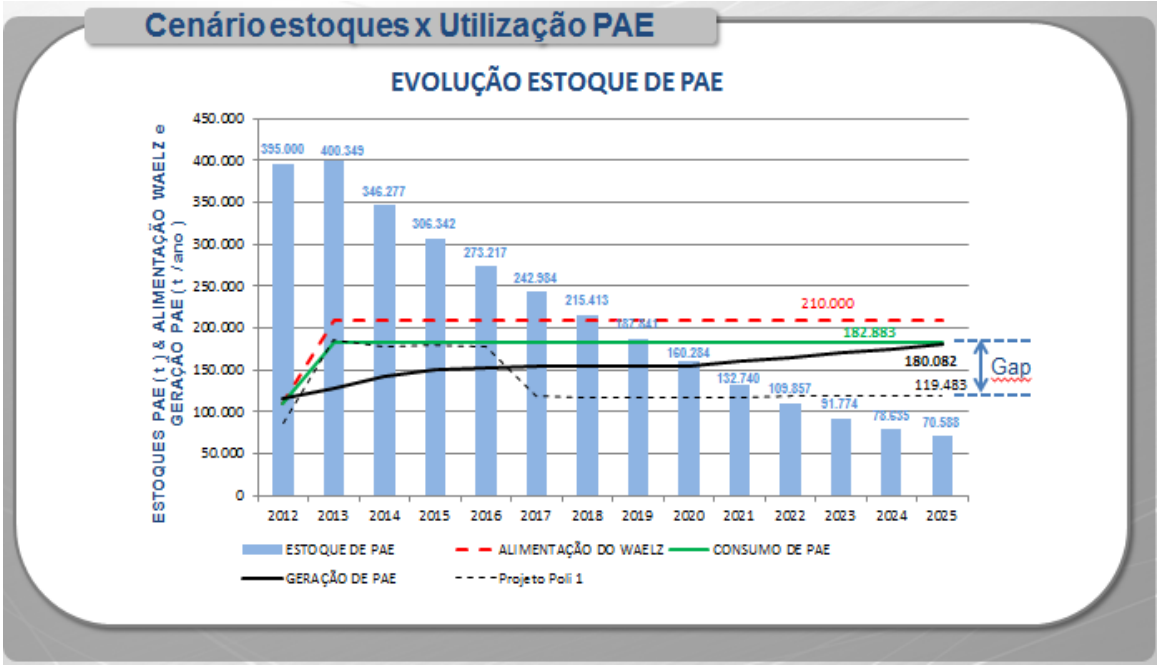

Figura 16 - Evolução do estoque de PAE
Fonte: GRUPO VOTORANTIM (2012)

Diante dessa situação, é perceptível a necessidade de criação de novas oportunidades de obtenção de zinco via outros resíduos. Outra fonte secundária de zinco que vem sendo utilizada pela empresa é o óxido de latão, que possui cerca de 15% de zinco. Entretanto tal

processo não envolve a utilização do forno *Waelz*, e apesar de contribuir para a obtenção de um melhor mix de matérias primas dentro da unidade, não contribui para o aumento da utilização do circuito *Waelz*. Uma oportunidade analisada é o processamento do lodo advindo da Estação de Tratamento de Efluentes Industriais via forno *Waelz*, o qual possui uma geração de 10.000 toneladas ao ano e apresenta 12% de zinco em sua composição.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

De modo geral, observa-se que a aplicação dos conceitos de Ecologia Industrial no setor metalúrgico se mostra como uma potencial solução para os problemas de obtenção de matéria prima e descarte de resíduos dentro desse mercado. Nesse sentido, é perceptível a efetiva consolidação de um ecossistema industrial a partir da integração entre os diferentes setores envolvidos centrado no intercâmbio eficiente de resíduos entre tais setores. Alguns exemplos das relações estabelecidas dentro do ecossistema estudado são: a transferência do PAE entre a siderurgia e a indústria do zinco, o intercâmbio do sal misto entre as indústrias do zinco e do alumínio, a reciclagem de sucatas realizada pelos fornos elétricos dentro do próprio setor siderúrgico dando origem ao PAE, bem como a possibilidade do reaproveitamento da escória gerada pelo processo *Waelz* pela indústria de cimento.

Todavia, com relação ao ideal de metabolismo industrial, o qual possui correspondência com a eficiência dos processos que ocorrem dentro das empresas individuais, indica uma área potencial de melhoria. O estudo sistemático do tipo das reações e dos materiais que estão envolvidos no sistema industrial pode ajudar na obtenção de melhorias no processo de reutilização de insumos, descoberta de novas fontes de materiais e energia. No caso do projeto Polimetálicos estudado, nota-se que a possibilidade de significativas oportunidades de melhoria do processo descrito, conforme discutido no item 4.2.

Nesse sentido, vale destacar que uma das principais dificuldades do estabelecimento de um ecossistema industrial está na integração entre os elementos do mesmo. Cada empresa componente do ecossistema está interessada em aumentar sua competitividade e a geração de estratégias conflitantes pode gerar dificuldades de gestão dos objetivos globais do ecossistema. Tal fato é observado, na questão do PAE, que apesar de se mostrar uma fonte alternativa de zinco viável, sua obtenção vem evidenciando problemas. A empresa fornecedora havia acordado no início do projeto Polimetálicos que seriam fornecidos todos os seus estoques do resíduo, entretanto, na atual conjuntura, tal empresa está fornecendo apenas o PAE advindo e sua produção atual, cerca de 7.000 toneladas mensais.

Segundo Cohen-Rosenthal, para evitar esse tipo de problema, a gestão global de um ecossistema industrial deve contar com a integração entre as seguintes áreas das empresas que fazem parte do mesmo: processos produtivos, recursos humanos, transporte, meio-ambiente e segurança, marketing, energia, materiais, sistema de comunicação. Sendo aconselhável a participação de todos os membros no processo de planejamento estratégico do grupo, em que

metas gerais são estabelecidas e o papel de cada um dentro do grupo é definido. Ações voltadas para o compartilhamento de informações e livre acesso a banco de dados entre as empresas e todos os envolvidos no ecossistema devem ser tomadas, bem como a adoção de sistemas de monitoramento e meios de transferência de energia, materiais e outros recursos.

Além disso, outro problema a ser citado é a qualidade da matéria prima, dado que a alta concentração de flúor tem trazido problemas dentro do processo de recuperação do zinco, bem como de outros metais presentes no PAE. Desta forma, devido a dificuldade de obtenção de matéria prima e à qualidade da mesma, observa-se que o forno *Waelz*, que possui capacidade de processamento de aproximadamente 16.000 toneladas mensais, vem sendo subutilizado. O que evidencia a necessidade de se buscar novas fontes de obtenção do PAE e novas matérias primas alternativas para obtenção do zinco via processo *Waelz*.

Nesse sentido, conforme mencionado no item 2.4, vale lembrar que a Ecologia Industrial é uma definição ainda em desenvolvimento, sendo necessária a realização de mais pesquisas nesse campo. De acordo com as dificuldades supracitadas enfrentadas pela empresa em estudo, é perceptível a conveniência de maior aprofundamento sobre os impactos reais do ecossistema industrial a fim de antecipar problemas a serem resolvidos e criar soluções para os mesmos.

Apesar das limitações apresentadas, a visão sistêmica, abrangente e integrada de todos os componentes da economia industrial, bem como seu dinamismo defendidos pela Ecologia Industrial vêm ao encontro dos pressupostos da Engenharia de Produção. Apesar de ser um conceito relativamente recente, tal ferramenta mostra considerável aplicabilidade diante do mercado atual, dado o esgotamento de recursos, o aumento de passivos ambientais e a constante busca do desenvolvimento sustentável. Sendo assim, além do conhecimento técnico proporcionado por este estudo, foi possível a aproximação de discussões que envolvem a sustentabilidade das organizações e de todos os componentes envolvidos ao seu redor.

Por fim, é importante ressaltar que o presente trabalho não esgota o assunto abordado, sendo recomendada a realização de trabalhos futuros que abordem aspectos relevantes como a investigação de novas indústrias que possam compor o ecossistema industrial estudado, como novas fontes de material a ser processado no forno *Waelz*, e novos consumidores dos resíduos resultantes do processo, além do maior aprofundamento sobre o reaproveitamento dos resíduos estocados nas barragens da Votorantim. Do ponto de vista do metabolismo industrial, seria interessante a realização de estudos quanto à qualidade do PAE recebido, uma vez que a

alta concentração de flúor vem prejudicando a eficiência do projeto, além do recolhimento de mais dados sobre a performance do processo *Waelz*, dado que a planta instalada possui menos de dois anos de operação e muitos problemas enfrentados podem estar relacionados com a curva de aprendizagem, comum na maioria dos projetos.

REFERÊNCIAS

ALLENBY, B. R. **Achieving Sustainable Development through Industrial Ecology**. [Reprinted with the permission of the University Press of New England, 1992].

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

AYRES, Robert U., Industrial Metabolism: Theory and Policy. [Reprinted with permission from **The greening of industrial ecosystems.** Copyright 1994 by the Nacional Academy of Sciences. Courtesy of the National Academy Press, Washigton, D. C., 1994.

BEFESA, **Steel and Galvanization Waste Recycling**, 2013. Disponível em: <http://www.befesa-steel.com/web/es/noticias/ultimas/index.html> Acesso em: 24 de julho de 2013.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Geologia, Mineração e transformação Mineral. **Anuário Estatístico Setor Metalúrgico 2011**, Brasília, 2011. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/sgm/galerias/arquivos/publicacoes/Anuarios/LIVRO_Metalxrgico_WEB.pdf> Acesso em: 21 de setembro de 2012.

_____. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Geologia, Mineração e transformação Mineral, SGM. **Estudo da Reciclagem de Metais no País,** Brasília, 2009. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/sgm/galerias/arquivos/plano_duo_decenal/estudos_consolidados/P57_RT83_Reciclagem_de_Metais_no_Paxs.pdf > Acesso em: 21 de setembro de 2012.

_____. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Geologia, Mineração e transformação Mineral, SGM. **Perfil do Minério de Zinco,** Brasília, 2010. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/sgm/galerias/arquivos/plano_duo_decenal/a_mineracao_brasileira/P16_RT25_Perfil_do_Minxrio_de_Zinco.pdf > Acesso em: 23 de julho de 2013.

CAVALCANTI, Clóvis. **Desenvolvimento e natureza:** estudo para uma sociedade sustentável. 2. Ed. São Paulo: Cortez; Recife: Fundação Joaquim Nabuco, p. 17-251, 998.

CERVANTES, G. **A methodology for teaching Industrial Ecology.** Departament d'Enginyeria Quı´mica, ETSEIT, Universitat Politécnica de Catalunya, Barcelona, Spain, 2001.

CHERTOW, Marian R. **Industrial Symbiosis:** Literature and Taxonomy. Annual Review Energy Environment, n.25, 2000.

CNI. Confederação Nacional da Indústria. Instituto Aço Brasil. **A indústria do aço no Brasil,** Brasília: CNI, 2012. Disponível em: <http://www.cnisustentabilidade.com.br/docs/IABR_RIO20_web.pdf> Acesso em: 18 de setembro de 2012.

COHEN-ROSENTHAL. E. **Eco-Industrial Strategies**. Unleashing synergy between economic development and the environment, p. 163-185, 2003.

COMMONER, B. **The relation between industrial and Ecologycal Systems**. J. Cleaner Prod., v. 5, p. 125-129, 1997.

COSTA, Márcio Macedo da, **Princípios de Ecologia Industrial Aplicados à Sustentabilidade Ambiental e aos Sistemas de Produção de Aço**. XIV, 257 p. 29,7 cm. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, D.Sc., Planejamento Energético, 2002.

COTÉ, R., COHEN-ROSENTHAL, E. **Designing eco-industrial parks:** a synthesis of some experiences. Journal of Cleaner Production, v.6, n.3-4, pp.181-188, 1998.

COUTINHO, Francisco Ângelo et al., **Visão de mundo em livros didáticos de biologia. Um estudo sobre o conceito ecossistema.** R. B. E. C. T., vol 4, núm 2, mai./ago. 2011. Disponível em: <http://www.pg.utfpr.edu.br/ppgep/periodicos/index.php/rbect/article/viewFile/799/699>. Acesso em: 11 de outubro de 2012.

COUTINHO, T.A. **Materiais e Processos I:** Metalúrgica Física. Escola de Engenharia Operacional – Unisinos. São Leopoldo: Universidade do vale do Rio Sinos – Unisinos, 1972;

DORONIN, I. E.; SVYAZHIN, A. G. **Commercial Methods of Recycling Dust From Steelmaking. Metallurgist**, v. 54, n. 9–10, 2011.

ERKMAN, S. **Industrial ecology:** an historical view, [s.l.], J.Cleaner Prod., v.5, n. 1/2, p. 1-10, 1997.

_____. (Org.). **Ecologia Industrial:** uma agenda para a evolução do sistema industrial Ecologia Industrial: uma agenda para a evolução do sistema industrial. São Paulo, Instituto Pólis, 2005. 88p. (Cadernos de Proposições para o Século xxi, 12).

_____.; RAMASWAMY, R. **Industrial Ecology:** a New Cleaner Production strategy. UNEP Industry and Environment, p. 64-67, 2001.

FEIDEN,Andréia. **O retorno do alumínio no processo de produção visando a logística reversa:** estudo de caso em uma empresa metalúrgica. 2009. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Administração) – Centro Universitário Feevale, Novo Hamburgo, 2009.

FROSCH, R. A. e GALLOPOULOS, N. E. **Scientific American**, 144- 152, 1989.

GARNER, Andy. **Industrial Ecology:** An Introduction. National Pollution Prevention Center for Higher Education, University of Michigan, 1995.

GIANNETTI, B. F. C. Almeida, M. V. B., **Ecologia Industrial Conceitos, Ferramentas E Aplicações,** Ed. Edgard Blucher, S. Paulo, 2006.

GIL, ANTONIO CARLOS. **Como elaborar um projeto de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2002.

GONZALES , G. C. **Una Revisión de los Pricipios de la Ecología Industrial,** Nueva Época, Ano 22, Número 59, 2009.

GRAEDEL, T.E., VAN BEERS, D., BERTRAM, M., FUSE, K., GORDON, R.B., GRITSININ, A., KAPUR, A., KLEE, R.J., LIFSET, R.J., MEMON, L., et al. **Multilevel cycle of anthropogenic copper**. Environmental Science Technology, 38, 1242, 2004.

GRUPO VOTORANTIM, **Relatório Comercial 2012**, Material interno do Grupo Votorantim, 2012.

HARPER, E.M., GRAEDEL, T.E., JOHNSON, J. **Making Metals Count: Applications of Material Flow Analysis**. Environmental Engineering Science, Volume 23, Número 3, 2006.

HEERES, R. R. et al., **Eco-industrial park iniciatives in the USA and the Netherlands:** first lessons. Journal of Cleaner Production, n. 12, p. 985-995, 2004.

HERMAN, Robert., ARDEKANI, Siamak A. e AUSUBEL , Jesse H., **Dematerialization,** In: Jesse H. Ausubel e Hedy E. Sladovich (eds.):Technology and Environment, Washington, dc, National Academy Press, p. 50-69, 1989.

HISCHIER, R. B., I. **LCA study of a plasma television device**, Int J Life Cycle Assess, 15:428–438, 2010.

IABr. Instituto Aço Brasil. **Aço Construindo um futuro sustentável,** 2009. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/site%5Cportugues%5Cbiblioteca%5CIABr%20Folder%20Institucional.pdf> Acesso em: 13 de outubro de 2012.

IABr. Instituto Aço Brasil. **Relatório de Sustentabilidade**, 2012. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/biblioteca/relatorio_sustentabilidade_2012.pdf > Acesso em: 22 de julho de 2013.

IABr. Instituto Aço Brasil, 2011. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/index.asp>. Acesso em: 23 de setembro de 2012.

IZA. *International Zinc Association*. Disponível em: < http://www.zinc.org/basics/zinc_statistics>. Acesso em: 21 de setembro de 2012.

JELINSKI , L. W., GRAEDEL, T. E., LAUDISE, R. A., MCCALL, D. W. AND PATEL, C. K. N. **Industrial ecology:** Concepts and approaches, Proc. Nati. Acad. Sci. USA, Vol. 89, pp. 793-797, February 1992, Colloquium Paper.

Kearsley, A., & Riddel, M., **A further inquiry into the Pollution Haven Hypothesis and the Environmental Kuznets Curve**. Ecological Economics, 69(4), 905–919, 2010.

KINCAID, Judy; OVERCASH, Michael**. Industrial Ecosystem development at metropolitan level**. Journal of Cleaner Production, v. 5, n. x, p. 117-126, 2001.

MAGALHÃES FILHO, W. **Seminário de zinco e suas aplicações: tratamento de concentrados sulfetados de zinco**. São Paulo: Associação brasileira de metais, 2000.

MARTÍNEZ, Allier. **Los principios de la Economía Ecológica**, Textos de Podolinski, Geddes y Soddy, Fundación Argentaria y Visor Distribuidor, Madrid, 1995.

MEADOWS, Dennis L., MEADOWS, Donella H., RANDERS, Jörgen & BEHRENS, W. **Limites do crescimento um relatório para o Projeto do Clube de Roma sobre o dilema da humanidade**. São Paulo, Perspectiva. [Em inglês: The limits to growth, (1972).

MENAD, N.; AYALA, J.N.; CARCEDO, F. G.; HERNÁNDEZ, A. **Study of the presence of fluorine in the recycled fractions during carbothermal treatment of EAF dust.** Waste Management, v. 23. n. 6, 2003.

MORAES, C.A.M., e BREHM, F.A, **Estado da arte da reciclagem de pó de aciaria elétrica.** XXXVIII Seminário de Aciaria – Internacional, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2007;

NEVES, Carlos Augusto Ramos – DNPM. Disponível em: <https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=6400> Acesso em: 18 de setembro de 2012.

OLDENBURG, K., GEISER, K., **"Pollution prevention and...or industrial ecology".** Journal of Cleaner Production, v.5, n.1-2, pp. 103-108, 1997.

PENHA JÚNIOR, F. **Processos de aplicação do zinco**. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 2002.

PEREIRA, Alessandro Sanches et al. **Ecologia Industrial, Produção e Ambiente:** uma discussão sobre as abordagens de inter-conectividade produtiva. Trabalho apresentado no 1st International Workshop Advances in Cleaner Production, São Paulo, 2007.

PEREIRA, F. Antunes. **Ilusões e paradoxos da reciclagem:** o caminho da desmaterialização da economia. Revista Águas e Resíduos, nº 5/6 Série II. APESB pp.56-75, 2004.

PEREZ, Eduardo. **Tendências do mercado brasileiro de galvanização.** Disponível em: <http://www.icz.org.br/upfiles/arquivos/apresentacoes/latingalva-2010- eduardo-perez-votorantim.pdf> Acesso em: 18 de setembro de 2012.

PORTER, M; LINDE, van der. C. **Green and Competitive.** Harvard Business Review, [s.l.], p.120-134, set./out. 1995.

REIS, W. L.C.; VIEIRA, A. T. O.; ECHTERNACHT, J. H.; OLIVEIRA, J. R.; LONGO, L. **Reciclagem da lama fina de aciaria em pelotas metalizadas.** XXXVIII Seminário de Aciaria – Internacional, Belo Horizonte, MG, Brasil. 2007.

SAGAR, Ambuj D. e FROSCH, Robert A., **A perspective on industrial ecology and its appkation to a metals-industry ecosystem,** J. Cleaner Prod Vol. 5, No. 1-2, pp. 3945, 1997.

SANTOS, Juarez Fontana dos, **Perfil do minério de zinco,** 2010. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/sgm/galerias/arquivos/plano_duo_decenal/a_mineracao_brasileira/P16_RT25_Perfil_do_Minxrio_de_Zinco.pdf> Acesso em: 18 de setembro de 2012.

SOUZA, Brenno Ferreira de, **Estudo da evolução do mercado siderúrgico em economias de crise,** 2010. Disponível em: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAABqPYAI/estudo-evolucao-mercado-siderurgico-economias-crise> Acesso em: 20 de setembro de 2012.

STAHEL, W. R. e JACKSON, T. **Optimal Utilisation and Durability** — Towards a New Defi nition of the Service Economy, In: T. Jackson (ed.): Clean Production Strategies, Boca Raton, Flórida: Lewis Publishers, p. 261-291, 1993.

SVENS K.; KERSTIENS, BERND; RUNKEL, MARCUS. **"Recent Experiences with Modern Zinc Processing Technology",** Erzmetall, pp 94 -103, 2003.

TABAYASHI, H., DAIGO, I., MATSUNO, Y. and ADACHI, Y. **Development of a Dynamic Substance Flow Model of Zinc in Japan,** ISIJ International, Vol. 49, No. 8, pp. 1265–1271, 2009.

TIBBS, H. B. C. **Industrial Ecology, An Environmental Agenda for Industry**, Global Business Network, Emeryville, USA,1993.

UFRGS. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, **O setor metalúrgico.** Disponível em: <http:// www.ct.ufrgs.br/ntcm/demet/ppc/4ppc.doc> Acesso em: 19 de setembro de 2012.

VAN BERKEL, R. **Cleaner Production for Process**, Plenary Lecture - CHEMECA 2000, Perth WA, 9-12, July 2000.

VAN DER VOET, E., KLEIJN, R., VAN OERS, L., HEI- JUNGS, R., HUELE, R., and MULDER, P. **Substance flows through the economy and environment of a region, part I: Systems definition**. Environ. Sci. Pollut. Res. 2, 90, 1995.

VOTORANTIM METAIS, 2013. Disponível em: < http://www.vmetais.com.br/pt-BR/Institucional/Paginas/QuemSomos.aspx>. Acesso em: 23 de setembro de 2012.

WIAUX, J. P., **Perspectives on Industrial Ecology,** Reclycling of zinc-containing secondary products from the galvanizing and steel industries – A new case os applied industrial ecology, Titalyse SA, Switzerland, 2003.

ZUNKEL, A.D.; SCHIMITT, R.J. **Review of electric arc furnace dust treatment processes and environmental regulations.** In: ELECTRIC FURNACE CONFERENCE, Proceedings v. 53, 1995.